Metsätehon raportti 253
(väliraportti 16.9.2019)

Puutavara- ja hakeajoneuvojen massojen noston vaikutukset

Pirjo Venäläinen
Asko Poikela

ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu)

METSÄTEHO OY
Vernissakatu 1
01300 Vantaa

www.metsateho.fi

Puutavara- ja hakeajoneuvojen massojen noston vaikutukset

Pirjo Venäläinen
Asko Poikela

Metsätehon raportti 253 (väliraportti 16.9.2019)

ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu)

© Metsäteho Oy

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ **3**

1 JOHDANTO **4**
1.1 Tausta ja tavoitteet 4
1.2 Esillä olleet muutokset ajoneuvojen massoihin 4

2 TUTKITUT KULJETUSVIRRAT JA AJONEUVO-YHDISTELMÄT **5**
2.1 Kotimaisen puutavaran ja hakkeen autokuljetukset 5
2.2 Tutkitut HCT- ja verrokkiyhdistelmät 5

3 YHDISTELMIEN MASSOJEN NOSTON VAIKUTUKSIA **9**
3.1 Ajojen määrä 9
3.2 Kuljetustehokkuus 11
3.3 Vaikutus rautatiekuljetusten käyttöön 12
3.4 Kuljetuskustannukset 13
3.4.1 Kuljetusten kustannustekijät ja tietojen keruu 13
3.4.2 Yksittäisten yhdistelmien kustannusvertailut 17
3.4.3 Valtakunnalliset kustannuslaskelmat 23
3.5 Ajoneuvojen kestävyys 25
3.5.1 Vetolaitteet 25
3.5.2 Renkaat 27
3.6 Polttoaineen kulutus ja päästöt 28
3.6.1 Polttoainekulutukseen vaikuttavat tekijät ja tietojen keruu 28
3.6.2 Kuljetusreitin vaikutus polttoaineen kulutukseen 31
3.6.3 Polttoaineen kulutusfunktiot 33
3.6.4 Kuljetusten polttoaineen kulutusvertailut 33
3.6.5 Ajovastusmittauksiin perustuvat kulutus- ja päästölaskelmat 35
3.6.6 Valtakunnalliset kulutus- ja päästölaskelmat 36
3.7 Tie- ja siltarasitus 37
3.7.1 Tiet 37
3.7.2 Keinoja vaikuttaa tierasitukseen 37
3.7.3 Sillat 39
3.7.4 HCT-käytävät 40
3.8 Liikenneturvallisuus 46
3.9 Työllisyysvaikutukset 47

4 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET **48**

LÄHTEET **52**

LIITTEET

TIIVISTELMÄ

Suomessa on ollut käynnissä HCT-yhdistelmien kokeiluita. Tässä väliraportissa on kuvattu kokonaismassojen noston vaikutuksia puutavara- ja hakekuljetuksissa. Selvitys pohjautuu sen laatimisvaiheessa käytettävissä oleviin tutkimustuloksiin ja -aineistoihin. Tämä väliraportti tullaan päivittämään vuoden 2019 lopulla uusimpien tutkimustulosten myötä. Massojen noston vaikutuksia on tarkasteltu 1) tarvittavien puukuormien lukumäärän, 2) kuljetuskustannusten, 3) polttoaineen kulutuksen ja päästöjen, 4) tie- ja siltarasituksen, 5) liikenneturvallisuuden ja 6) ajoneuvojen kestävyyden näkökulmasta.

Metsäteho Oy:n omissa tarkasteluissa on kerätty kuorma-, polttoaineen kulutus- ja kustannustietoja HCT-puutavara- ja hakeyhdistelmistä ja näiden verrokeista (osasta tiedonkeruu on vielä kesken). Tämän hetkisten laskelmien mukaan HCT-yhdistelmät vähentäisivät vuosittain jopa 72 000–157 000 puutavara- ja 11 000–39 000 hakekuormaa 76-tonnisiin yhdistelmiin verrattuna. Kuljetuskustannukset vähentyisivät 12,1–36,0 milj. € vuodessa (puutavarakuljetuksissa 0,8 %–11,4 % per tuoretonni 100–300 km:n kuljetusmatkalla ja hakekuljetuksissa 4,9–15,6 % per m^3 50–300 km:n kuljetusmatkalla). Vertailuissa on otettava huomioon, että suurimpien HCT-yhdistelmien hyödyntäminen edellyttää uudenlaisia logistisia toimintamalleja, joiden hyötyjä ja lisäkustannuksia ei ole kaikin osin arvioitu. Polttoaineen kulutus laskisi puutavarakuljetuksissa 5,6–20,1 % (per tuoretonni 100–300 km:n kuljetusmatkalla). Hakekuljetusten polttoaineen kulutuslaskelmat esitetään loppuraportissa.

HCT-yhdistelmien tierasitusvaikutuksia on jo tutkittu muutamassa selvityksessä, mutta parin julkaisemattoman tutkimuksen takia yhteenveto tuloksista esitetään tämän väliraportin sijasta myöhemmin valmistuvassa loppuraportissa.

Tierasituksen vähentämiseksi on kuvattu erilaisia keinoja (CTI, perävaunujen keskellä sijaitsevat lisäpyörät, sorateiden ajantasainen kuljetuskelpoisuusluokitus). Siltojen osalta suuret yhdistelmät ovat ongelmallisimpia pitkiä siltoja koskien. Liiallisen kuormituksen välttämiseksi tarvitaan myös uudenlaisia digitaalisia liikenteen ohjauskeinoja.

HCT-kuljetukset on ajateltu rajoitettavan vain tietyille HCT-reiteille. Näin taataan reittien sopivuus HCT-yhdistelmille ja toisaalta priorisoidaan tarvittavat infrastruktuuri-investoinnit yhteysväleille, joilla hyödyt HCT-yhdistelmille ovat suurimmat. Puutavara- ja hakekuljetusten osalta HCT-reittejä olisi tarpeen HCT-terminaaleista tuotantolaitoksille sekä tuotantolaitosten välille (vaihtopuu- ja sivutuotekuljetukset). 84-tonnisia HCT-yhdistelmiä on hyödynnetty myös metsästä lähteviin kuljetuksiin ja niiden osalta on esitetty reitistöratkaisua, joka eläisi teiden kantavuuden mukaan (laajimmillaan talvella teiden runkojen ollessa jäässä).

HCT-yhdistelmien liikenneturvallisuuden ja -sujuvuuden osalta Oulun yliopisto on tutkinut yhdistelmien jarrutusmatkoja, luistoa, kiihtyvyyttä ja ajonopeuksia ylämäessä. HCT-yhdistelmien ei ole havaittu näiden osalta tuovan merkittäviä eroja liikenneturvallisuuteen. Yhdistelmien stabiliteettista ja kääntyvyydestä määrättiin asetuksessa, jolla pidennettiin ajoneuvojen maksimipituuksia.

1 JOHDANTO

1.1 Tausta ja tavoitteet

HCT-yhdistelmillä (High Capacity Transport) tarkoitetaan normaaliajossa olevia, nykyiset mitta- ja massasäännökset ylittäviä yhdistelmiä, joille on myönnetty Traficomin (entinen Trafi) (2019) kokeilulupa. HCT-yhdistelmät ovat yli 76 tonnia painavia ja/tai yli 25,25 metriä pitkiä. Ajoneuvojen pidentämisen salliva asetusmuutos tuli voimaan 21.1.2019[1]. Samaan aikaan on käynnissä lainsäädäntövalmistelu myös ajoneuvojen massojen nostamiseksi.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli arvioida ajoneuvojen massojen noston vaikutuksia puutavaran ja hakkeen kuljetuksiin. Raportti täydentää Metsäteho Oy:n aikaisempaa selvitystä (Venäläinen 2019), jossa on tarkastelu ajoneuvojen pituuksien noston vaikutuksia. Lisäksi tähän raporttiin on tarkistettu ja täydennetty aiemmassa raportissa esitettyjä laskelmia. Tämä raportti kuvaa tuloksia sen aineiston pohjalta, joka oli käytettävissä syksyyn 2018 mennessä. Erillisessä raportissa vuoden 2019 aikana tullaan tarkastelemaan yhdistelmien koon vaikutusta huolto- ja korjauskustannuksiin sekä polttoaineen kulutusta tieluokan ja tien kunnon mukaan.

Tekijät kiittävät taustatietojen toimittamiseen osallistuneita kuljetusyrityksiä (Kari Malmstedt Oy, Ketosen Kuljetus Oy, Koneurakointi Aki Sammalisto Oy, Konnekuljetus Oy, Kuljetusliike Kalevi Huhtala Oy, Kuljetusliike Moilaspojat Oy, Kuljetusliike O Malinen Oy, Kuljetusliike Wickström Oy, Orpe Kuljetus Oy, P&A Trans Oy, Veljekset Hannonen Oy, Q Team), metsäyhtiöitä (Metsä Group, Metsähallitus Metsätalous Oy, UPM-Kymmene Oyj) sekä ajoneuvodatan osalta Paetronics Oy:tä, Scania Suomi Oy:tä ja Volvo Finland Ab:tä. Raportin aineiston kokoamiseen ovat kirjoittajien lisäksi osallistuneet Ville Saksi, Antti Raatevaara, Mika Vahtila ja Pyry Seppälä.

1.2 Esillä olleet muutokset ajoneuvojen massoihin

Liikenneviraston tämän hetkisissä massojen noston tarkasteluissa on käytetty alustavasti seuraavia painoluokkia (käytettäessä paripyöräperävaunuja vain keskeisillä, hyvin rakennetuilla (pää)teillä) (Männistö 2018):

- 81,5–82 t (10 akselia)
- 87–88 t (11 akselia)
- 92,5–94 t (12 akselia).

HCT-kokeiluluvalla liikennöivistä puutavarayhdistelmistä suurin on 104-tonninen ja hakeyhdistelmistä 100-tonninen. Puukuljetusten kevyimmät HCT-yhdistelmät ovat 84-tonnisia ja niistä osa liikennöi myös metsäteillä.

[1] Ko. muutokset viedään uuteen 1.6.2020 voimaan astuvaan tieliikennelakiin.

2 TUTKITUT KULJETUSVIRRAT JA AJONEUVO-YHDISTELMÄT

2.1 Kotimaisen puutavaran ja hakkeen autokuljetukset

HCT-yhdistelmien valtakunnallisten vaikutusten arvioinnissa on käytetty vuoden 2016 suorien autokuljetusten volyymeja ja keskikuljetusmatkoja (taulukko 1). Metsäteollisuus käytti vuonna 2016 noin 43 milj. m^3 (noin 33 milj. tonnia) kotimaista, tehtaille pelkkinä autokuljetuksina toimitettua aines- ja sivutuotepuuta. Lisäksi puun rautatie- ja vesikuljetusketjuihin sisältyy keskimäärin 50 km:n alkukuljetus autolla (saaripuun kuljetusta lukuun ottamatta). Tämän kuljetusvolyymi oli 11,1 milj. m^3. Lämpö- ja voimalaitokset käyttivät 18,4 milj. m^3 kiinteitä puupolttoaineita. (Luonnonvarakeskus 2019, Metsäteollisuus ry, Strandström 2017a ja b).

Taulukko 1. Kotimaisen puun autokuljetusten määrät ja keskikuljetusmatkat vuonna 2016 (Metsäteollisuus ry, Strandström 2017a ja b, Lapp & Iikkanen 2017, Luonnonvarakeskus 2019, Tilastokeskus 2017).

	Metsäteollisuus		Lämpö- ja voimalaitokset (ml. metsäsektorin tuotantolaitosten voimalat)			
2016	**Ainespuu**	**Sivutuote**	**Metsähake**	**Kuori**	**Puru**	**Puutähdehake**
autokuljetus, 1 000 t/v	30 769,4	2 300,4	1 912,9	2 389,1	703,1	337,9
autokuljetus, 1 000 m^3/v	35 804,8	7 274,5	7 022,0	7 351,0	2 489,0	1 125,0
ka. kuljetusmatka autolla, km	105	105	64	64	64	64

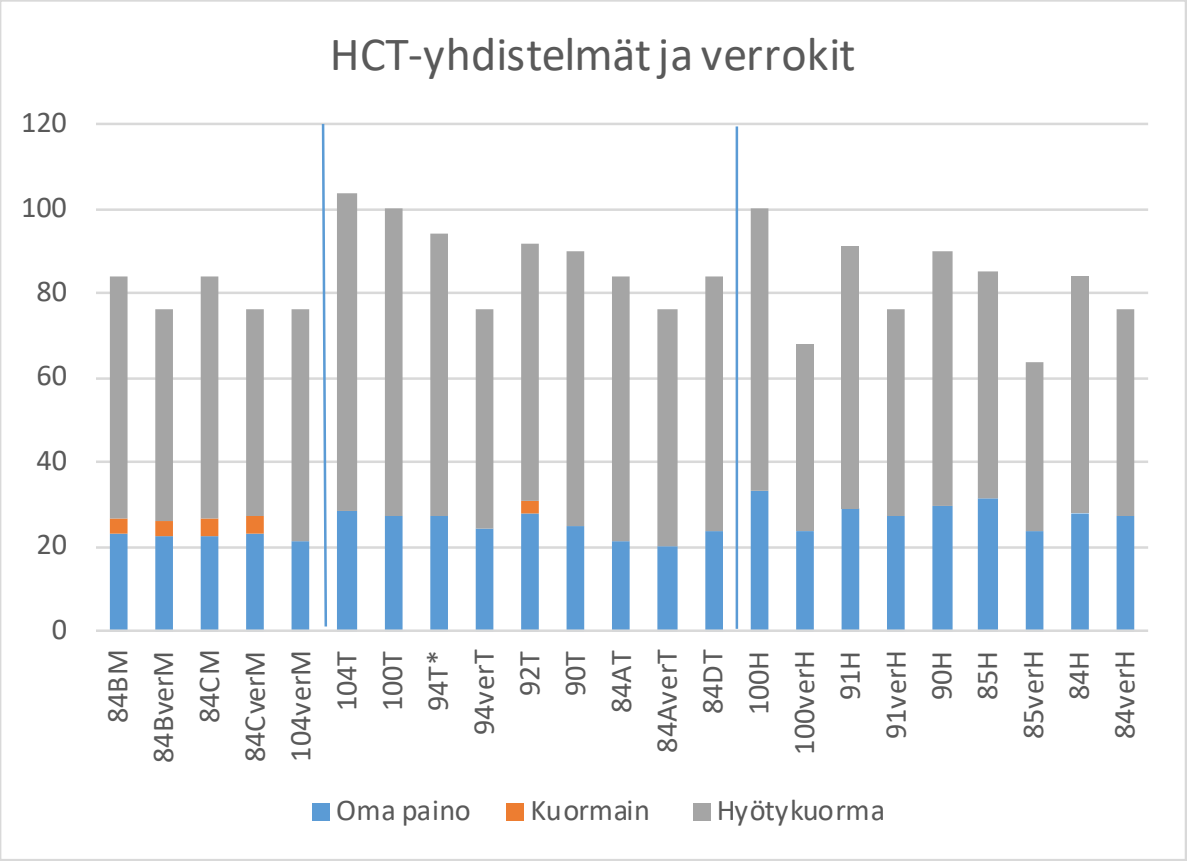
Metsäteollisuuden osalta vain kotimaisen puun kuljetusmäärät. Sivutuotevolyymi sisältää myös tuotantointegraattien sisäisen sivutuotteen käytön.
Energiapuuhakkeen autokuljetusmäärä = kokonaiskäyttömäärä – käyttöpaikassa haketetun puun määrä – arvio tuontihakkeesta vuodelta 2015.

Puukuljetusten lisäksi merkittäviä metsäsektorin autokuljetusvolyymeja muodostavat tuotekuljetukset[2] (ks. WSP Finland Oy 2017) ja muut raaka-ainekuljetukset (esim. erilaiset kemikaalit).

2.2 Tutkitut HCT- ja verrokkiyhdistelmät

Raportissa esitettyihin tutkimuksiin osallistuneiden puutavaran ja hakkeen HCT- ja verrokkiyhdistelmien painot on esitetty kuvassa 1 ja muut ominaisuudet pituuden noston vaikutuksia koskevassa raportissa (Venäläinen 2019). Osa yhdistelmistä ajaa vain terminaalien välillä, jolloin ne voidaan rakentaa metsäautoja kevyempirakenteisiksi eikä niissä ole omaa kuormainta mukana. Raportissa terminaaliajoa ajavat yhdistelmät on merkitty T-merkinnällä, metsäautot M-merkinnällä ja sivutuotehakeyhdistelmät H-merkinnällä. Energiapuuyhdistelmillä ei ole HCT-kokeilulupia.

[2] Kemiallisen metsäteollisuuden koko tuotantomäärä vuonna 2017 oli 18,0 milj. tonnia ja mekaanisen metsäteollisuuden 13,2 milj. m^3 (Metsäteollisuus ry). Tuotteiden kotimaan kuljetusosuuksiin hyödynnetään autokuljetusten lisäksi merkittävästi junakuljetuksia.



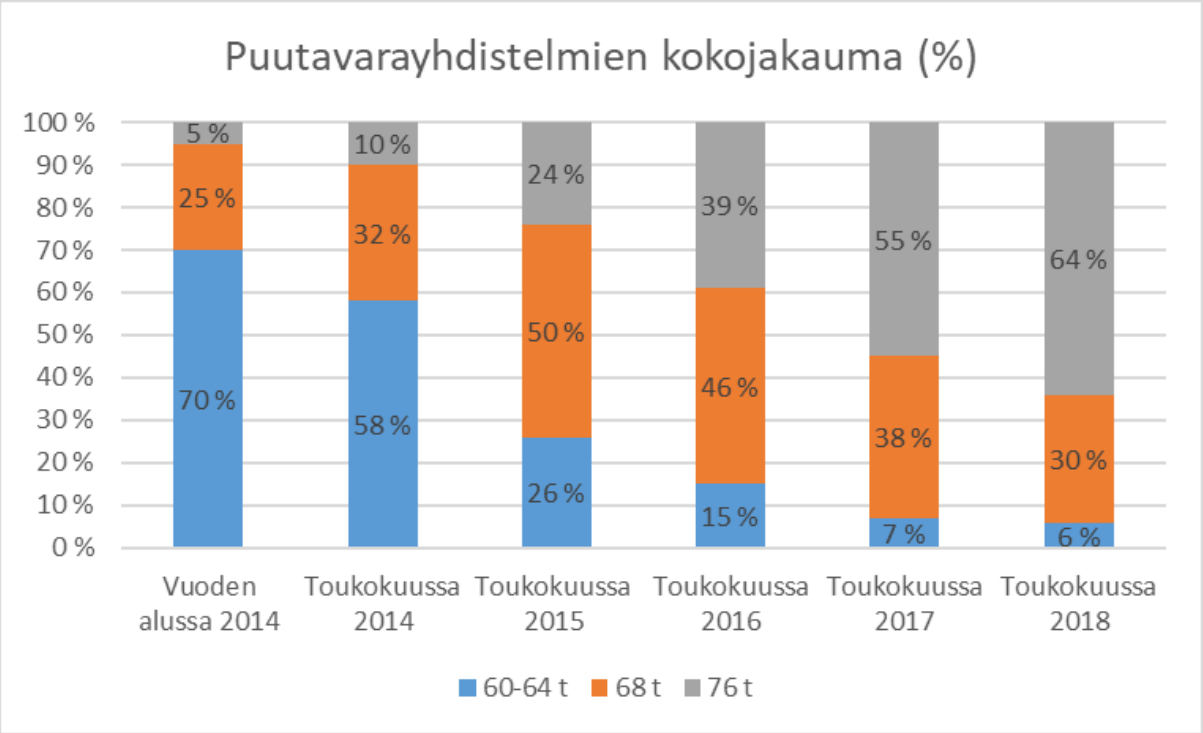
Kuva 1. Tutkittujen HCT- ja verrokkiyhdistelmien omat ja kokonaispainot.
**Suunniteltu kokonaispaino 100 tonnia
M = metsäauto, T = terminaaliauto, H = hakeauto, ver = verrokkiauto
Metsäautot, joille ei ole merkitty kuormaimen painoa, ajavat pääosin ilman kuormainta

Saman tyyppisistä ajoneuvoyhdistelmistä muodostettiin vertailuita varten ns. tyyppiyhdistelmiä:

- 76-tonniset metsäautot (omapaino 22,5 t ja kuormain 4 t)
- 76-tonniset terminaaliautot (omapaino 21,2 t)
- 76-tonniset hakeautot (omapaino 26,5 t)
- 84-tonniset metsäautot (omapaino 23 t ja kuormain 4t).

Orpen HCT-yhdistelmän suunniteltu kokonaispaino on 100 tonnia, mutta aluksi sallittu kokonaispaino HCT-kokeilussa oli vain 94 tonnia. Tämän vuoksi ko. yhdistelmän tämänhetkisissä laskelmissa omapainona on käytetty 25,0 tonnia yhdistelmän oikean omapainon (26,9 tonnia) sijasta (yhdistelmä on tällöin merkitty *-merkillä).

Verrokkeina laskelmissa käytettiin HCT-yhdistelmien kanssa samoilla reiteillä tai vähintään samoilla alueilla ajavia, pääosin 76-tonnisia yhdistelmiä. 76-tonniset ovat nykytilan osalta parhaita vertailukohteita, koska ne kattavat nykyisin suurimman osan kotimaisen puutavaran autokuljetuksista (kuva 2).

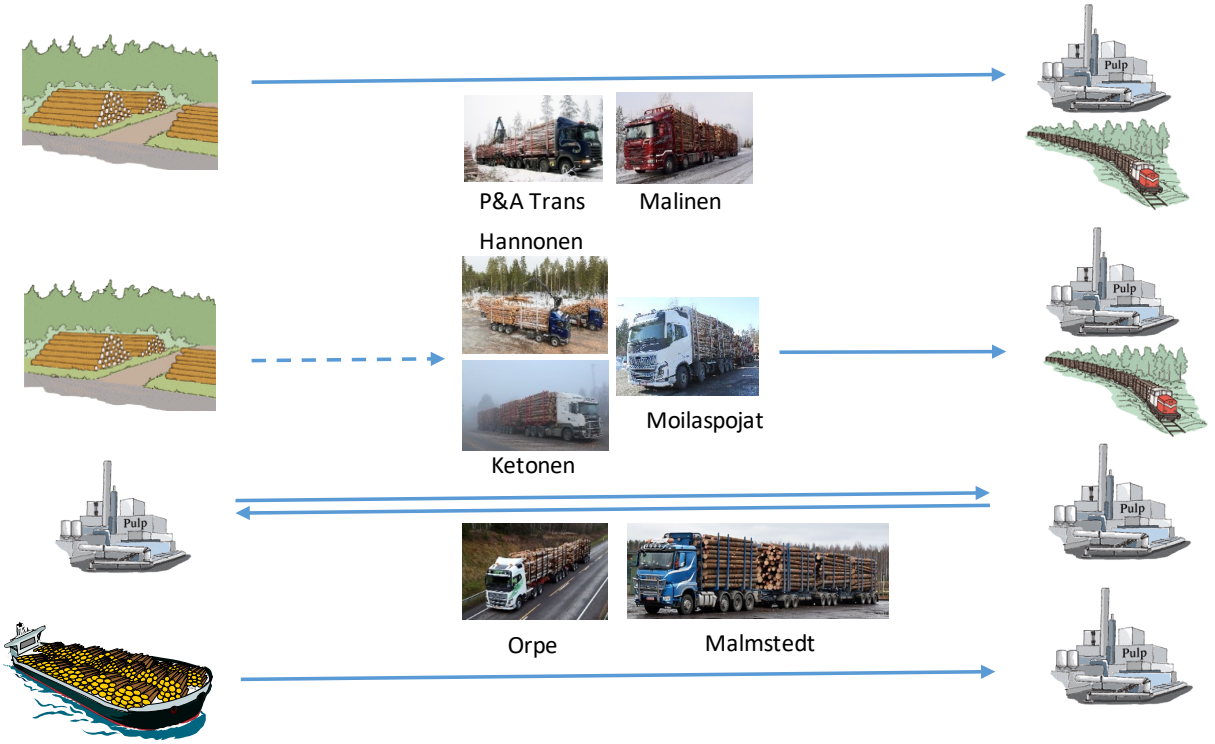


Kuva 2. Puutavarayhdistelmien kokorakenteen kehitys Metsäteho Oy:n valituille metsäyhtiöille lähettämän kyselyn mukaan.

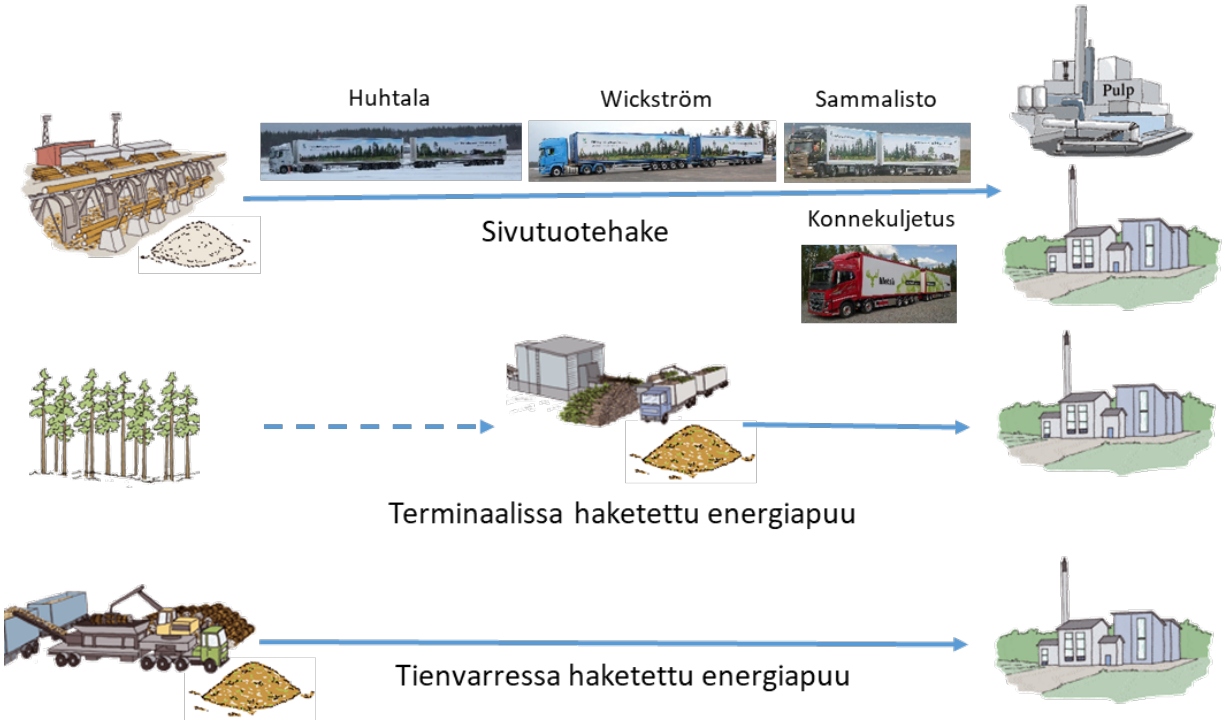
Selvityksessä on tarkasteltu vain niitä yhdistelmäratkaisuita, joita HCT-kokeilussa on ollut mukana. Liitteessä 3 on lisäksi esitelty HCT-yhdistelmäkonseptia, jossa käytetään vain yhtä perävaunutyyppiä ja apuvaunua. Puoliperävaunun takimmaiset karikat voidaan kaataa tai siirtää eteenpäin niin, että vetopöytä saadaan tarvittaessa esiin, ja puoliperävaunu muuttuu linkkivaunuksi. Dollya käyttäen perävaunu muuntuu varsinaiseksi perävaunuksi ja voidaan silloin kytkeä kuorma-auton tai vetokidallisen puoliperävaunun perään. Näin yhdestä perävaunutyypistä voidaan koostaa ainakin viisi erilaista, 3–6 täyspitkän puutavaranipun ajoneuvoyhdistelmää. Ko. ratkaisu parantaisi HCT-kuljetusten hyödyntämisen joustavuutta erilaisilla HCT-reiteillä.

Yhdistelmien kuljetusketjut

Osassa kuljetuskustannus- ja polttoaineen kulutustarkasteluita on vertailtu yksittäisten yhdistelmien sijasta kokonaisia kuljetusketjuja. Suurimmat HCT-yhdistelmät vaativat alkukuljetuksen metsäautolla, joten niiden vertailuissa koko ketju on otettava huomioon. HCT-kokeiluluvan saaneiden puutavara- ja hakeyhdistelmien kuljetusketjuja on esitetty kuvissa 3 ja 4. Orpen, Sammaliston, Konnekuljetuksen ja Malmstedtin HCT- ja verrokkiyhdistelmät ajavat paljon meno-paluukuljetuksia. Muiden kuljetusyritysten HCT-yhdistelmät ja verrokit ajavat ns. perinteisiä kuljetuksia (kuormattuna meno ja pääosin tyhjä paluu). Konnekuljetuksen yhdistelmä ajaa hakkeen lisäksi myös sellupaaleja. Metsäenergiapuun kuljetuksissa ei ole tällä hetkellä HCT-yhdistelmiä, mutta Konnekuljetus toimittaa sivutuotteena syntyvää kuorta ja purua energialaitoksille.



Kuva 3. HCT-puutavarayhdistelmien kuljetusketjuja. (Kuvat: Kari Malmstedt Oy, Metsähallitus Metsätalous Oy, Metsä Group, Metsäteho Oy, Orpe Kuljetus Oy).

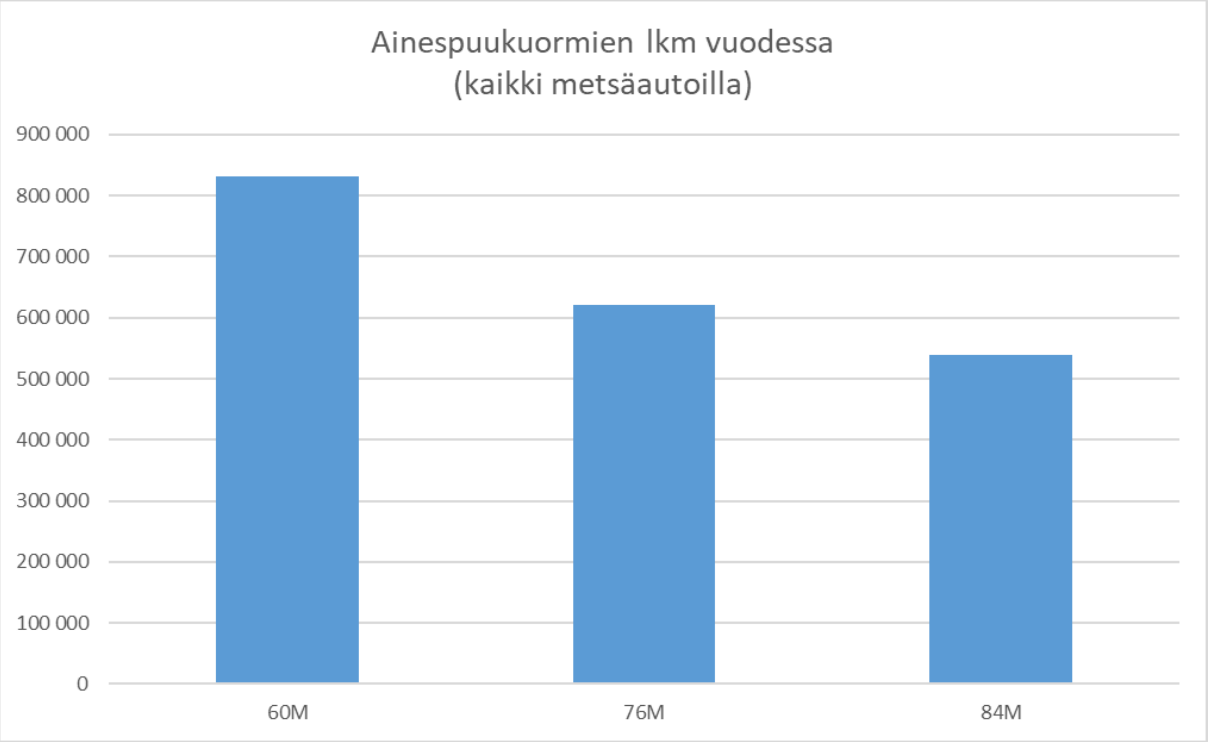


Kuva 4. HCT-hakeyhdistelmien kuljetusketjuja. (Kuvat: Koneurakointi Aki Sammalisto Oy, Metsä Group, Metsäteho Oy).

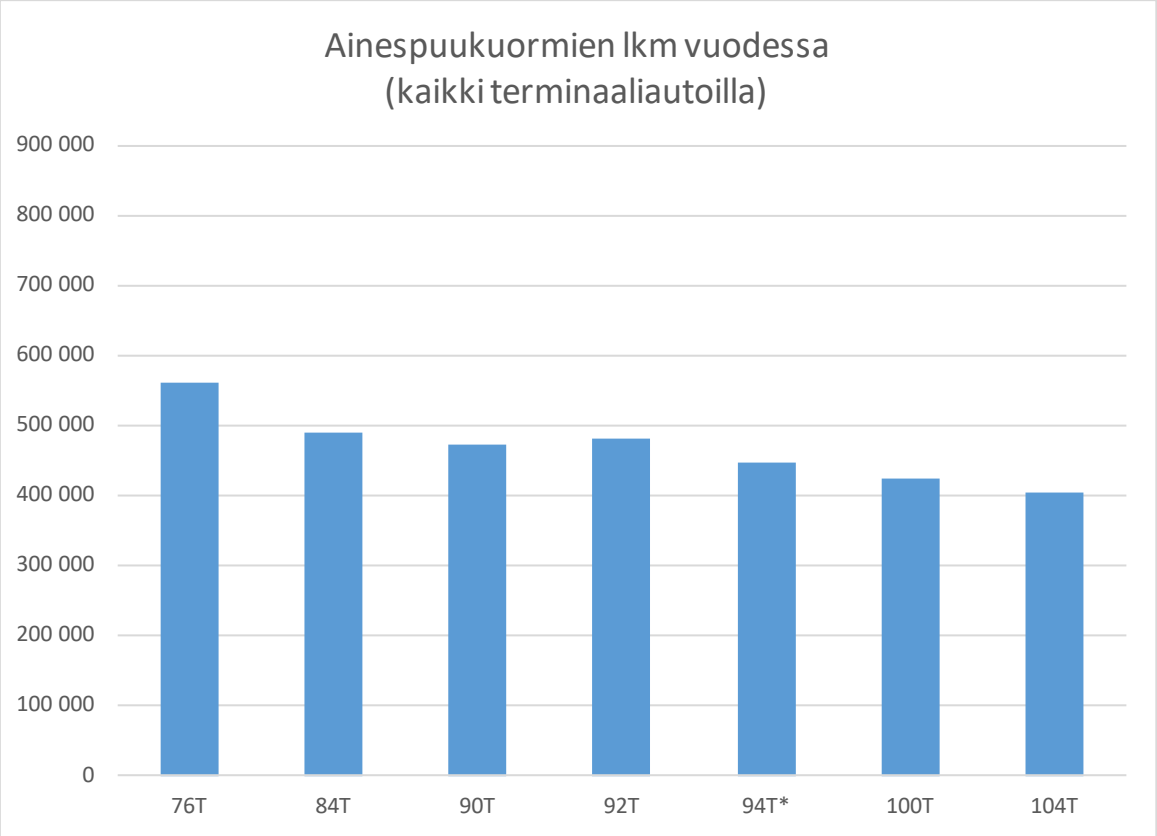
3 YHDISTELMIEN MASSOJEN NOSTON VAIKUTUKSIA

3.1 Ajojen määrä

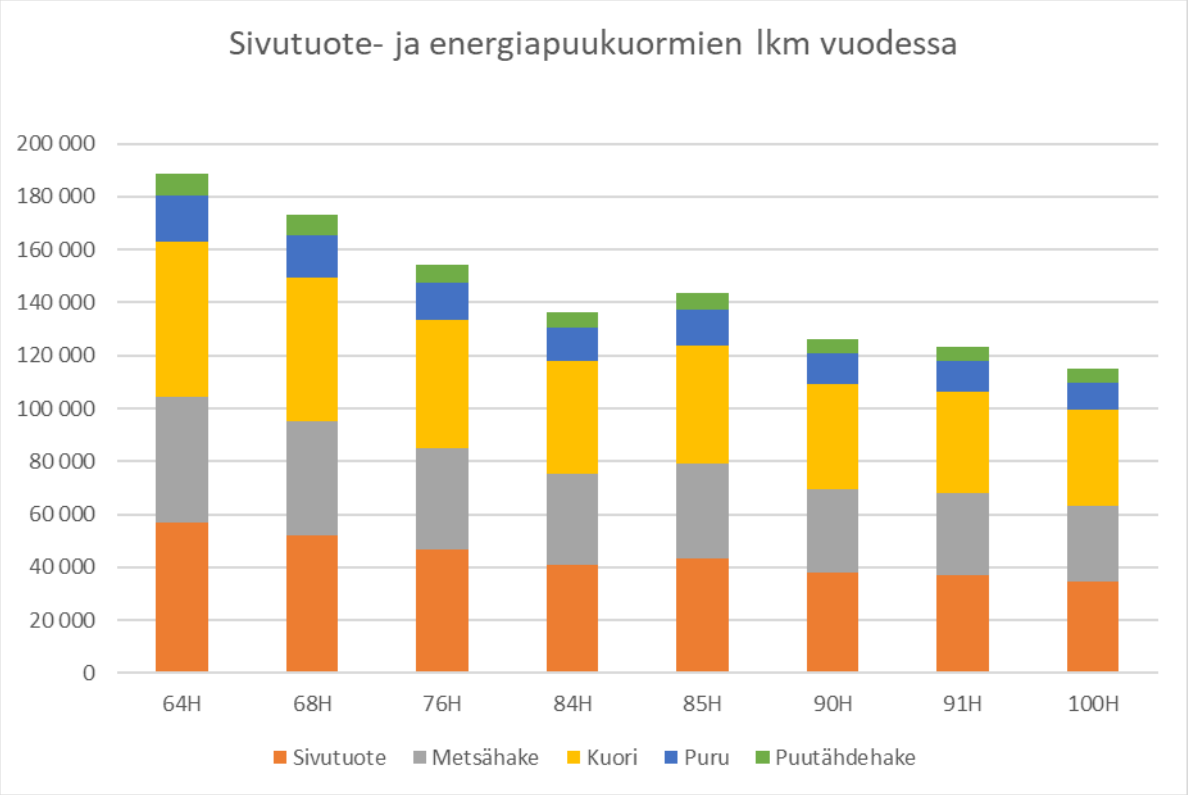
Valtakunnallisissa vertailuissa oletettiin taulukon 1 mukaiset kuljetusvolyymit, ja että menokuljetus on aina täynnä ja paluukuljetus on tyhjä. Lisäksi oletettiin, että kaikki kotimainen puu kuljetettaisiin ko. kokoluokan yhdistelmillä Ajoneuvoyhdistelmien kokoluokan kasvaessa tarvittavien kuormien määrä vähenee, mikä vähentää kuljetuskustannuksia, polttoaineen kulutusta kuljetettua tonnia kohden ja ruuhkia varsinkin toimituskohteiden lähellä sekä pienentää liikenneonnettomuuksien riskiä. 84-tonnisilla metsäautoilla vähennettäisiin vuosittaisten ajojen määrää yli 80 000:lla 76-tonnisiin verrattuna (kuva 5). HCT-kokeiluissa mukana olevat terminaaliautot vähentäisivät puolestaan vuosittaisten ajojen määrää 71 000–157 000:lla (kuva 6). HCT-hakeyhdistelmät vähentäisivät kuormien määrää 76-tonnisiin nähden 18 000–39 000:lla vuodessa (kuva 7).



Kuva 5. Vuosittaisten ainespuukuormien lukumäärä, kun kaikki kotimainen autolla kuljetettava ainespuu kuljetettaisiin ko. kokoluokkien metsäautoilla (omapainoihin sisältyy 4 tonnin kuormain).



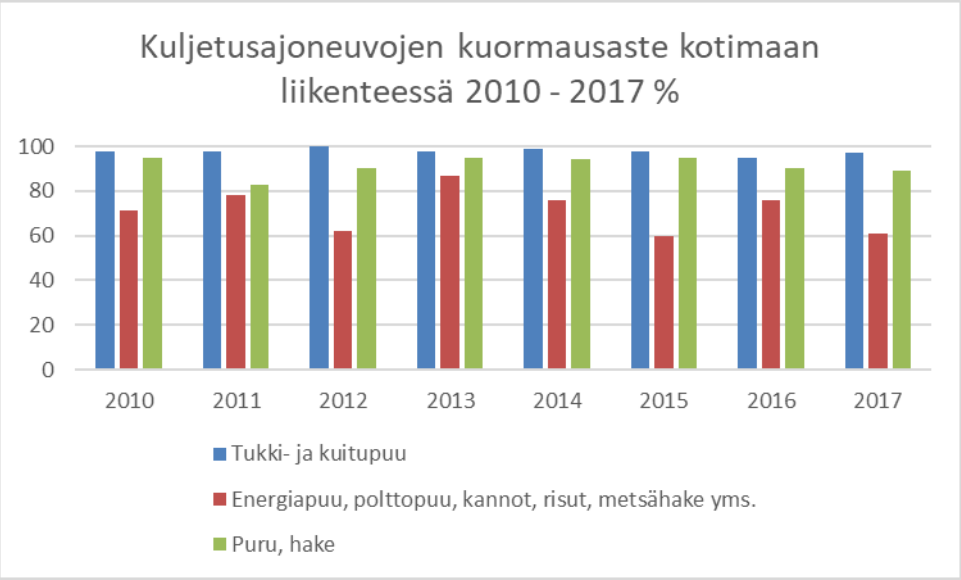
Kuva 6. Vuosittaisten ainespuukuormien lukumäärä, kun kaikki kotimainen autopuu kuljetettaisiin ko. kokoluokkien terminaaliautoilla.



Kuva 7. Vuosittaisten kuormien lukumäärä, kun kaikki kotimainen sivutuote- ja energiapuuhake kuljetettaisiin ko. kokoluokkien hakeautoilla.

3.2 Kuljetustehokkuus

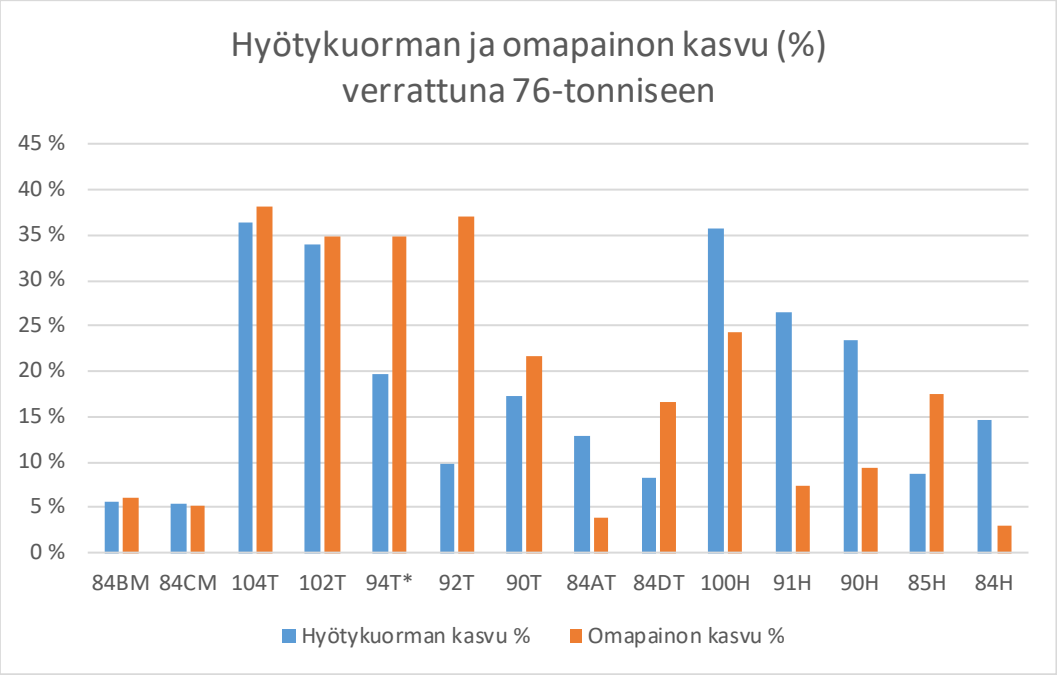
Kuljetustehokkuudella tarkoitetaan tässä puutavara- ja hakeyhdistelmien kuormatilan hyödyntämisen tehokkuutta. Kuljetuskustannuksia ja tarvittavia ajojen määrää on tarkasteltu erikseen omissa luvuissaan. Ainespuu- ja hakekuljetuksissa ajoneuvojen kuormausasteet ovat korkeita (kuva 8), joten kokonaispainoltaan isompien yhdistelmien kapasiteettia voidaan käyttää tehokkaasti.



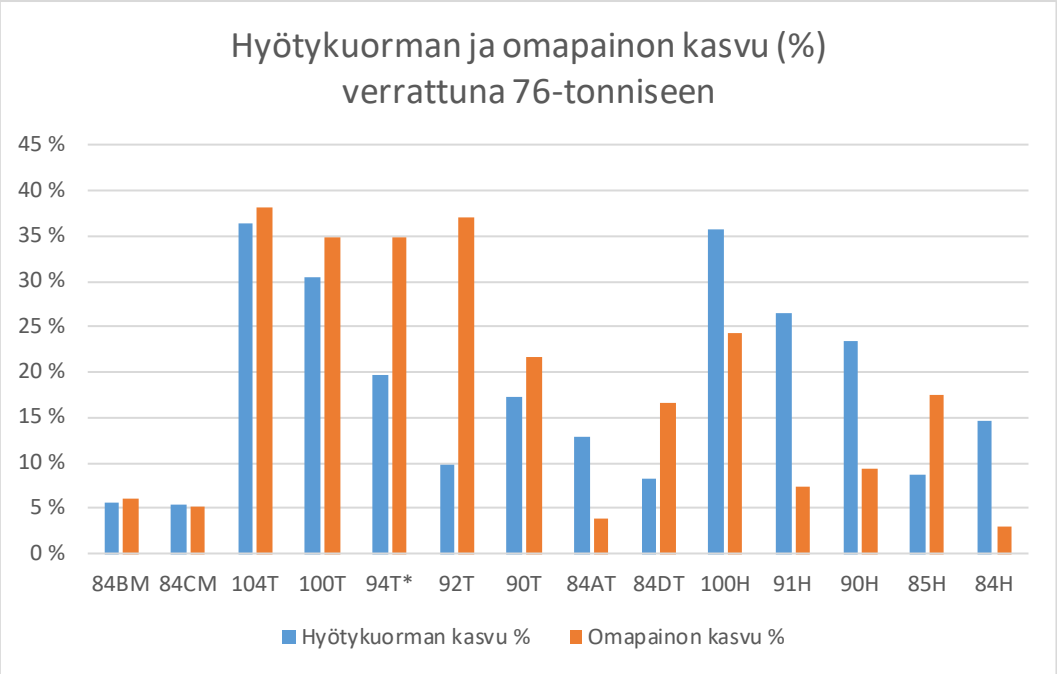
Kuva 8. Puun autokuljetusten kuormausasteet (Tilastokeskus 2019).

Ajoneuvojen kuormausasteeseen vaikuttavat puun tuoretiheyden vaihtelut vuodenaikojen mukaan sekä pyöreän puun eri katkontapituudet. Ajoneuvojen pituuksien vaikutuksia koskeneessa selvityksessä (Venäläinen 2019) tuotiin esille, että pelkkä pituuksien nosto ei monissa puutavaran ja hakkeen kuljetuksissa parantaisi niiden kuljetustehokkuutta.

HCT-yhdistelmillä hyötykuorman osuus kokonaispainosta on pääosin suurempi kuin niiden verrokeilla (kuva 9). Tutkituista yhdistelmistä suurin hyötykuorman osuus on 84-tonnisella terminaaliautolla (75 % kokonaispainosta). Hakeyhdistelmillä on hakkeen purkulaitteiden takia suhteessa korkeampi omapaino kuin puutavarayhdistelmillä. Pääosin HCT-yhdistelmän hyötykuorman kasvuprosentti on suurempi kuin omapainon kasvuprosentti tyyppiverrokkeihin nähden (kuva 10). Suhteellisesti suurin hyötykuorman kasvu on 91-tonnisella hakeyhdistelmällä (hyötykuorma kasvaa 27 %, kun omapaino nousee 7 %). Malisen ja P&A Transin metsäautojen hyötykuorman suhteellinen kasvu on samaa luokkaa omapainon kasvuun nähden. Puutavaran terminaaliautoista Hannosen yhdistelmällä ja hakeyhdistelmistä Sammaliston suuremmalla HCT-yhdistelmällä on suurimmat hyötykuorman kasvut suhteessa omapainon kasvuun. Eri kokoisten yhdistelmien tehokkuutta ei voi suoraan päätellä näiden laskelmien perusteella, koska kokoluokittain kokeiluissa on vain yksittäisiä yhdistelmiä. Tehokkaimmissa yhdistelmissä käytettyjä ratkaisuita kannattaa kuitenkin ottaa huomioon HCT-yhdistelmien jatkokehityksessä.



Kuva 9. Omapainojen osuus tutkimusyhdistelmien kokonaispainosta (%).



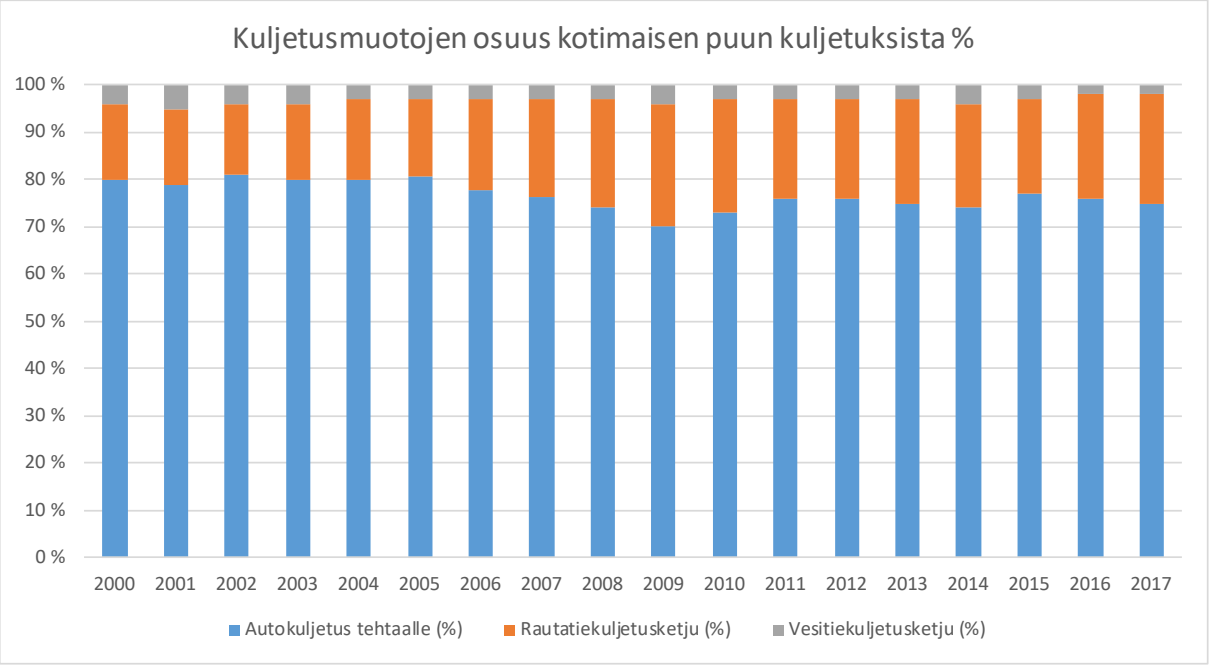
Kuva 10. Hyötykuorman ja omapainon kasvu verrattuna 76-tonniseen tyyppiyhdistelmään (nostureiden painoja ei ole otettu huomioon).

3.3 Vaikutus rautatiekuljetusten käyttöön

Liikenneviraston tutkimuksessa (Lapp & Iikkanen 2017) selvitettiin HCT-kuljetusten potentiaalia eri tavaralajien kuljetuksissa sekä HCT-kuljetusten vaikutuksia rautatiekuljetusten käyttöön. Raakapuun osalta tarkastelussa oli mukana vain 84-tonniset yhdistelmät. Niiden arvioidaan vähentävän rautatiekuljetuksia varsinkin yhteysväleillä, joilla suoraa ratayhteyttä ei ole (esimerkiksi Etelä-Pohjanmaalta ja Pohjanmaalta Raumalle, Keski-Suomesta Alholmaan sekä Varsinais-Suomesta Kymenlaaksoon). Raakapuun rautatiekuljetusten arvioidaan vähentyvän

5–7 % HCT-yhdistelmien käyttöalueen laajuudesta riippuen. Siirtymäpotentiaalia pienentänee kuitenkin rautatiekuljetusten oman kilpailukyvyn parantuminen. Haketta kuljetetaan junalla vain 0,2–0,3 milj. tonnia vuodessa. Selvityksen mukaan HCT-ajoneuvoilla arvioidaan olevan suuri käyttöpotentiaali hakekuljetuksissa.

Edellinen ajoneuvomassojen korotus vuonna 2013 ei aiheuttanut muutosta rautatiekuljetusten osuuteen puukuljetuksissa (kuva 11). Vesikuljetusten osuus on pienentynyt lähinnä uiton vähentymisen takia.



Kuva 11. Kuljetusmuotojen osuus kotimaisen puun kuljetuksista 2000–2017 (% kuljetetuista kuutioista vuodessa) (Metsäteho Oy lähteessä Luonnonvarakeskus 2019).

3.4 Kuljetuskustannukset

Kuljetuskustannuksia verrattiin ensin yksittäisten yhdistelmäkokojen ja kuljetusketjujen välillä. Lisäksi arvioitiin HCT-yhdistelmien vaikutusta valtakunnallisiin puu- ja hakekuljetusten kustannuksiin.

3.4.1 Kuljetusten kustannustekijät ja tietojen keruu

Kustannuslaskelmien laatimista varten tutkituista HCT- ja verrokkiyhdistelmistä kerättiin:

- ajokohtaiset kuorma- ja reittitiedot (joko kuljetuksen antajalta tai kuljetusyritykseltä)
- ajokohtaiset polttoaineen kulutuksen ja ajonopeuden tiedot (ajoneuvojen hallintajärjestelmistä) (ks. tarkemmin luku 3.6.1)
- ajoneuvojen kiinteät kustannukset ja tekniset tiedot (kuljetusyritysten täyttämät lomakkeet)
- ajoneuvon lastauksen ja purun aikamenekkitietoja (kuljettajien toteuttama seuranta).

Vuoden 2019 aikana kustannustietoja päivitetään koskien ainakin:

- vuoden 2018 aikana kokeiluluvan saaneita yhdistelmiä
- tarkennettuja huolto- ja korjauskustannuksia.

Kustannuslaskelmien keskeiset tekijät on koottu taulukkoon 2 ja keskeiset oletukset taulukkoon 3. Eri yhdistelmien vertailtavuuden parantamiseksi laskelmissa käytettiin osin yhteisiä kustannusoletuksia (esimerkiksi korkotaso, työkustannukset per tunti, kuormattuna ajon osuus tai ajanmenekit per m^3). Kustannusvertailun tavoitteena oli verrata nimenomaan yhdistelmän koosta syntyviä kustannuseroja ja minimoida muiden tekijöiden vaikutusta vertailutuloksiin. Laskelmiin lisättiin myös esimerkkejä tilanteista, joita tutkituilla yhdistelmillä ei ole käytössä. Laskelmissa 76-tonnisina vertailukohteina on käytetty vain yhden omapainoluokan yhdistelmiä (ks. luku 2.2). Tutkimusyhdistelmien verrokkeina on osin omapainoltaan näitä suurempia yhdistelmiä, joihin verrattuna kustannussäästö olisi tässä esitettyä suurempi.

Taulukko 2. Puukuljetusten kustannuslaskelmien kustannustekijät.

Puukuljetusten kustannuslaskentamalli – Keskeisimmät kustannustekijät	
Auton kustannustekijät	**Suoritetiedot**
Hankintahinta	Kuljetusmäärä
Renkaat	Ka. ajomatka
Pitoaika	Ajosuorite
Vaihtoarvo	Kuormat
Korot, vakuutukset, hallinto, korjaukset ja ylläpito	
Työkustannukset	
Peruspalkka	
Palkan lisät	
Polttoaine	
Ajankäyttö	**Polttoaineen kulutus**
Ajonopeudet	Massat
Ajanmenekki	Ajovaiheiden kulutus
Kuormattuna ajo	Kuormausvaiheen kulutus
Tyhjänä ajo	Purkuvaiheen kulutus
Kuormaus ja purku	
(Siirtokuormaukset)	
Työaika	
Vuosityöaika	
Auton käyttötunnit	
Kuljettajien työtunnit	

Taulukko 3. Keskeiset kustannuslaskelmien oletukset.

Kuormat: Ei vajaakuormia, ei keräilyajoa Ainespuu: havupuu 70 %, lehtipuu 30 % Tyhjänä ajoa tasan 50 % (täysi meno ja tyhjä paluukuljetus, paitsi erillisissä menopaluulaskelmissa)	**Yhdistelmien käyttöaika**: autot täystyöllistettyjä (47 vk/v, 5 pv/vk, 24 h/pv); kuljettajien ajoaikamääräysten vaikutuksia eri kuljetusmatkoilla ei ole otettu huomioon
Alkukuljetusmatka: HCT-ketjulaskelmissa on oletettu alkukuljetusmatkaksi metsästä terminaaliin 25 km	**Korjaus- ja huoltokustannukset**: HCT-vetoautolla kustannus (s/km) 20 % matalampi, perävaunun pitoaika (km) on kolmanneksen pidempi ja rengaskerron kesto (km) n. 15 % pidempi, kun verrataan terminaaliautoa metsäautoon.
Ajonopeudet: kokonaispaino ei vaikuta ajonopeuteen, ajonopeus = F(ajomatka, ajovaihe)	
Kuormaus ja purku: Metsäautot kuormataan ja puretaan omalla kuormaimella Käyttöpaikassa autot puretaan käyttöpaikan kalustolla yli 70 km:n ajomatkoilla Terminaalissa auto joko kuormataan kokonaan maasta (100 %:n siirtokuormaus), kuormataan puoliksi ja loput kuormasta tulee valmiiksi lastattuna perävaununa (50 %) tai kuorma on valmiiksi lastattu perävaunuun ja jalkalavalle (0 %). Sivutuotehakeyhdistelmän kuormauksen kesto 32,1–43,3 min ja purun kesto 32,7–41,6 min yhdistelmän koosta riippuen.	**Kuormaus- ja purkukustannukset***:* Terminaalin ja käyttöpaikan kalustolla suoritetun kuormauksen ja purkamisen kustannus 0,30 €/m^3/käsittelykerta + auton odotuskustannus (ks. tarkemmin Poikela & Venäläinen 2017).

Edellisessä taulukossa (3) on mainittu tilanne, jossa kuorma on lastattu terminaalissa valmiiksi perävaunuun ja jalkalavalle. Tämä onnistuu vain 76- ja 84-tonnisilla yhdistelmillä. Hannosella jalkalava-asema sijaitsee yhtiön omassa terminaalissa (kuva 12). Moilaspojilla on puolestaan käytössä siirrettävä jalkalava-asema (kuva 13).

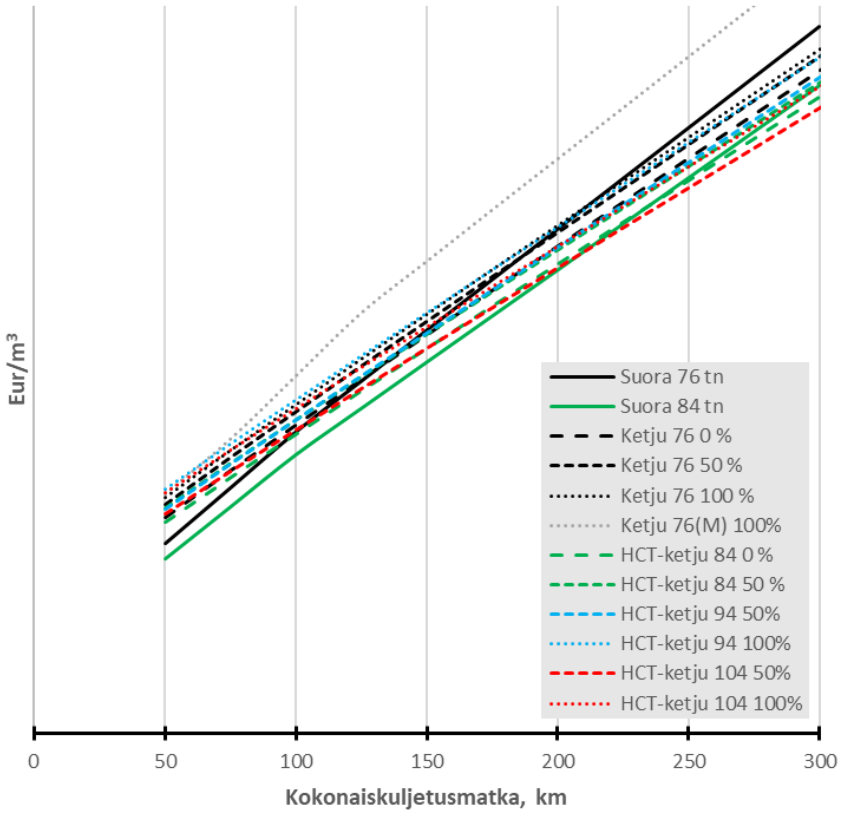
Kuva 12. Jalkalavaa kyytiin ottava HCT-auto Hannosen terminaalissa (Metsä Group).

Kuva 13. Moilaspoikien HCT-auto on jättänyt tyhjän jalkalavan terminaaliin ja ottaa kyytiin valmiiksi lastatun (Metsähallitus Metsätalous Oy).

3.4.2 Yksittäisten yhdistelmien kustannusvertailut

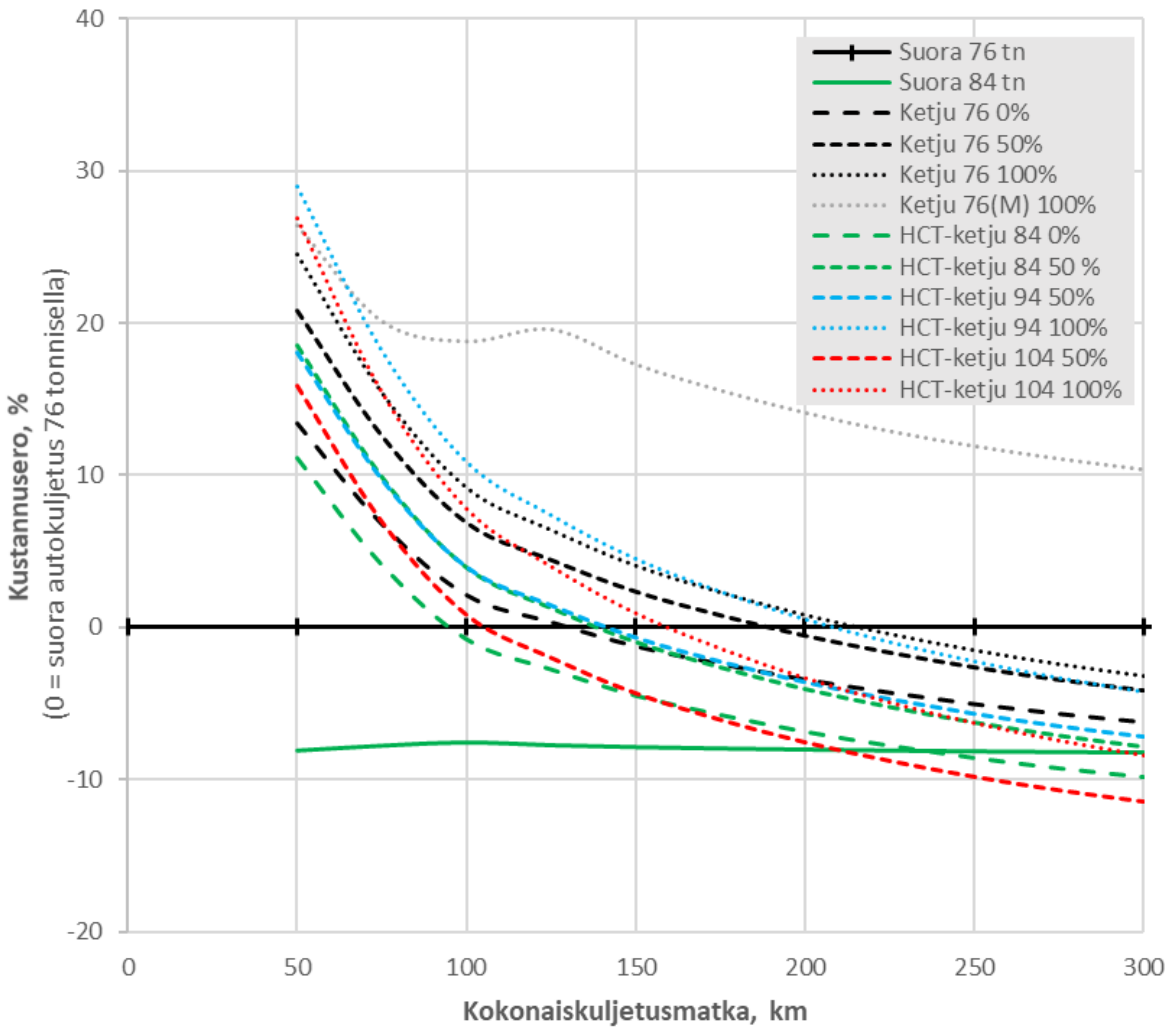
Erilaisten HCT-kuljetusketjujen sekä metsä- ja sivutuotehakeautoilla tehtyjen suorien kuljetusten kustannuksia verrattiin eri kuljetusmatkoilla (kuljetettua kuutiota kohden). Laskelmissa on mukana myös sellaisia yhdistelmäkokojen ja siirtokuormaustapojen yhdistelmiä, joita ei ole käytössä tutkituilla ajoneuvoyhdistelmillä.

Verrattaessa kustannuksia **suoriin kuljetuksiin 76-tonnisilla metsäautoilla** 84-tonninen metsäauto tuo vajaan 10 %:n kuljetuskustannussäästön (kuvat 14 ja 15). **HCT-kuljetusketjuista**[3] suurimmat säästöt (ja säästöt jo noin 100 km:n kuljetusmatkalla) tuovat kuljetukset 84-tonnisella ja 104-tonnisella terminaaliautolla (käyttäen ko. kokoluokkien tehokkainta siirtokuormaustapaa). 94-tonninen terminaaliyhdistelmä on 76-tonnisen suoraa kuljetusta kustannustehokkaampi vasta noin 150 km:n kuljetusmatkalla. Omapainon laskennallisesta korjauksesta huolimatta mm. ylimääräisen akselin vaikutusta polttoaineen kulutukseen ei ole välttämättä pystytty poistamaan.



Kuva 14. Puun kuljetusketjujen kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla (€/m³).

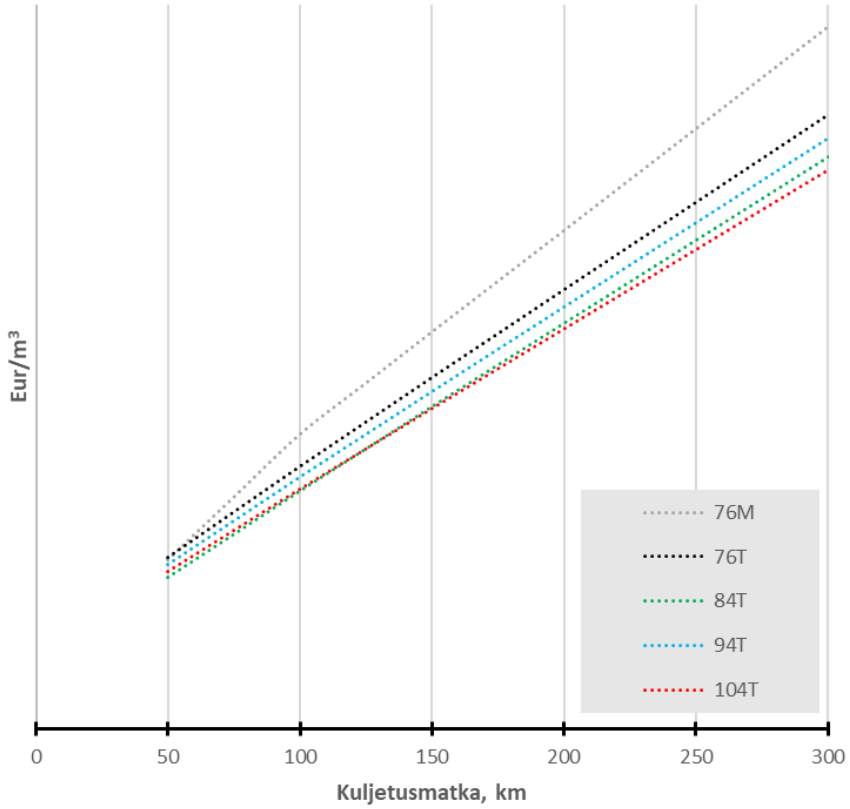
[3] Ks. eri siirtokuormaustapojen kuvaus (0 %, 50 % ja 100 %) taulukossa 3 luvussa 3.4.1



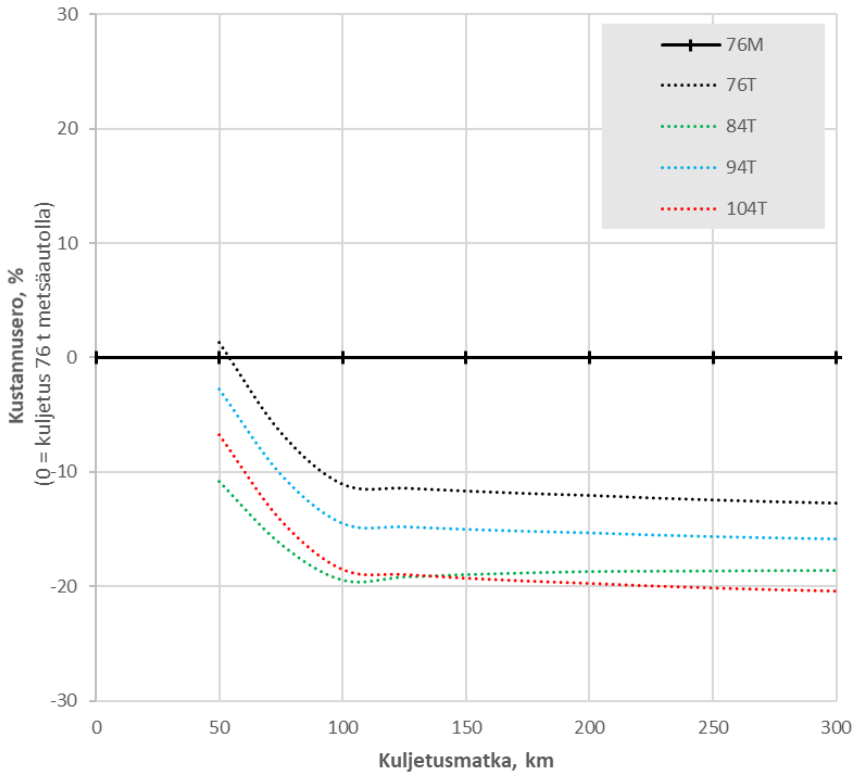
Kuva 15. Puun kuljetusketjujen kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla (erotus suoraan kuljetukseen 76-tonnisella yhdistelmällä, %).

Liitteessä 1 on verrattu HCT-kuljetusketjuja **kahdesta 76-tonnisesta muodostettuihin kuljetusketjuihin**. Siirtokuormauksia tehdään osin jo nyt yhdistelmien välillä eri syistä (esim. kelirikkovarastointi tai kuljetusyrityksen oma halu käyttää terminaalia resurssien käytön tasaajana). Terminaalivaiheesta voi olla puun kuljetusketjulle kustannus- tai toimintavarmuusetuja, joiden rahallista merkitystä on vaikea arvioida. Terminaalien erilaisia käyttötilanteita tunnistettiin Metsäteho Oy:n ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston (2017) terminaalihankkeen yhteydessä.

Kuvissa 16 ja 17 vertaillaan **pelkän terminaalien välisen ainespuukuljetuksen** kustannuksia. Esimerkiksi tehtaiden välisissä vaihtopuukuljetuksissa tai sataman ja tehtaan välisissä kuljetuksissa alkukuljetusta metsästä ei ole tarpeen ottaa huomioon. Terminaalien välisessä ajossa käytetään nykyään lähinnä metsäautoja, joten vertailukohteena on nimenomaan 76-tonninen metsäauto. HCT-yhdistelmät tuovat noin 15–20 %:n kustannussäästön per m^3 76-tonnisiiin yhdistelmiin verrattuna.

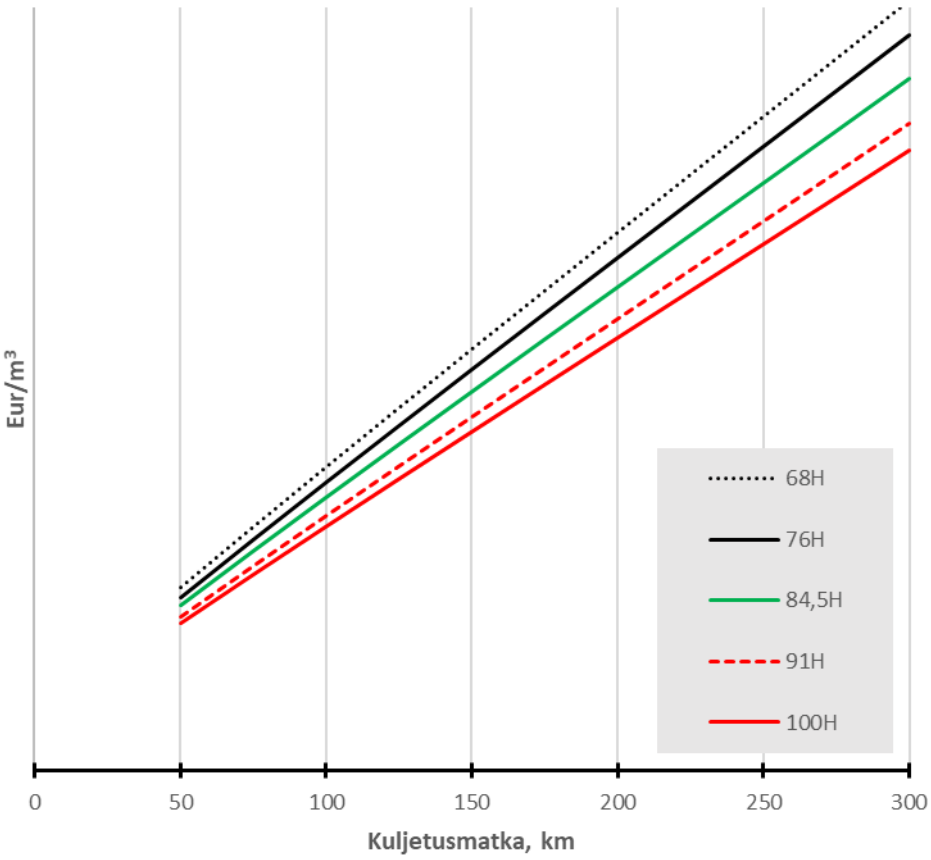


Kuva 16. Puun terminaalien välisten ajojen kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla (€/m³).

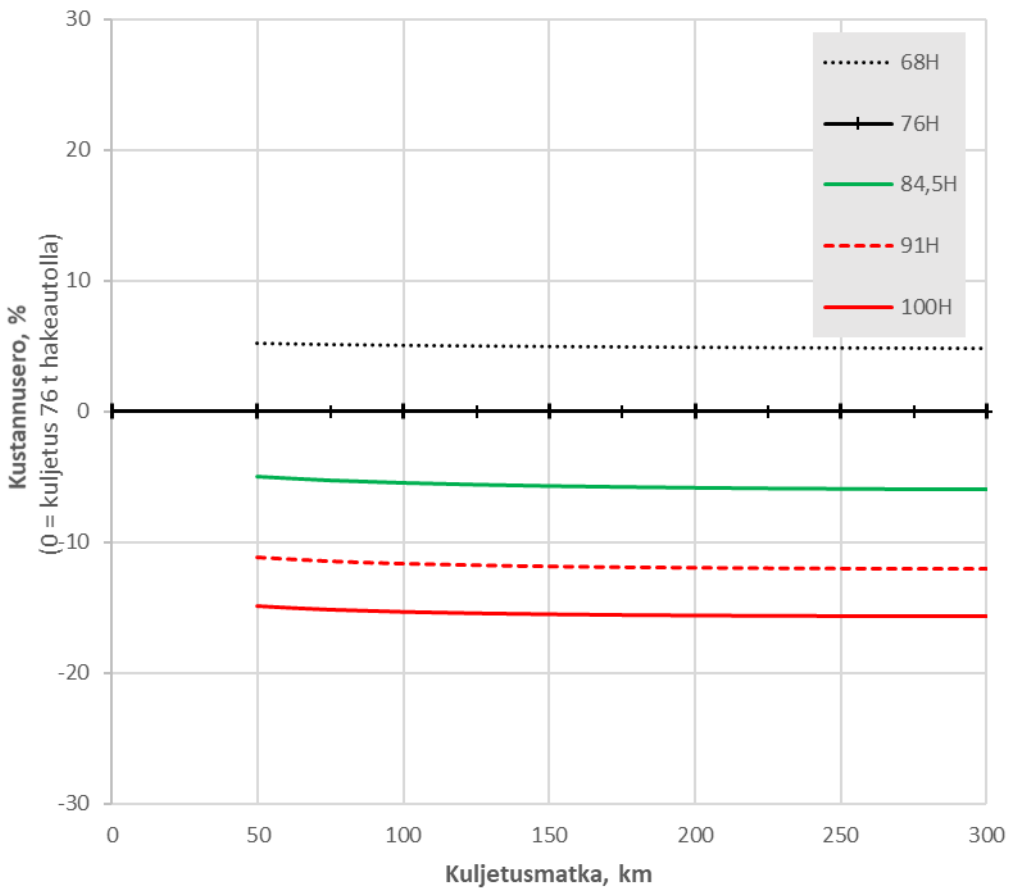


Kuva 17. Puun terminaalien välisten ajojen kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla (erotus kuljetukseen 76-tonnisella metsäautolla, %).

Sivutuotehakkeita kuljetetaan suoraan tuotantolaitosten välillä, joten niidenkään osalta ei synny siirtokuormauskustannuksia. 76-tonnisiin verrattuna HCT-yhdistelmät säästävät kuljettua kuutiota kohden noin 5–15 % kuljetusmatkasta riippumatta (kuvat 18 ja 19).

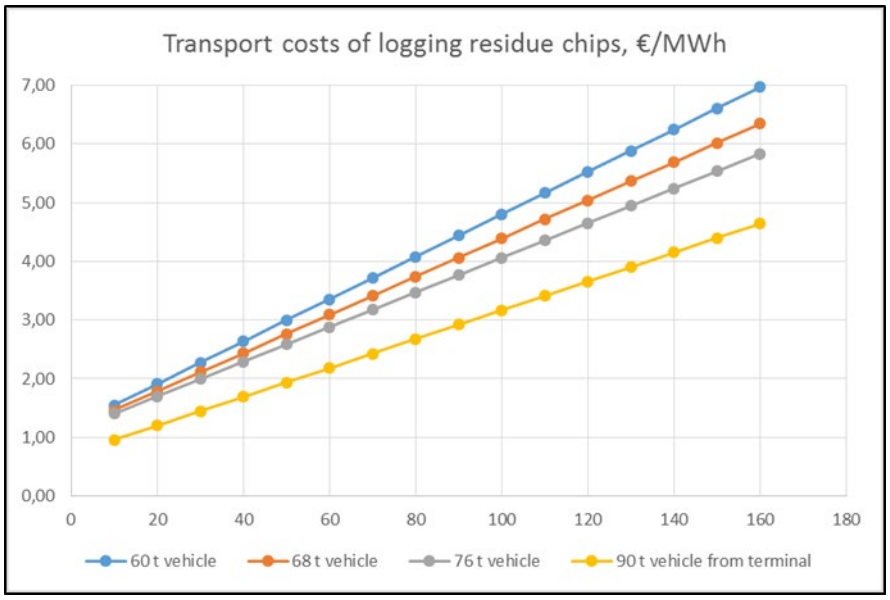


Kuva 18. Sivutuotehakekuljetusten kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla (€/m³).

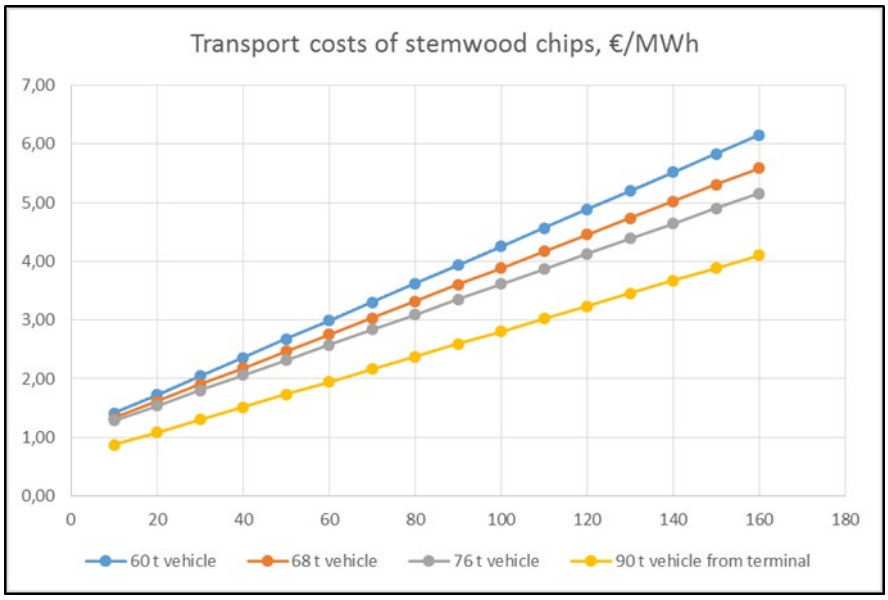


Kuva 19. Sivutuotehakekuljetusten kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla (erotus kuljetukseen 76-tonnisella hakeautolla, %).

Energiapuukuljetusten kustannusvertailuita laadittiin BEST-hankkeen yhteydessä (Korpilahti 2015) (kuvat 20 ja 21). Energiapuun matalan tiheyden takia HCT-yhdistelmät sopivat parhaiten hakkeen ja rankapuun kuljetuksiin. Helsingin yliopistolla käynnistyneessä opinnäytetyössä tarkastellaan 76-tonnisten ja yli 25-metristen yhdistelmien soveltuvuutta hakettamattoman energiapuun kuljetuksiin. Energiapuusta 30 % haketetaan nykyisin terminaaleissa, ja terminaalihaketuksen osuus on ollut kasvussa (Strandström 2017a). Isotkin HCT-yhdistelmät sopivat terminaaleista lähtevän hakkeen kuljetuksiin. Koska terminaalihaketuksella on hakkeen laatua ja toimitusvarmuutta parantavia vaikutuksia, terminaalin kautta ajo ei tuo HCT-yhdistelmälle laskettavia lisäkustannuksia. Metsäteiden kääntöpaikat saattavat tuoda haasteita ajoneuvokoon kasvattamiselle tienvarsihakkeen kuljetuksissa (Strandström 2018).



Kuva 20. Hakkuutähdehakkeen kuljetuskustannukset eri kuljetusmatkoilla (90-tonnisen osalta terminaalista kuljetettuna) (Korpilahti 2015).

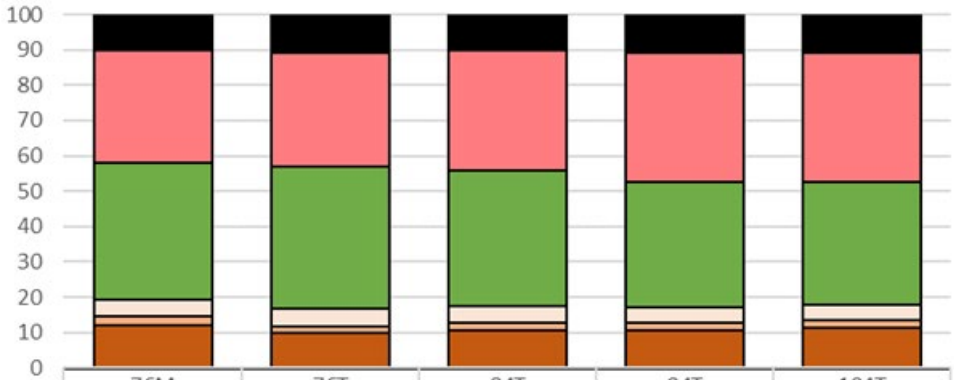


Kuva 21. Rankapuuhakkeen kuljetuskustannukset eri kuljetusmatkoilla (90-tonnisen osalta terminaalista kuljetettuna) (Korpilahti 2015).

HCT-yhdistelmistä Orpella on tuotantolaitosten välisten vaihtopuiden **meno-paluukuljetuksia** (mepa), Sammalistolla sivutuotehakkeen mepaa ja Konnekuljetuksella sivutuote- ja energiahakkeen sekä sellupaalien mepaa. Meno-paluukuljetuksilla voidaan vähentää tyhjänä ajoa ja siten entisestään parantaa HCT-yhdistelmien tuomaa tehokkuushyötyä.

Kuvassa 22 on vertailtu eri kokoisten yhdistelmien **kustannusrakennetta** vuositasolla. Kullakin yhdistelmällä kuljettajien yhteenlaskettu vuosityömäärä on sama, mutta vuositason kuormamäärä kasvaa ajoneuvokoon mukaisesti. Yhdistelmäkoon kasvaessa kaluston poisto-, korko- ja polttoainekustannusten osuus yksittäisen yhdistelmän vuosikustannuksista kasvaa. Tällöin palkkakustannusten osuus kokonaiskustannuksista laskee, vaikka absoluuttisesti ne

ovat kullakin yhdistelmällä samat. Korjaus-, huolto- ja rengaskustannusten kehityksessä ei havaittu tutkimusaineiston pohjalta selvää suuntaa (kehityksestä on tavoitteena käynnistää erillinen selvitys vuoden 2019 alussa).



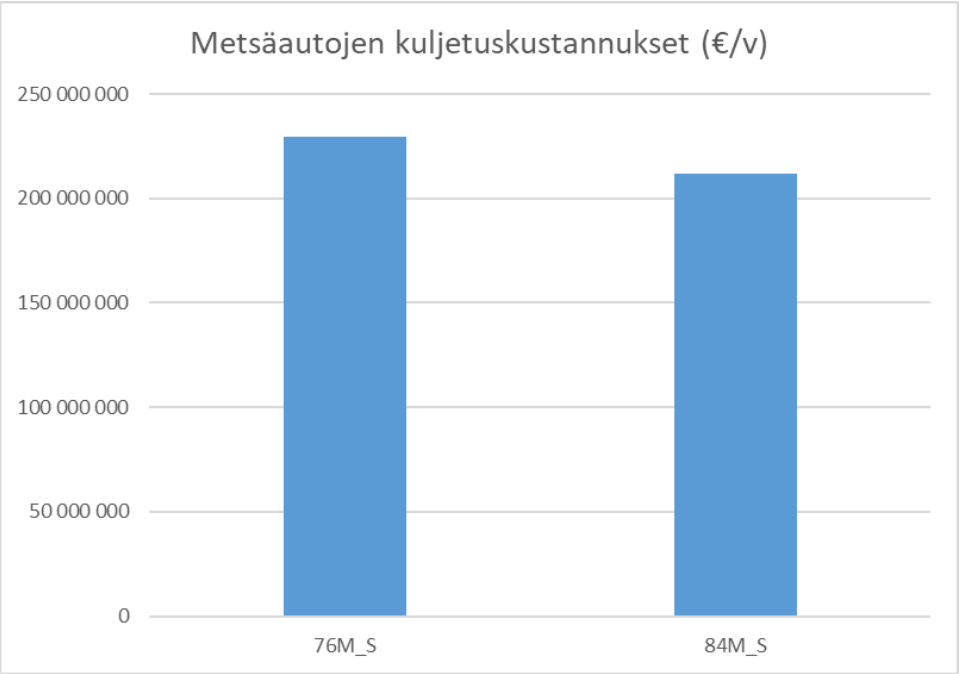
	76M	76T	84T	94T	104T
VUOSISUOR., m³	67500	75800	83500	89800	96500
K&H&R	10,1	10,9	10,2	11,0	10,9
Polttoaine	32,0	32,2	34,2	36,3	36,4
Työvoimakust.	38,7	40,2	38,3	35,5	34,9
Muut kiinteät	4,7	4,9	4,6	4,3	4,2
Korot	2,4	1,9	2,1	2,2	2,3
Poistot	12,2	9,9	10,7	10,8	11,3

Kuva 22. Kuljetusten vuosikustannusrakenteet (% vuosikustannuksista) eri kokoisilla puutavarayhdistelmillä.
K&H&R = Korjaus-, huolto- ja rengaskustannukset
Terminaaliautojen lastaus- ja purkuajat eivät sisälly kustannuksiin. Metsäautoilla kuormaus omalla kuormaimella sisältyy.

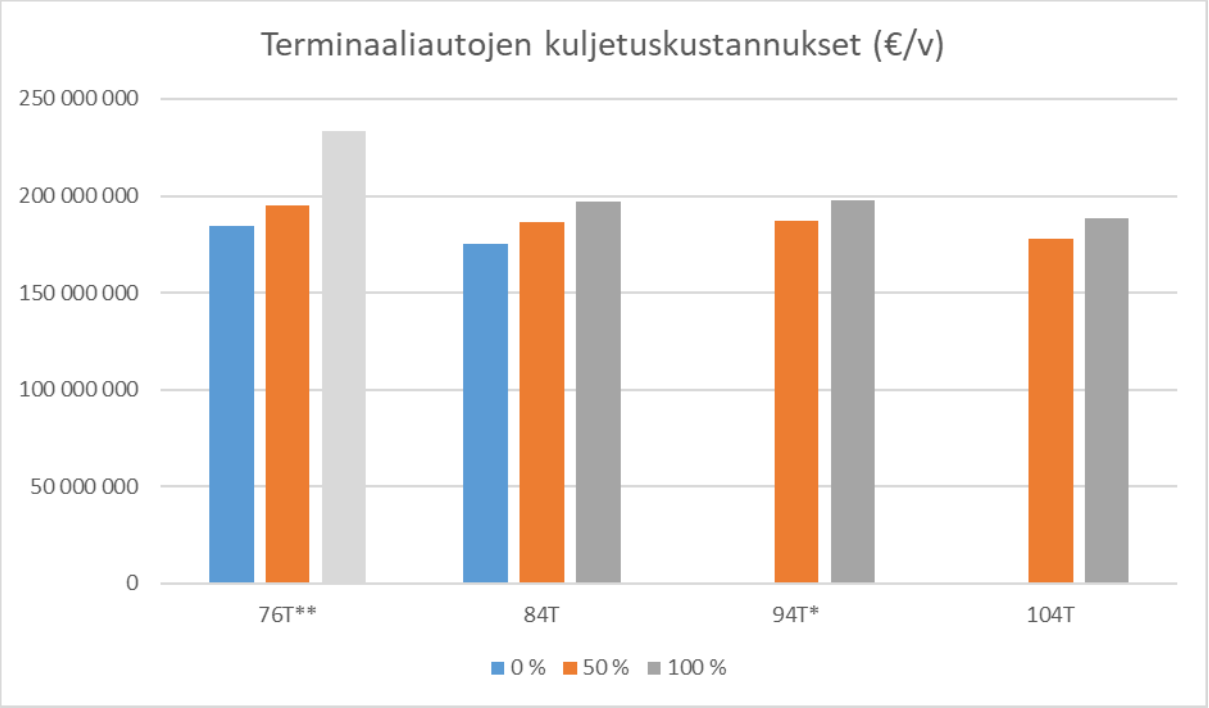
3.4.3 Valtakunnalliset kustannuslaskelmat

Valtakunnalliset kustannuslaskelmat perustuvat luvun 2.1 kuljetusvolyymeihin ja keskimääräisiin kuljetusmatkoihin. Laskelmissa on oletettu, että kaikki kuljetukset hoidetaan ko. kokoisella kalustolla. Laskelmissa ei ole otettu huomioon, että HCT-yhdistelmät ovat taloudellisempia keskimääräistä pidemmillä kuljetusmatkoilla.

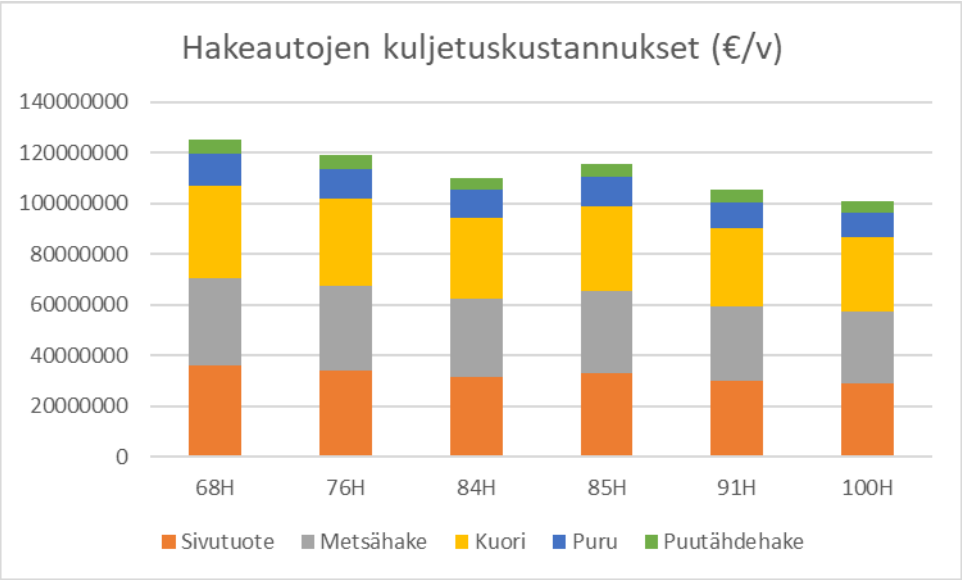
Suorissa metsästä tehtaalle kuljetuksissa 84-tonniset HCT-yhdistelmät voivat tuoda yli 18 milj. euron vuosittaisen kustannussäästön (kuva 23). Terminaaliyhdistelmille ei laskettu tässä alkukuljetuskustannusta, vaan oletettiin että se on kaikilla yhdistelmillä sama. HCT-terminaaliyhdistelmät tuovat vuosittain 8–45 milj. euron säästöt (kuva 24). Hakkeen kuljetuksissa HCT-yhdistelmillä voidaan saavuttaa vuosittain 3,5–18,0 miljoonan euron säästöt 76-tonnisiin yhdistelmiin verrattuna (kuva 25).



Kuva 23. Valtakunnalliset pyöreän puun kuljetuskustannukset kalustokoon mukaan (€/v, suora kuljetus metsäautoilla tehtaalle, kuormain 4 t sisältyy omapainoon).



*Kuva 24. Valtakunnalliset pyöreän puun kuljetuskustannukset kalustokoon mukaan (€/v, terminaaliautot). Prosenttiluku kuvaa terminaalissa maan kautta kulkevan puukuorman osuutta. **76-tonnisen 100 %:n tapauksessa käytetty metsäautoa terminaaliauton sijasta (oletettu tässä, ettei kuljetusyrityksillä ole välttämättä aina kevyempiä terminaaliautoja käytössä)*



Kuva 25. Valtakunnalliset hakkeen kuljetuskustannukset kalustokoon mukaan (€/v, hakeautot, 75 km:n keskikuljetusmatka).

3.5 Ajoneuvojen kestävyys

Yhdistelmän koon kasvaminen lisää ajoneuvojen eri osien rasitusta. Rasitustasojen luotettavampi arvioiminen vaatisi yhdistelmien vielä pidempää ja useampaa yhdistelmää koskevaa seurantaa.

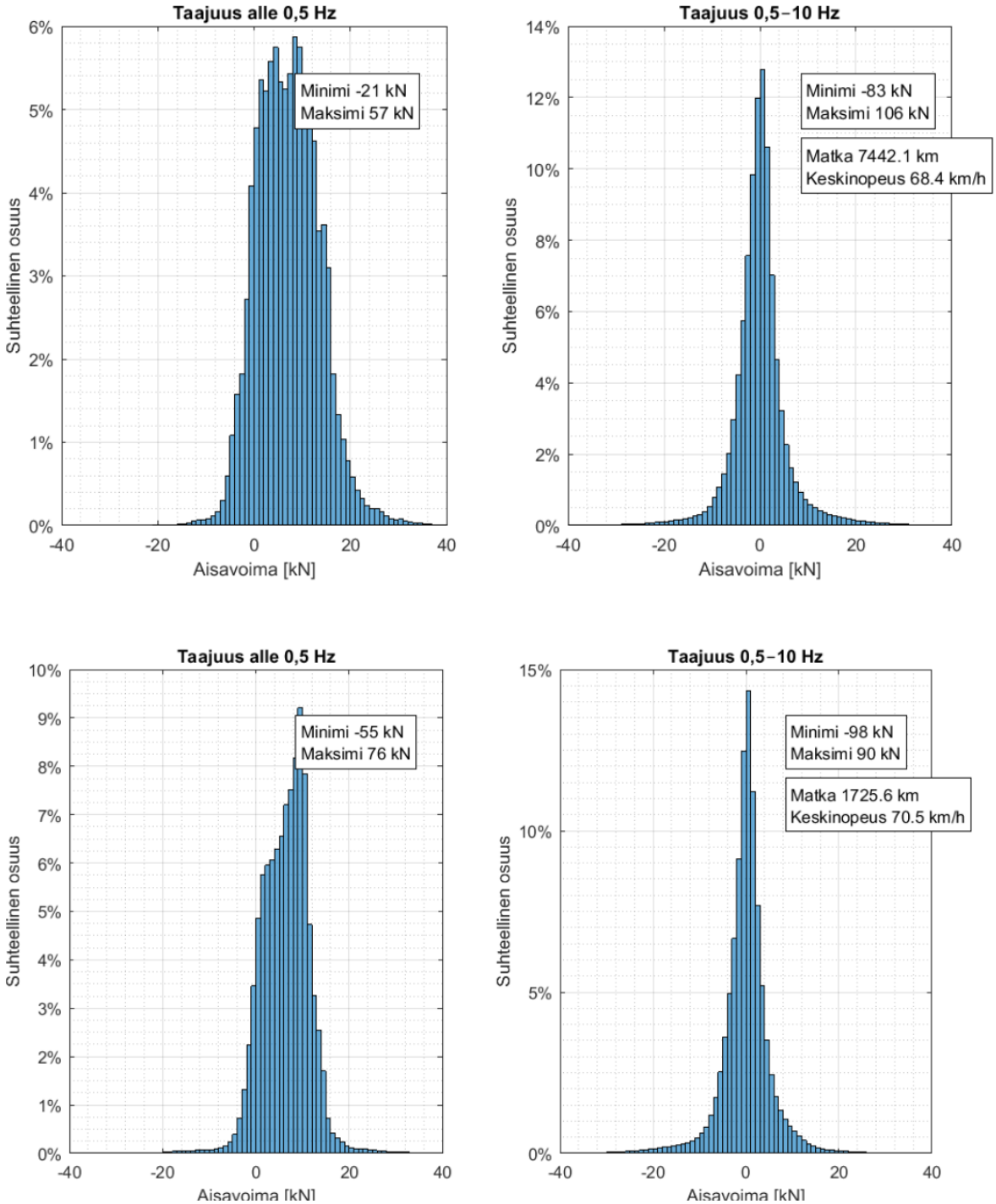
Seuraavaksi on kuvattu Oulun yliopiston HCT-yhdistelmien vetolaitteita ja renkaita koskeneita tutkimuksia. Lisäksi HCT-näkökulma on sisältynyt LUT-yliopiston käynnissä olevaan Digi-Tuote-hankkeeseen, jossa tutkitaan kuorma-autojen runkojen ja perävaunujen sekä niihin liittyvien komponenttien valmistamista lujista rakenneteräksistä. Yritysten kanssa yhteistyössä tehtävillä tutkimuksella haetaan kustannustehokkuutta sekä tuotteiden valmistukseen että erityisesti käytönaikaiseen energian kulutukseen ja CO_2-päästöjen minimointiin. Tutkimus sisältää käytännön kenttämittauksia, laboratoriossa tehtävä väsytystestauksia ja FEA-simulointeja. Hanke päättyy vuoden 2019 loppuun mennessä.

3.5.1 Vetolaitteet

Oulun yliopisto (Pirnes & Haataja 2018) tutki Ketosen 104-tonnisen sekä P&A Transin ja Malisen 84-tonnisten yhdistelmien perävaunujen vetoaisoihin kohdistuneita voimia. Vertailukohteena oli 76-tonninen yhdistelmä. Mittaus suoritettiin vetoaisoihin kiinnitetyillä venymäliuskoilla. Lisäksi Ketosen ja P&A Transin yhdistelmiin asennettiin ajodynamiikan mittausjärjestelmät.

Vetoauton vedosta tai jarrutuksesta aiheutuvat staattiset aisavoimat tapahtuvat pienellä taajuudella (alle 0,5 Hz) ja ajoneuvoyksiköiden välisestä suhteellisesta liikkeestä aiheutuvat dynaamiset voimat korkealla taajuudella (0,5–10 Hz). Staattisiin voimiin vaikuttaa erityisesti ajettava tietyyppi ja dynaamisiin voimiin erityisesti ajonopeus. Tutkimuksen mukaan HCT-yhdistelmien voimat jakaantuvat laajemmalle alueelle kuin 76-tonnisen yhdistelmän (esimerkki kuvassa 26). Korkeampitaajuisissa voimissa yhdistelmien välillä ei havaittu merkittäviä eroja. Matalataajuisissa, yhdistelmän kiihdytyksissä ja hidastuksissa ilmenevissä voimissa oli jonkin

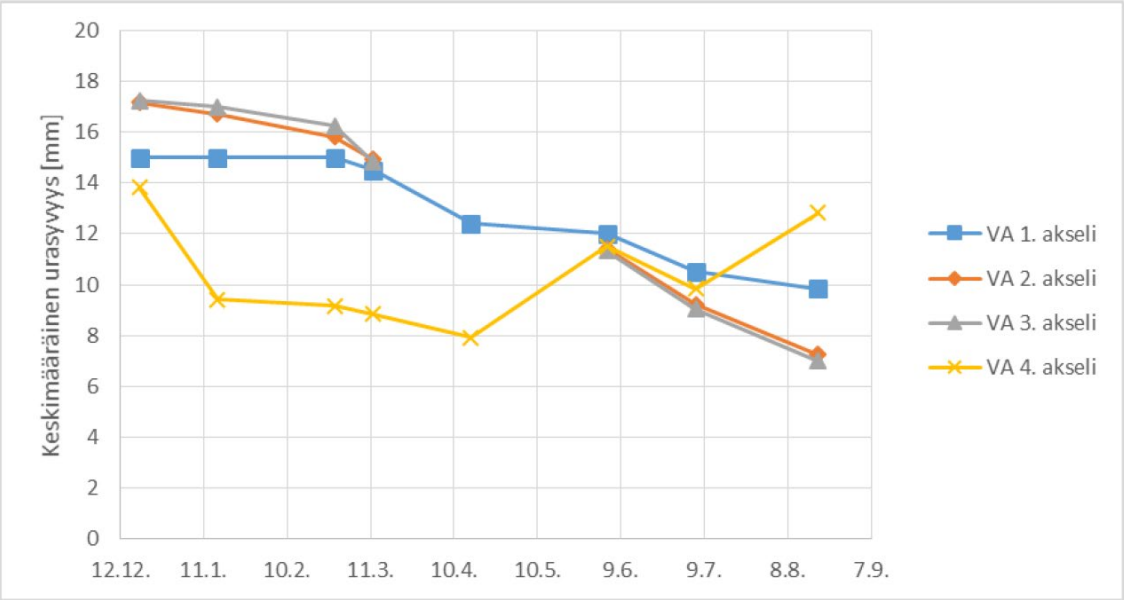
verran eroja. HCT-yhdistelmissä matalataajuiset voimat olivat jonkin verran tavanomaista yhdistelmää suuremmat, mutta erot eivät olleet merkittäviä. 104-tonnisessa HCT-yhdistelmässä esiintyi alle 0,5 Hz:n taajuisia puristusvoimia muita yhdistelmiä enemmän. (Pirnes & Haataja 2018).



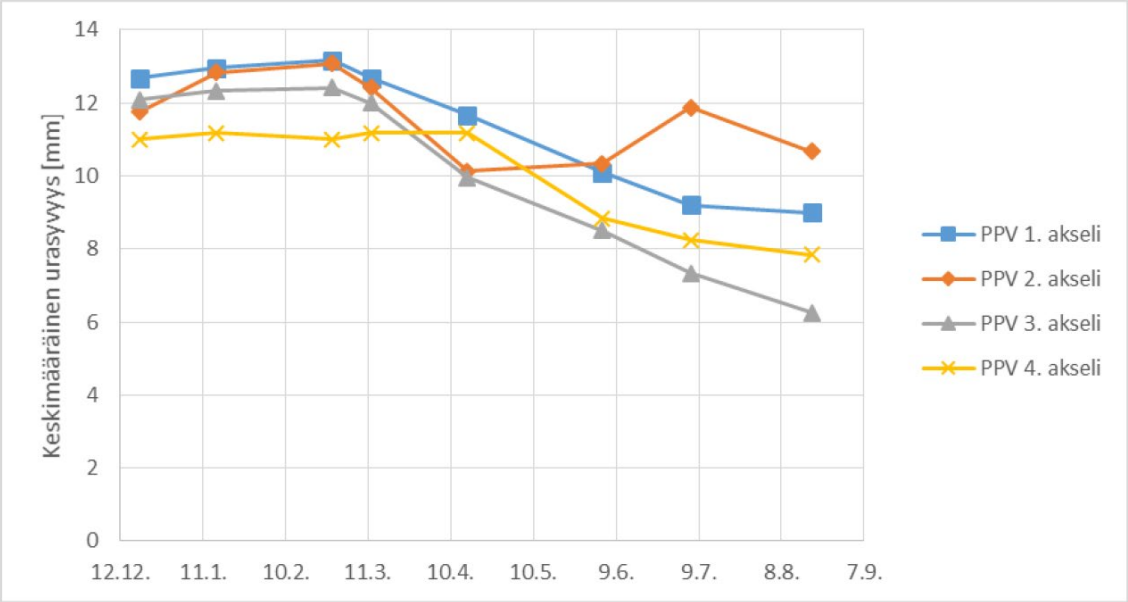
Kuva 26. Mitatut aisavoimat valta- ja kantateillä 84-tonnisella (ylempi rivi) ja 76-tonnisella (alempi rivi) yhdistelmällä (Pirnes & Haataja 2018).

3.5.2 Renkaat

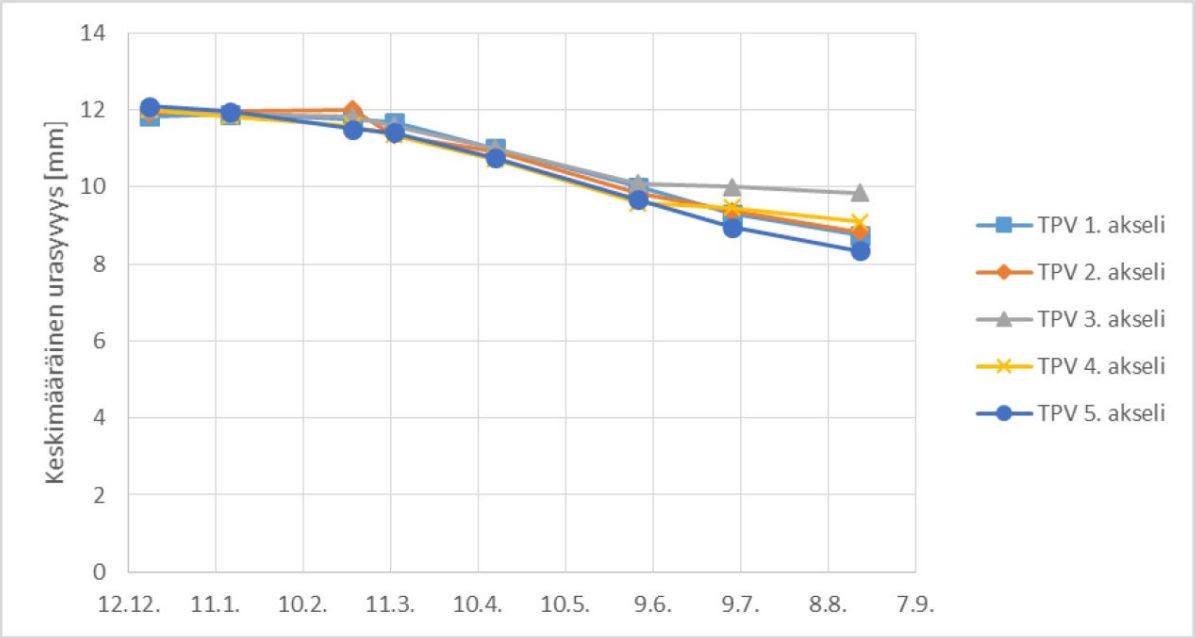
Oulun yliopisto (2016) seurasi Ketosen 104-tonnisen yhdistelmän renkaiden kulumista rengasuria mittaamalla (kuvat 27–29). Kuluminen kiihtyi kesää kohden (teiden sulamisen myötä). Renkaiden kulumisessa oli akselikohtaisia eroja (nopeimmin kuluivat vetoauton renkaat ja hitaimmin täysperävaunun renkaat). Täysperävaunun kaikkien akselien osalta pientareen puoleiset renkaat kuluivat enemmän kuin tien puoleiset renkaat. Seurannassa ei tehty vertailua muun kokoisiin yhdistelmiin tai metsäautoihin. Tutkimusta renkaiden ja ajoneuvon muiden osien kulumisesta on tarpeen jatkaa.



Kuva 27. 104-tonnisen HCT-yhdistelmän vetoauton renkaiden urasyvyyksien keskiarvo akseleittain eri mittauskerroilla (Oulun yliopisto 2016). Neljännen akselin renkaat oli vaihdettu/pinnoitettu kaksi kertaa. Vetävien akselien renkaat vaihdettu kerran talvirenkaista kesärenkaisiin.



Kuva 28. 104-tonnisen HCT-yhdistelmän puoliperävaunun renkaiden urasyvyyksien keskiarvo akseleittain eri mittauskerroilla (Oulun yliopisto 2016). Toisen akselin renkaat oli vaihdettu kerran. Renkaiden paikkaa (oikealta vasemmalle ja toisin päin) oli vaihdettu viikolla 20.



Kuva 29. 104-tonnisen HCT-yhdistelmän varsinaisen perävaunun renkaiden urasyvyyksien keskiarvo akseleittain eri mittauskerroilla (Oulun yliopisto 2016).

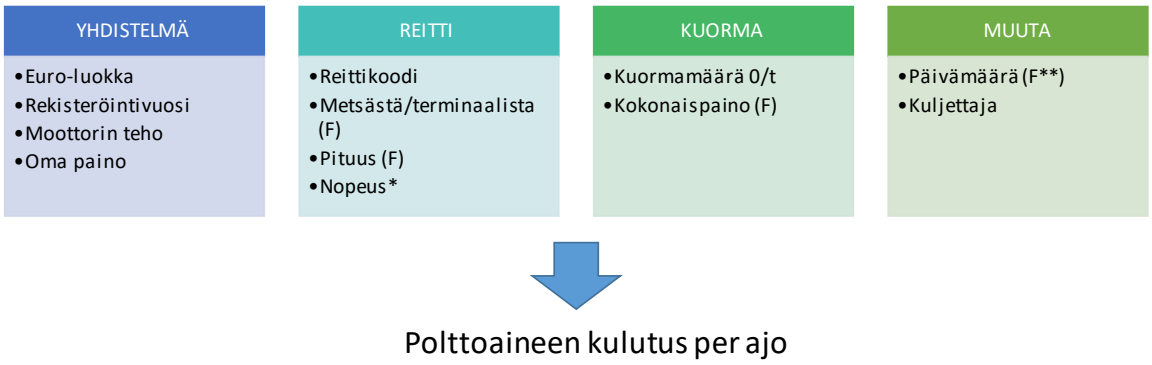
3.6 Polttoaineen kulutus ja päästöt

3.6.1 Polttoainekulutukseen vaikuttavat tekijät ja tietojen keruu

Polttoaineen kulutus vaikuttaa merkittävästi sekä kuljetuskustannuksiin että kuljetusten ympäristövaikutuksiin. Tässä raportissa on tarkasteltu lähinnä yhdistelmän koosta seuraavia säästöjä hyötykuormakohtaisissa polttoaineen kulutuksissa ja päästöissä. Luvussa 3.6.2 on tarkasteltu kuljetusreitin vaikutuksia polttoaineen kulutukseen.

HCT- ja verrokkiyhdistelmien polttoaineen kulutusfunktioiden laatimisessa hyödynnettiin ajokohtaista tietoa (ks. tarkemmin kuva 30):

- polttoaineen kulutuksesta
- reittityypistä (ajo metsästä/terminaalista)
- ajovaiheesta (tyhjänä/kuormattuna)
- ajomatkan pituudesta
- yhdistelmän ja kuorman painosta ja
- päivämäärästä (talvi/kesä).



F = polttoaineen kulutusfunktiossa käytetyt tiedot
*: Tutkimusaineistosta jätettiin pois ajoja, joiden yhteydessä oli erityisen pitkiä taukoja
**: Päivämäärän mukaan ajot määriteltiin joko kesä- tai talviajan ajoksi

Kuva 30. Polttoainekulutuksen laskennassa käytetyt tekijät.

Valittuja muita kerättyjä tietoja hyödynnettiin mm. otannan suunnittelussa, laskelmien tarkistuksissa ja mahdollisten virheiden havaitsemisessa. Kaikkien taustatekijöiden vaikutusta ei voitu arvioida yhdistelmien pienen lukumäärän takia. Kunkin yhdistelmän osalta tiedonkeruu toteutetaan vuoden ympäri, jotta eri ajankohtien vaikutus polttoaineen kulutukseen voidaan erotella (seurantajaksot liitteessä 2). Osalla yhdistelmiä tiedonkeruu jatkuu vielä, joten tässä esitettyjä tuloksia tarkistetaan tarvittaessa myöhemmin.

Polttoaineen kulutustiedot ja ajonopeudet kerättiin pääosin ajoneuvojen hallintajärjestelmistä (taulukko 4).

Taulukko 4. Polttoaineen kulutustietojen keräysmenetelmät.

Yhdistelmä	Tiedonkeruutapa
Ketonen (104T) HCT Verrokki	 Scania Fleet Management & rajapintadata* Scania Fleet Management
Orpe (94T) HCT&verrokki	 Volvo DynaFleet
Hannonen (84AT) HCT Verrokki	 Econen Econen & osin kuljettajaseuranta
P&A Trans (84BM) HCT Verrokki	 Scania Fleet Management & rajapintadata* Volvo DynaFleet
Malinen (84CM) HCT&verrokki	 Volvo DynaFleet
Moilaspojat (84DT, 90T)	Volvo DynaFleet
Konnekuljetus (90H)	Volvo DynaFleet
Malmstedt (92T)	Fleet Board
Huhtala (100H) HCT&verrokki	 ABAX Equipment Control
Wickström (85H) HCT&verrokki	 Kuljettajaseuranta
Sammalisto (91H/84H) HCT Verrokki	 Scania Fleet Management & rajapintadata* Scania Fleet Management

**REST-rajapintadata on ajoneuvon CAN-väylästä saatua kulutusdataa*

Ajoneuvojen hallintajärjestelmistä saadut kulutuslukemat kalibroitiin kuljetusyritysten tankkausseurannan pohjalta saaduilla kulutuslukemien erotuksilla (taulukko 5). Hallintajärjestelmät näyttävät yleensä pienempää kulutusta kuin tankkausseurannalla saatu kulutustieto. Talvella erotusta nostaa lämmityslaitteiden käyttö, jonka polttoaineen kulutus ei näy hallintajärjestelmien tiedoissa.

Taulukko 5. Tankkausseurannan pohjalta saatu kalibrointierotus ajoneuvojen hallintajärjestelmien ilmoittamiin kulutuslukemiin nähden). Hakeyhdistelmien polttoaineen kulutuslaskelmia ei ole vielä kalibroitu.

Yhdistelmä	Erotus %	Tankkausseuranta	Kesä	Talvi
84AT	4,49 %	6/16-5/17	3,13 %	5,86 %
84AverT	1,00 %	8-11/16	1,59 %	0,41 %
94T/94verT*	0,98 %	6-9/16, 3/2017	0,95 %	1,01 %
104T	6,08 %	1/16, 1-3, 6-8 / 17	6,43 %	5,91 %
104verM	4,09 %	9/16, 1-3, 6-8 / 17	4,63 %	3,56 %
84BM	3,77 %	5/16-3/17	2,41 %	4,91 %
84BverM	-1,61 %	2, 6-8, 10 / 17	-2,88 %	-0,33 %
84CM	3,62 %	1-3, 5-7 / 17	3,55 %	3,69 %
84CverM	5,33 %	12/16, 2-3, 6-9 / 17	3,62 %	7,04 %
84H	5,46 %	5-6, 10-12 / 18	4,79 %	6,12 %
85H	4,49 %	1-6/18	1,17 %	7,81 %
91H	-0,08 %	4-5, 10-12 / 18	-1,36 %	-1,53 %
100H	3,96 %	5/17-1/18	2,93 %	4,99 %
100verAH	-0,21 %	4/17-1/18	-3,15 %	2,73 %
100verBH	-6,04 %	4-7, 9-10 / 18, 1/19	-6,08 %	-6,00 %
*sama vetoauto				

Erotus % = (tankkauslukema – hallintajärjestelmän lukema) / hallintajärjestelmän lukema

3.6.2 Kuljetusreitin vaikutus polttoaineen kulutukseen

Taulukossa 6 on esitetty tutkittujen HCT-yhdistelmien pääreitit. Reiteillä on merkittäviä eroja mm. maantieteellisen sijainnin, keskikuljetusmatkan ja eri tieluokissa ajon osuuden osalta. Kunkin ajon reitti on koodattu tutkimusaineistossa omaksi reitikseen. Mikäli yhdistelmällä on hyvin monia reittejä (useilta eri tienvarsivarastoilta lähtevät metsäautot), reittikoodi on muodostettu toimituskohteen ja kuljetusmatkan mukaan.

Taulukko 6. Tutkittujen HCT-yhdistelmien pääkuljetusreitit.

Alue	Reitit
Pohjois-Suomi	• Ketonen – Mm. Inarin alueen terminaaleista Rovaniemen rautatieterminaalille 4-tietä pitkin • P&A Trans – Lapin toimituskohteisiin (mm. Rovaniemen terminaali) alueen tienvarsivarastoista • Malinen – Tienvarsivarastoista Oulun, Kuhmon ja Joensuun tuotantolaitoksiin • Moilaspojat – Terminaalista Oulun ja Kemin tuotantolaitoksiin
Keski-Suomi	• Konnekuljetus – Mänttä-Vilppula/Soini/Jyväskylä – Äänekoski, Soini – Rauma/Mänttä-Vilppula
Kaakkois- ja Itä-Suomi	• Orpe – UPM:n tehtaiden (Savonlinna, Kouvolan Kymi, Ristiinan Pellos) väliset tiet • Hannonen – Pohjois-Karjalan terminaaleista pääosin 6-tietä pitkin Metsä Groupin tehtaille (Lappeenranta, Joutseno ja Simpele) • Wickström – UPM:n Pelloksen tehtaalta Kaukaalle Lappeenrantaan ja Kymille Kouvolaan • Malmstedt – Saimaan ympäriajo (Savonlinna–Kouvola–Mikkeli) ja Savonlinna–Joensuu
Länsi-Suomi	• Huhtala – UPM:n Seikun sahalta (Pori) UPM Raumalle • Sammalisto – UPM:n Korkeakosken sahalta Rauman, Kouvolan ja Lappeenrannan tehtaille

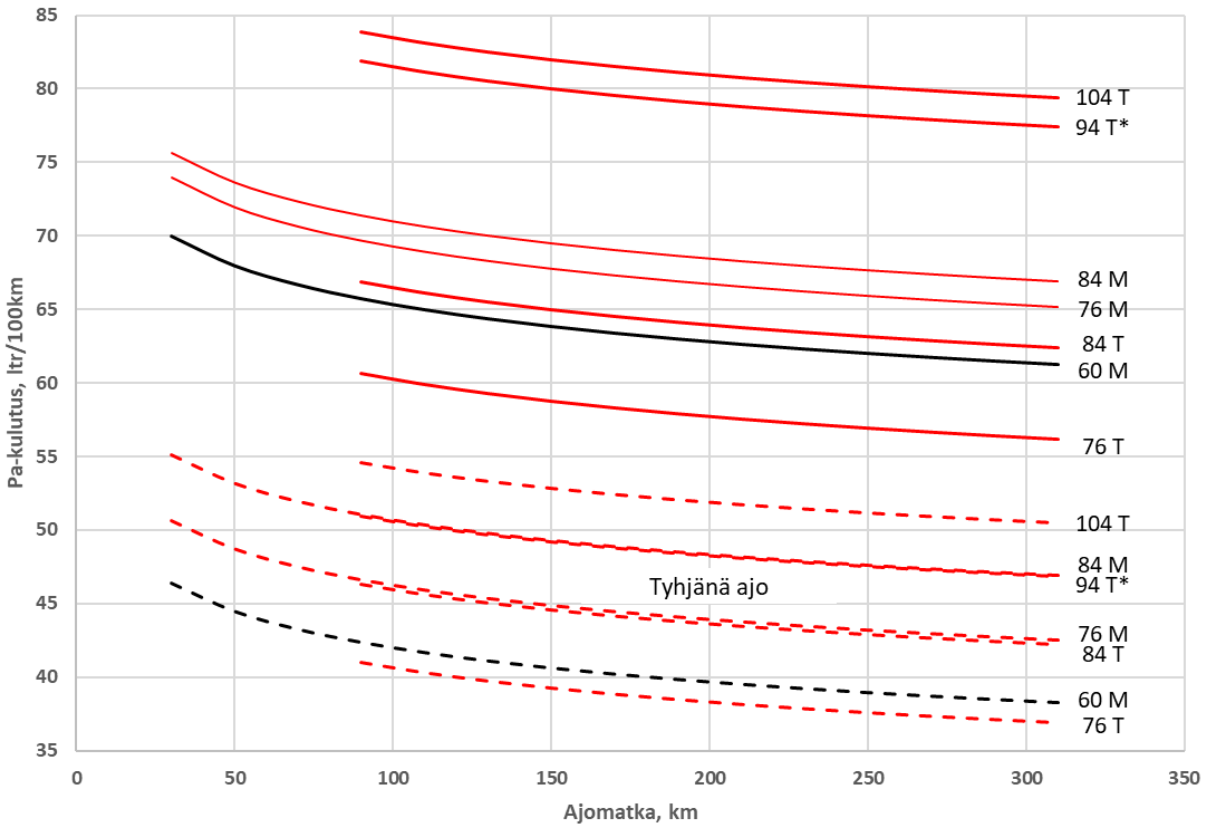
Kuljetusreittien ominaisuuksien vaikutusta polttoaineen kulutukseen on kuvattu taulukossa 7. Keskikuljetusmatkan vaikutus kulutukseen on poistettu tämän raportin laskelmissa arvioimalla kerätyn datan pohjalta polttoaineen kulutus kaikille kuljetusmatkoille.

Taulukko 7. Kuljetusreittien ominaisuuksien vaikutuksia polttoaineen kulutukseen.

Reittiominaisuus	Vaikutus polttoaineen kulutukseen
Keskikuljetusmatka	Pidemmillä matkoilla on pienempi keskimääräinen kulutus (metsä- ja kaupunkiajon osuus jää pieneksi)
Keskinopeus	Korkea keskinopeus nostaa kulutusta
Ajon tasaisuus (ruuhkaisuus)	Epätasainen ajo lisää kulutusta
Paluukuljetusten osuus	Mahdollisuus paluukuljetuksiin vähentää tyhjänä ajon kulutusta ja pienentävät siten lastiyksikköä kohden laskettua kulutusta
Eri tieluokat (metsäautotiet, alempi ja ylempi tieverkko, kadut)	Tieluokka vaikuttaa ajonopeuteen ja ajon tasaisuuteen ja siten polttoaineen kulutukseen
Tien kunto (epätasaisuudet ja talvihoidon tilanne)	Alemman tieverkon huono kunto tai puutteellinen talvihoito nostavat polttoaineen kulutusta
Mäkisyys ja korkeuserot	Mäkiset reitit nostavat polttoaineen kulutusta
Sijainti Suomessa	Sääolosuhteet kuten sade, lumi ja pakkanen lisäävät polttoaineen kulutusta kuivaan säähän verrattuna. Dieselin talvilaatu otetaan Pohjois-Suomessa Etelä-Suomea aikaisemmin käyttöön.

3.6.3 Polttoaineen kulutusfunktiot

Puutavarayhdistelmien kesä- ja talviaineiston (Q2&Q3 ja Q1&Q4) polttoaineen kulutukset analysoitiin erikseen. Laaditut kulutusfunktiot edustavat kuitenkin koko vuoden keskitasoa (kuva 29). Perusfunktion muoto (≈ kulmakerroin) on sama kuin 60-tonnisella puutavara-autolla. 60-tonnisen puutavarayhdistelmän kulutuslukemat perustuvat selvitykseen Pennanen ym. 2004. Kuormattuna ajon osalta funktiossa on mukana vain täydet kuormat. Kulutuslukemat (litraa / 100 km) luokiteltiin kuljetusmatkan mukaan 20 km:n osaväleihin. Osavälit, joissa oli vain yksittäisiä havaintoja eli kuormia, pudotettiin pois. Osaväli, johon osui eniten kuormia, sai kulutusfunktiossa suurimman painon. Haasteena funktioiden laatimisessa oli se, että joillakin HCT-yhdistelmällä on ajoja vain muutamilla eri kuljetusetäisyyksillä. Puutavarayhdistelmien kulutusfunktiot on esitetty kuvassa 31. Hakeyhdistelmien kulutusfunktiot tullaan esittämään loppuraportissa.



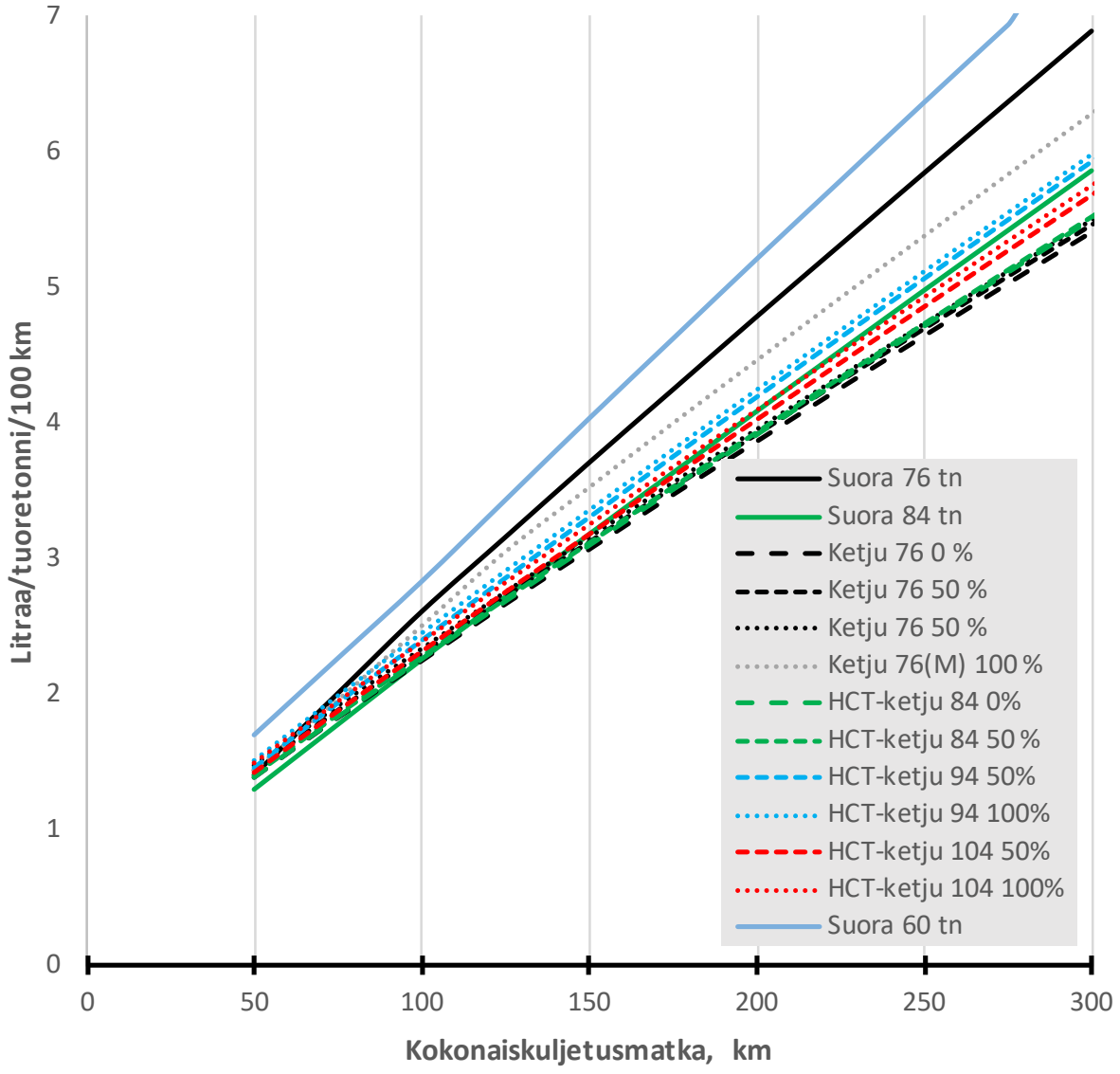
Kuva 31. Polttoaineen kulutus (litraa / 100 km) eri puutavarayhdistelmillä ja kuljetusmatkoilla. Yhtenäinen viiva = täytenä ajo, katkoviiva = tyhjänä ajo.

3.6.4 Kuljetusten polttoaineen kulutusvertailut

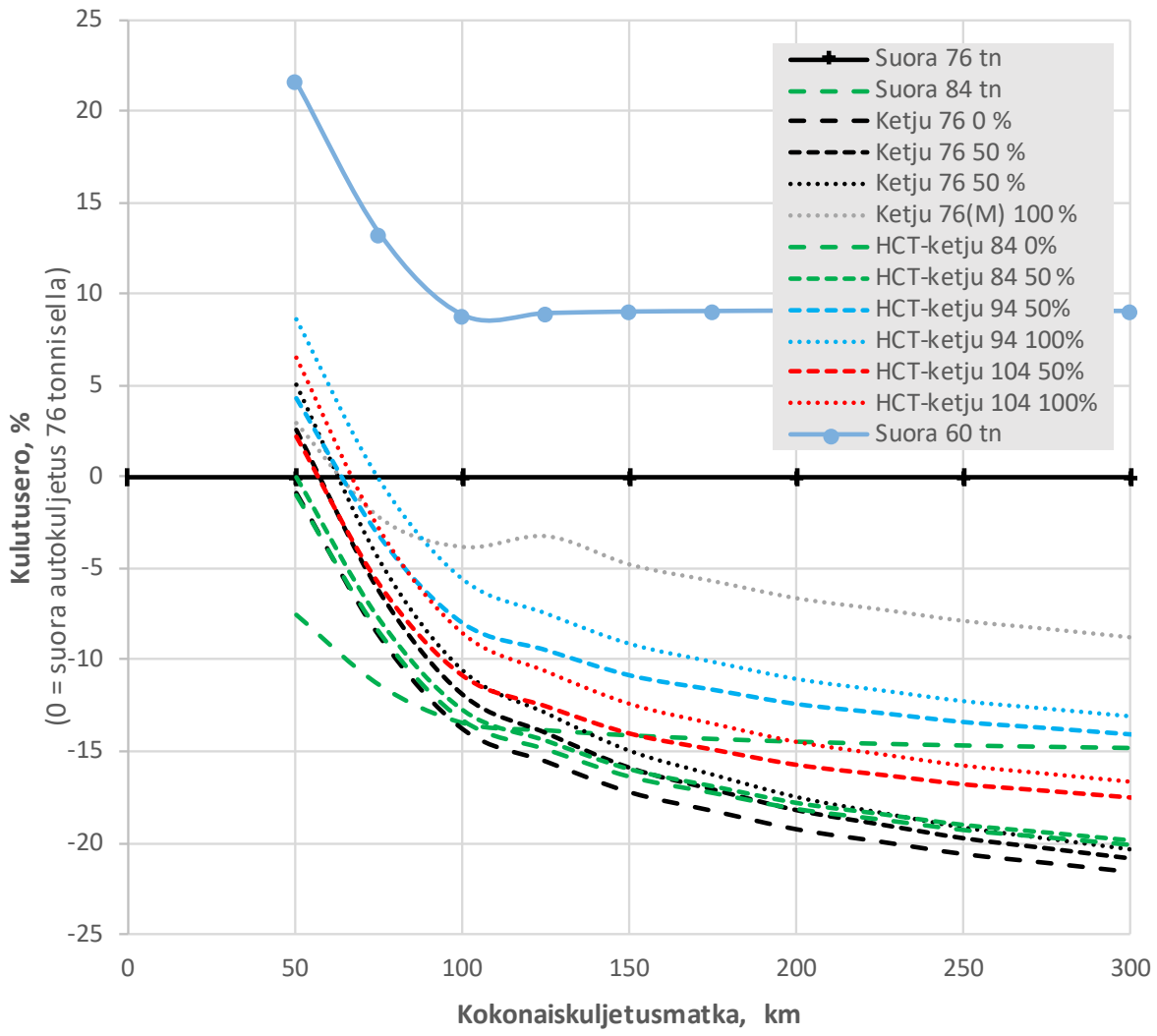
Suorien puutavarakuljetusten laskelmissa on otettu huomioon pelkkä ajovaiheen polttoaineen kulutus ja ketjukuljetuksissa myös siirtokuormauksen osuus polttoaineen kulutuksesta. Terminaalista eteenpäin kuljettava auto joko kuormataan kokonaan maasta (100 %:n tapaus kuvissa 32–33), kuormataan puoliksi ja loput kuormasta tulee valmiiksi lastattuna perävaununa (50 %) tai kuorma on valmiiksi lastattu perävaunuun ja jalkalavalle (0 %).

84-tonniset metsäautot tuovat 76-tonnisiin yhdistelmiin nähden noin 10 %:n säästön polttoaineen kulutuksessa. Terminaalin kautta kulkevissa kuljetusketjuissa 84-tonnisen yhdistelmän tuoma säästö nousee yli 20 %:iin johtuen Hannosen HCT-yhdistelmän erittäin hyvästä polttoainetaloudesta. Muilla yhdistelmillä säästö jää 100 km:n kuljetusmatkalla alle 10 %:iin. Säästö kasvaa kuljetusmatkan mukaan.

Laskelmissa ei ole otettu huomioon meno-paluukuljetuksia, joita on Orpella, Sammalistolla ja Konnekuljetuksella. Ajettaessa kuormattuna kumpaankin suuntaan myös polttoainetaloudellisuus paranee nykyisestä kummankin kuljetussuunnan osalta. Jos paluusuunta on tyhjä, polttoainetaloudellisuus heikkenee ko. suunnan osalta.



Kuva 32. Puutavaran kuljetusketjujen polttoaineen kulutuksen vertailut eri kuljetusmatkoilla (litraa / tuoretonni / 100 km).



Kuva 33. Puutavaran kuljetusketjujen polttoaineen kulutuksen vertailut eri kuljetusmatkoilla (erotus suoraan kuljetukseen 76-tonnisella yhdistelmällä, % per tuoretonni).

3.6.5 Ajovastusmittauksiin perustuvat kulutus- ja päästölaskelmat

Liikenneviraston (nykyisin Väylävirasto) ajovastustutkimukseen (Sauna-aho ym. 2018) osallistuivat Orpen HCT-ja verrokkiyhdistelmät. Tutkimus perustui testiradoilla tehtyihin mittauksiin, joiden pohjalta simuloitiin ajoneuvojen energiankäyttö Helsinki–Oulu-reitillä ja tehtiin laskennallinen CO_2-päästöarvio. 94-tonninen HCT-yhdistelmä kuluttaa polttoainetta 14 % vähemmän kuin 76-tonninen yhdistelmä (kuljetettuihin tonneihin verrattuna; laskelmaan ei ole sisällytetty tyhjää paluukuljetusta) (taulukko 8). Taulukossa 9 on laskettu polttoaineen kulutuksia per tkm raakapuun irtotilavuusmassan mukaan.

Taulukko 8. 94- ja 76-tonnisen puutavarayhdistelmän polttoaineen kulutus (Sauna-aho ym. 2018).

	Kulutus l / 100 km			Kulutus l / 100 tkm	
Kokonaispaino t	**Tyhjänä**	**Puoli-täynnä**	**Täynnä**	**Puolitäynnä**	**Täynnä**
Verrokki	26,8 / 43,29	52 / 50,44	76 / 58,53	2	1,19
HCT	27,2 / 47,56	62 / 58,37	94 / 68,29	1,68	1,02
HCT/Verrokki	*1,01 / 1,1*	*1,19 / 1,16*	*1,24 / 1,17*	*0,84*	*0,86*

Taulukko 9. 10- ja 11-akselisen puutavarayhdistelmän polttoaineen kulutus puun eri irtotilavuusmassoilla (Koskinen & Sauna-aho teoksessa Sauna-aho ym. 2018).

Akselit	Raakapuun irtotilavuus-massa	Kokonais-massa t	Polttoaineen kulutus l/100 km	Polttoaineen kulutus l/100 tkm
10	200	45,1	58,82	2,59
11	200	64,9	71,19	2,07
11/10	**200**	**1,44**	**1,21**	**0,80**
10	390	66,5	66,92	1,52
11	390	99,5	81,53	1,18
11/10	**390**	**1,50**	**1,22**	**0,78**
10	470	75,9	70,08	1,31
11	470	113,7	84,90	1,02
11/10	**470**	**1,50**	**1,21**	**0,78**

3.6.6 Valtakunnalliset kulutus- ja päästölaskelmat

Kansallisen energia- ja ilmastostrategian 2017 (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017) mukaan liikenteen päästöjä tulee vähentää vuoteen 2030 mennessä noin 50 % vuoden 2005 tilanteeseen verrattuna. Myöhemmin valmistuvassa loppuraportissa esitetään laskelmat, joissa verrataan HCT-yhdistelmien hiilidioksidipäästöjä ja niiden päästökustannuksia vuoden 2005 tilanteeseen. Laskelmissa käytetään seuraavia oletuksia:

- kuljetusvolyymit ovat vuoden 2016 mukaiset (ks. taulukko 1)
- keskikuljetusmatka 105 km, täysi menokuljetus ja tyhjä paluukuljetus
- 60-tonnisen metsäauton kulutustaso on tutkimuksen Pennanen ym. (2004) mukainen
- muiden ajoneuvojen kulutustasot ovat aiemmin esitettyjen Metsäteho Oy:n kulutusfunktioiden mukaiset
- polttoaineen hiilidioksidipäästökerroin on vuoden 2016 mukainen (2,339 kg/diesellitra; dieselin bio-osuus 11,52 %) (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy 2017)
- hiilidioksidin päästökustannus on 37 €/päästötonni (vuoden 2010 rahassa) (Liikennevirasto 2012).

Ruotsissa on tutkittu aerodynaamisuuden kehittämisen vaikutuksia HCT-puutavarayhdistelmien polttoaineen kulutukseen (Löfroth & Gelin 2015). Kulutusta voidaan vähentää aerodynaamisuutta parantamalla puutavarakuljetuksissa 4–6 % ja hakekuljetuksissa 3–8 %.

Muita keinoja vähentää puukuljetusten polttoaineen kulutusta ja päästöjä on tarkasteltu Metsätehon tutkimuksessa (Venäläinen ym. 2019).

3.7 Tie- ja siltarasitus

3.7.1 Tiet

HCT-yhdistelmien vaikutuksia tierasitukseen on selvitetty Oulun yliopiston (Pekkala 2018) ja Tampereen yliopiston (Vuorimies ym. 2018) koordinoimissa tutkimuksissa sekä Liikenneviraston selvityksessä (Sauna-aho ym. 2018). Valmistumisvaiheessa on kaksi muuta tutkimusta, joista toisessa kootaan yhteen eri tutkimusten tuloksia. Tierasitustutkimusten tuloksia ei käsitellä vielä tässä väliraportissa, vaan myöhemmin valmistuvassa loppuraportissa.

3.7.2 Keinoja vaikuttaa tierasitukseen

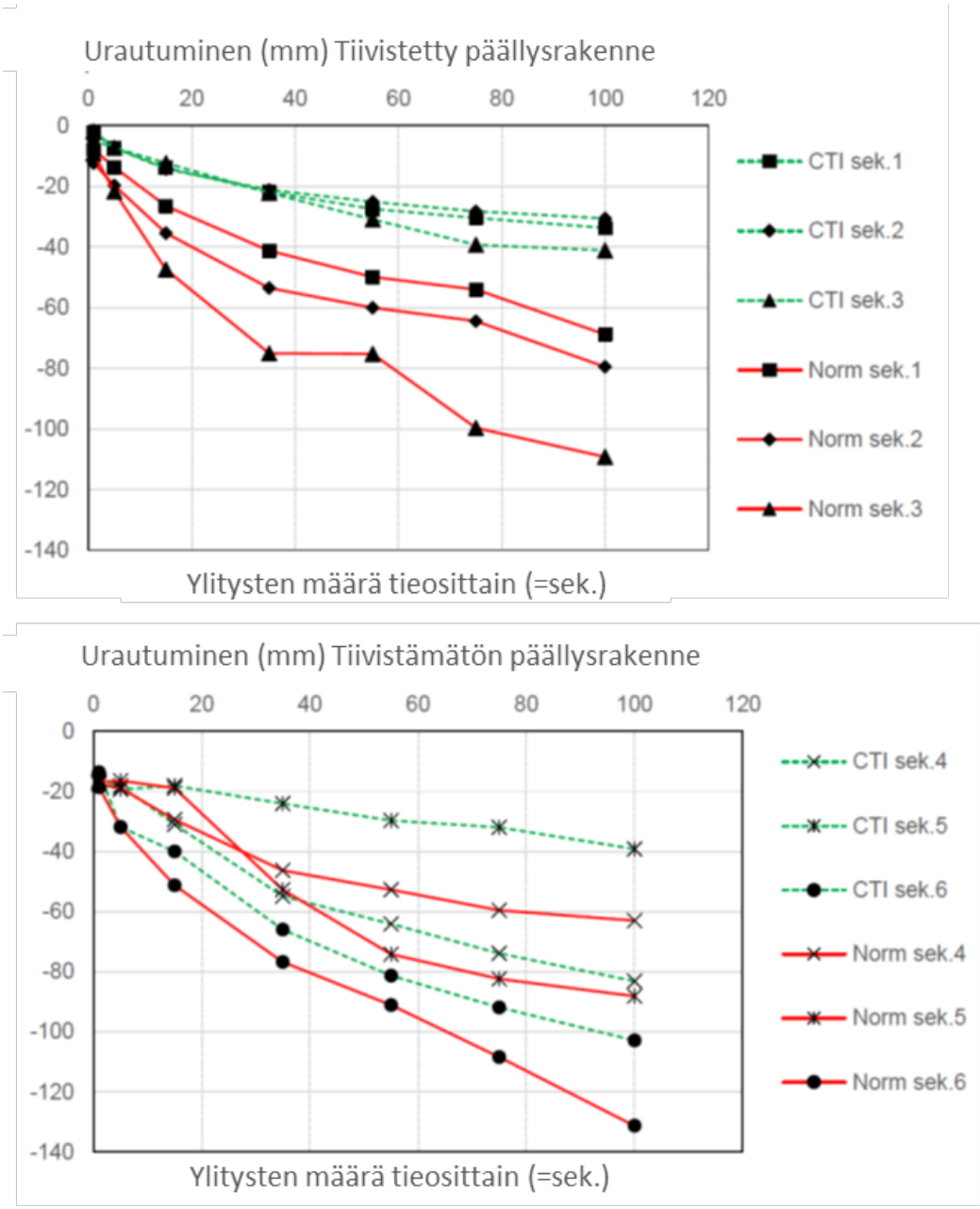
Tierasitusten vähentämiseen on erilaisia keinoja, joita voidaan toki hyödyntää jo nykyisen kokoisissa yhdistelmissä.

Olosuhteiden mukaan dynaamisesti vaihtuvat tien painorajoitukset
Pohjois-Suomeen on ehdotettu HCT-kokeilua, jossa teiden painorajoitukset olisivat korkeammat tien runkojen ollessa jäässä (Metsähallitus 2018). Liikenneviraston BIFI-pilotissa (Toivonen 2016) testattiin kelirikosta johtuvien painorajoitusten reaaliaikaista muuttamista tiestön kuljetuskelpoisuuden mukaan. Kuljetuskelpoisuus arvioitiin pilottiajoneuvojen keräämien, tien kuntoa kuvaavien sensoritietojen perusteella.

Kuljetuskelpoisuusluokitus
Arbonaut Oy kehittää korjuukelpoisuusluokitusta vastaavaa työkalua, joka paikkatietojen, tien rakentamistietojen ja säätietojen pohjalta arvioisi yksityisten sorateiden kuljetuskelpoisuutta eri ajankohtina (Puumalainen 2018). Työkalua hyödyntämällä kunkin alueen kuljetuksia voitaisiin paremmin kohdentaa niille ajanjaksoille, jolloin riski tien rikkoutumiseen on pieni.

Terminaalit
Kelirikkoajan lähestyessä puuta siirretään tienvarsivarastoista erillisiin terminaaleihin, jotta puu on ongelmitta kuljetettavissa tuotantolaitoksille. Toisaalta terminaali tai jokin muu kuormauspaikka on tarpeen, kun puuta siirretään metsäautosta HCT-terminaaliautoon (terminaalien ja kuormauspaikkojen hyödyntämistä HCT-kuljetusketjuissa on tarkasteltu luvussa 3.7.4). Jotta terminaaleja ja kuormauspaikkoja voidaan hyödyntää puulogistiikassa joustavasti, tulisi tieto käytössä olevista terminaaleista olla helposti saatavissa. Suomen metsäkeskuksen (2019) laatimaa terminaalikarttapalvelua tuleekin jatkokehittää.

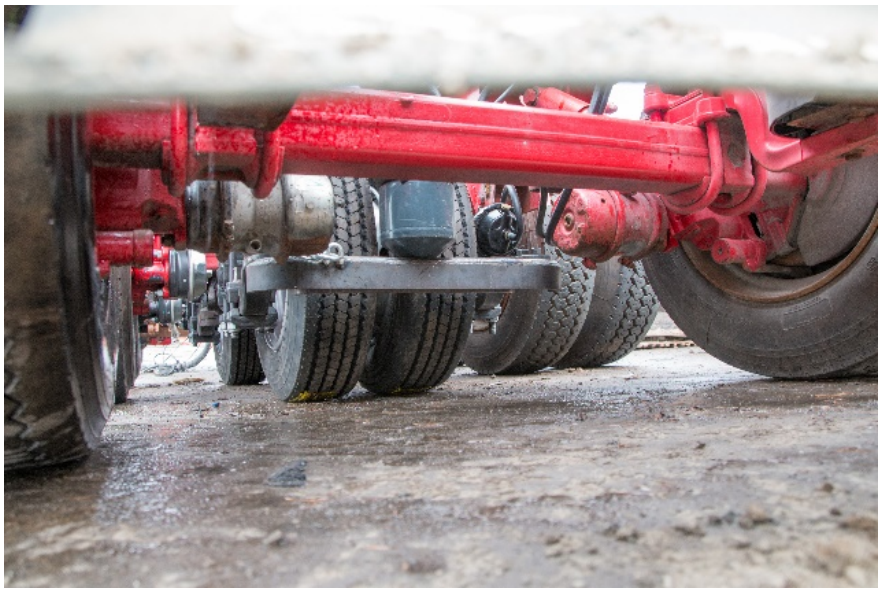
Rengaspaineiden säätöjärjestelmät (Central Tire Inflation System, CTI)
CTI-järjestelmiä on tällä hetkellä Suomessa käytössä puutavaran kuljetuksissa (ks. tarkemmin Siekkinen & Korpilahti 2015). Järjestelmän käyttö pienentää ajoneuvon tiehen aiheuttamia urautumia (kuva 34). CTI-varustelluilla yhdistelmillä voi ajaa valtion teillä myös kelirikosta johtuvien painorajoitusten aikana (Väylä 2019). CTI:n vaikutuksia HCT-yhdistelmien aiheuttamiin uriin tulisi tutkia.



Kuva 34. Tavallisen ja CTI-järjestelmällä varustellun puutavarayhdistelmän urautumisvaikutus (Bergqvist ym. 2016).

Puutavarayhdistelmien uusi akselistoratkaisu

AT Wheelsin akselistoratkaisussa osa perävaunun pyöristä sijoitetaan akseliston keskelle (kuva 35). Destian vetämässä valtatiellä toteutetussa tutkimuksessa (Virtala ym. 2018) lisäpyörällinen ratkaisu vähensi 4 baarin maksimipaineella päällysteen tierasitusta yhteensä 40 % ja kantavan kerroksen tierasitusta yhteensä 16 % lisäpyörättömään ratkaisuun verrattuna. Oulun yliopiston (Pekkala & Haataja 2018) tutkimuksessa soratietä ajettiin ensin 9-akselisella puutavarayhdistelmällä ja sitten AT Wheelsin ratkaisulla varustetulla yhdistelmällä. Keskelle sijoitettujen pyörien ei havaittu tasoittavan jo syntyneitä uria, mutta turvepohjaisella tiellä 8(+2)-yhdistelmän tuoma lisäurautuminen jäi hyvin pieneksi (taulukko 10). Moreenipohjaisella tiellä 8(+2)-akselisen yhdistelmä urautumisvaikutus oli 9-akselista suurempi. 8(+2)-yhdistelmän vaikutusten luotettava arviointi vaatii vielä lisätutkimusta.



Kuva 35. AT Wheelsin akselistoratkaisu perävaunuun (Kuva: AT Wheels Oy).

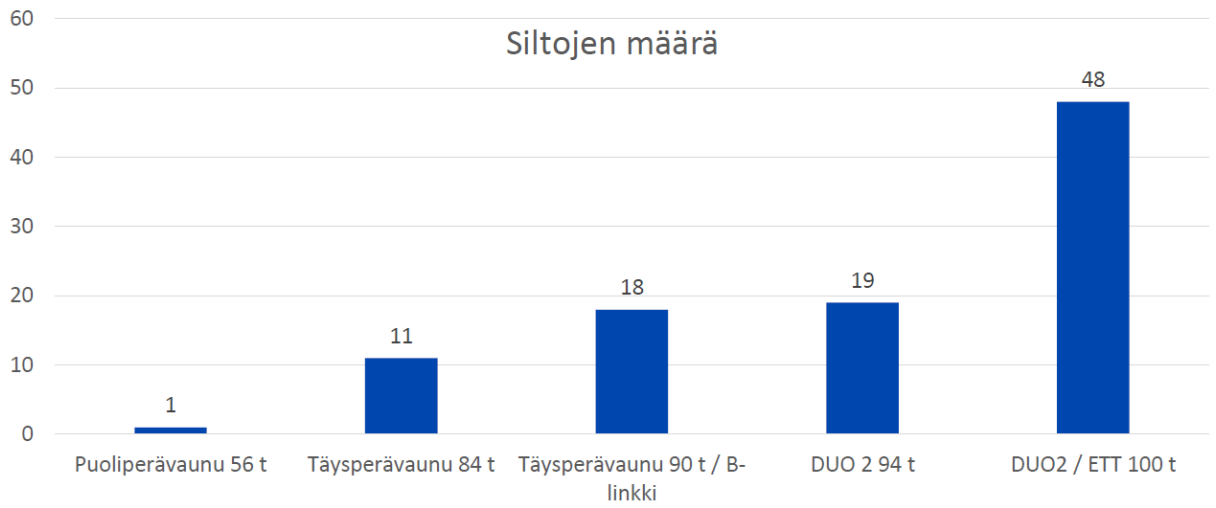
Taulukko 10. Urakehityksen keskimääräinen kasvu (mm), kun soratietä oli ajettu ensin 9-akselisella yhdistelmällä ja sitten 8(+2)-akselisella perävaunulla (kahdessa akselissa AT Wheelsin ratkaisu) (Pekkala & Haataja 2018).

Tietyyppi	9-aks.	AT Wheels	Yhteensä
Turve	13,0	0,5	**13,5**
Moreeni	2,2	5,0	**7,2**

3.7.3 Sillat

Siltojen kestävyys HCT-yhdistelmien kannalta riippuu sillan pituudesta ja yhdistelmien ominaisuuksista (kokonaismassa ja -pituus, akseliryhmien välinen etäisyys ja yksittäisten akseliryhmien massat). Varsinkin pitkillä silloilla voisi tulla tarpeelliseksi rajoittaa samanaikaisten HCT-yhdistelmien määrää. (Sauna-aho ym. 2018).

Väylävirasto (Liikennevirasto 2018) tutki ongelmallisten siltojen määrää HCT-yhdistelmien eri kokoluokilla (84–100 tonnia) (kuva 36). Tutkimus rajoittui raskaan liikenteen pääväylille ja jo myönnettyjen HCT-lupien verkolle eikä siten kata koko päätieverkkoa. Ko. siltojen uusiminen maksaisi arviolta 150 milj. €. Lisäksi Väylävirasto arvioi valtateillä olevan noin 300 siltaa, joissa massojen nosto aiheuttaisi painorajoituksia. Ko. siltojen vahventamisen kustannusarvio on 150 milj. €. Kustannusarviota ei ole eritelty sen mukaan, minkä kokoisten HCT-yhdistelmien liikennöinti sallittaisiin.



Kuva 36. Ongelmasiltojen määrä eri yhdistelmillä pääväylillä ja nykyisellä HCT-lupien verkolla (Liikennevirasto 2018).

Suomen Tieyhdistyksen (Rahja 2018) arvion mukaan yksityisteillä on yli 10 000 siltaa, joista asutuilla teillä on noin kolmannes. Koottua tietoa siltojen kunnosta tai kantavuuksista ei ole.

Siltarasituksen vähentämisen keskeisenä keinona ovat digitaaliset ratkaisut, joilla tarvittaessa rajoitetaan HCT-kuljetuksia varsinaisten painorajoitusten sijasta tai rinnalla. Esimerkiksi siltojen anturointia ja sähköisiä näyttötauluja (tai ilmoituksia kuljetusten suunnittelujärjestelmiin) hyödyntämällä voidaan ilmoittaa kuljettajille vaadittava aika tai etäisyys HCT-yhdistelmien välillä.

3.7.4 HCT-käytävät

Liikenne- ja viestintäministeriön (2018) muistion mukaan ”nykyistä suurinta sallittua yhdistelmämassaa (76 tonnia) ei ole mahdollista korottaa kuin vain rajatulla tieverkolla”. HCT-terminaaleja koskeneessa selvityksessä (Venäläinen 2017) tunnistettiin mahdollisia tekijöitä puutavara- ja hakekuljetusten HCT-käytävien määrittämiselle (taulukko 11). HCT-kokeiluissa onkin jo mukana yhdistelmiä, jotka hyödyntäisivät erilaisia HCT-käytäviä:

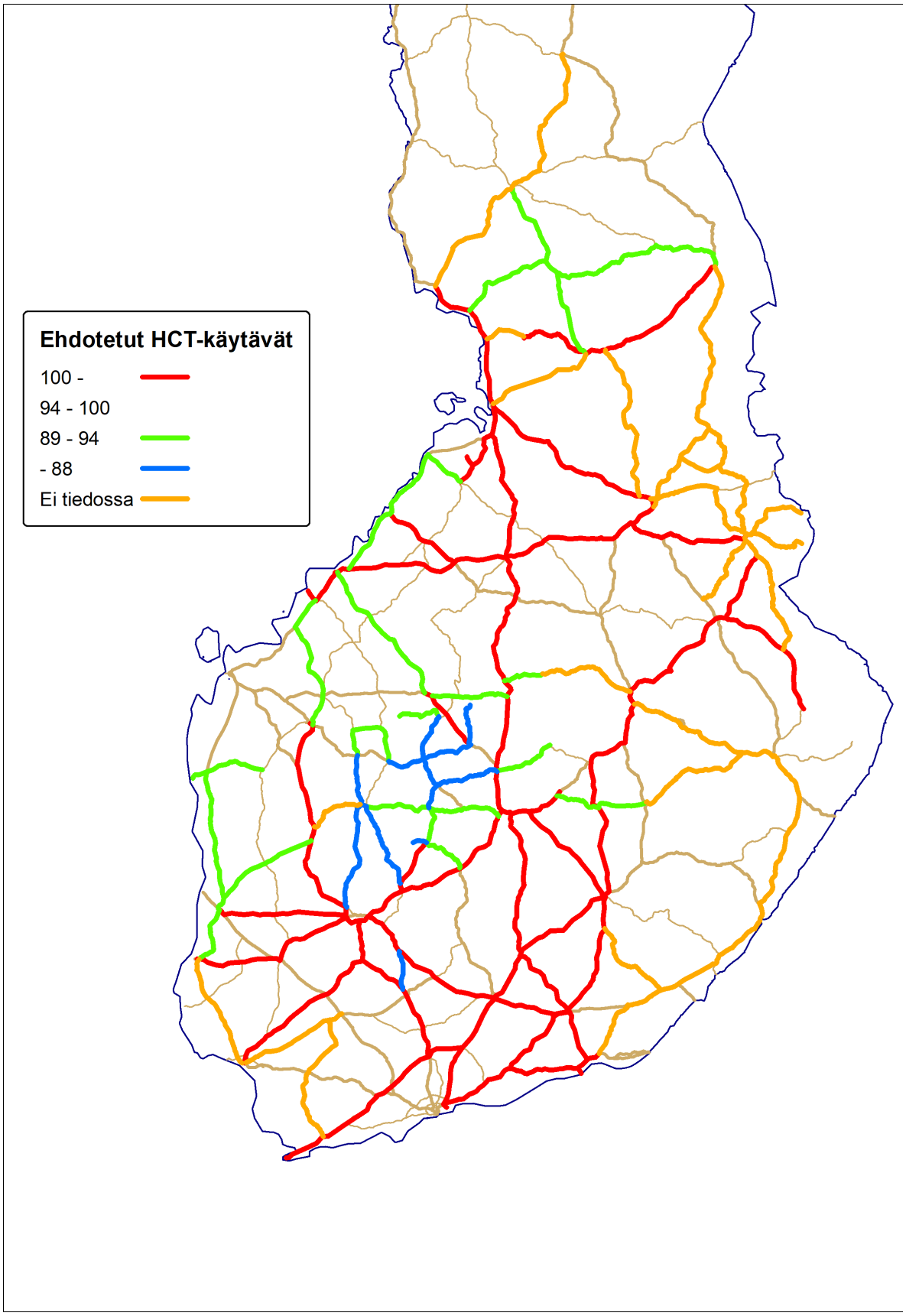
1. Metsästä lähtevät 84-tonniset yhdistelmät (P&A Trans, Malinen)
2. Rautatieterminaaleihin puuta syöttävät yhdistelmät (Ketonen)
3. Autoterminaalissa metsäautosta HCT-yhdistelmään siirrettävien puiden kuljetukset (Hannonen, Moilaspojat)
4. Sivutuotehaketta kuljettavat yhdistelmät (Huhtala, Wickström, Sammalisto, Konnekuljetus)
5. Tehtaiden välistä vaihtopuuta kuljettavat yhdistelmät (Orpe, Malmstedt).

Taulukko 11. Alustavia ehdotuksia puu- ja hakekuljetusten HCT-käytävien kriteereiksi (Venäläinen 2017).

HCT-käytävien osat

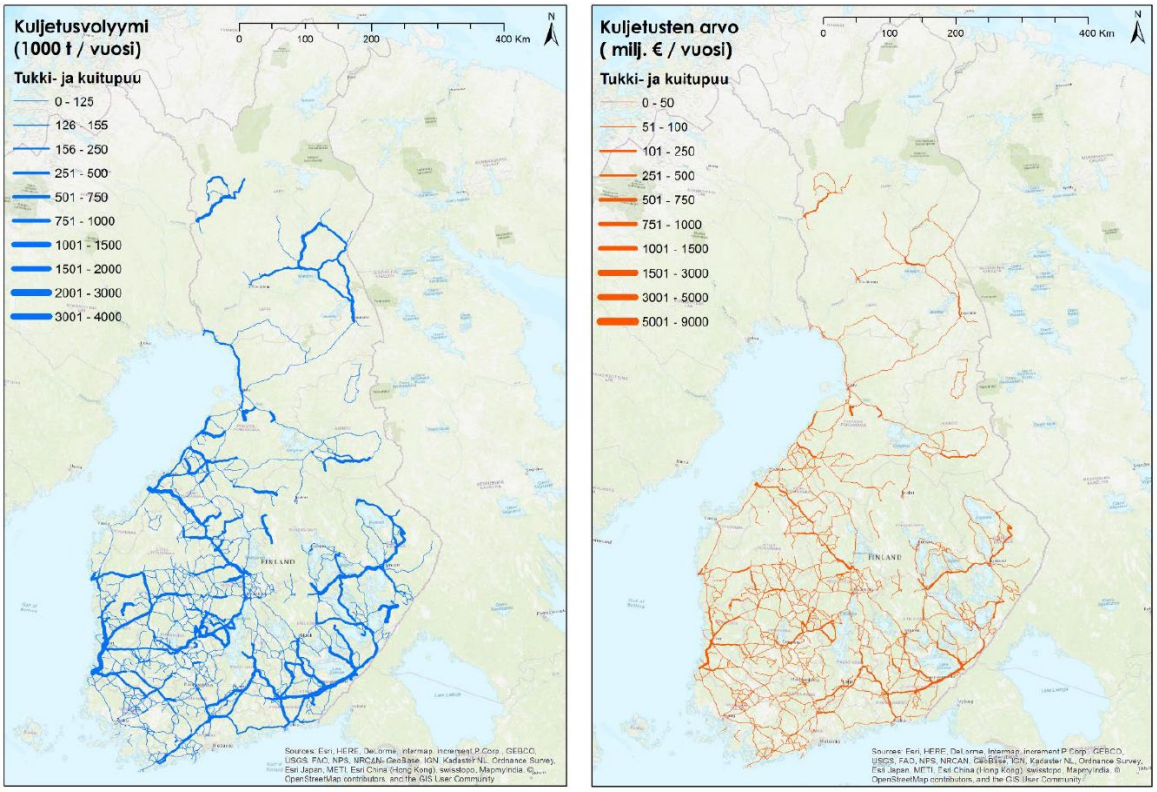
1. **Merkittävät aines- tai energiapuun käyttökohteet**
2. **Merkittävät aines- ja energiapuun käyttökohteiden ulkopuoliset terminaalit**
   - Rautatie-, vesi- ja tiekuljetusterminaalit
3. **Kotimaisen puun hankinta-alueiden keskeiset kuljetusyhteydet käyttökohteisiin**
4. **Osakäytävät**
   - Kuitupuukuljetukset terminaalista käyttökohteeseen
   - Tukkipuukuljetukset terminaalista käyttökohteeseen
   - Sivutuotepuukuljetukset sahoilta käyttökohteeseen
   - Energiapuukuljetukset terminaalista käyttökohteeseen
   - Täydentävät käytävät: esim. tehtaiden ja terminaalien väliset vaihdot (mepa)
5. **Tieinfrastruktuurin taso**
   - Lähtökohtana valta- ja kantatiet & pistot katuverkkoon
   - Tarvittaessa myös alemman tieverkon yhteys voi muodostaa osan HCT-käytävää
     - varsinkin jos yhteys välttää merkittävän lisämatkan ylempää tieverkkoa pitkin tai alueella ei ole rautatieyhteyttä.
     - heikosti kantavien sorateiden osalta käyttö voidaan rajata routakausiin
   - 84-tonnisten osalta nykyisin 76-tonnisille sallittu tieverkko
   - Suurten erikoiskuljetusten tieverkko
   - *Käynnissä oleva tie- ja siltarasitustutkimus tulee tarkentamaan tätä kriteeriä*

Metsäteollisuus ry:n jäsenkyselyssä ja Metsäteho Oy:n osakaskyselyssä metsäyhtiöt tunnistivat tarpeita eri kokoisten HCT-yhdistelmien kuljetusreiteille (kuva 37; kuvassa on esitetty korkein kullekin reitille esitetty kokoluokka). Kyselyissä tunnistettiin pyöreän puun, sivutuotehakkeen ja sahatavaran HCT-kuljetusreittejä. Yli 100-tonnisten yhdistelmien reitit kohdistuisivat pääosin valtateille, 89–94-tonnisten yhdistelmien reitit pääosin valta- ja kantateille ja maksimissaan 88-tonnisten yhdistelmien reitit kanta- ja seututeille. HCT-reittiehdotuksia ei ole verrattu ko. yhteyksien tie- ja siltainfrastruktuurin tasoon.

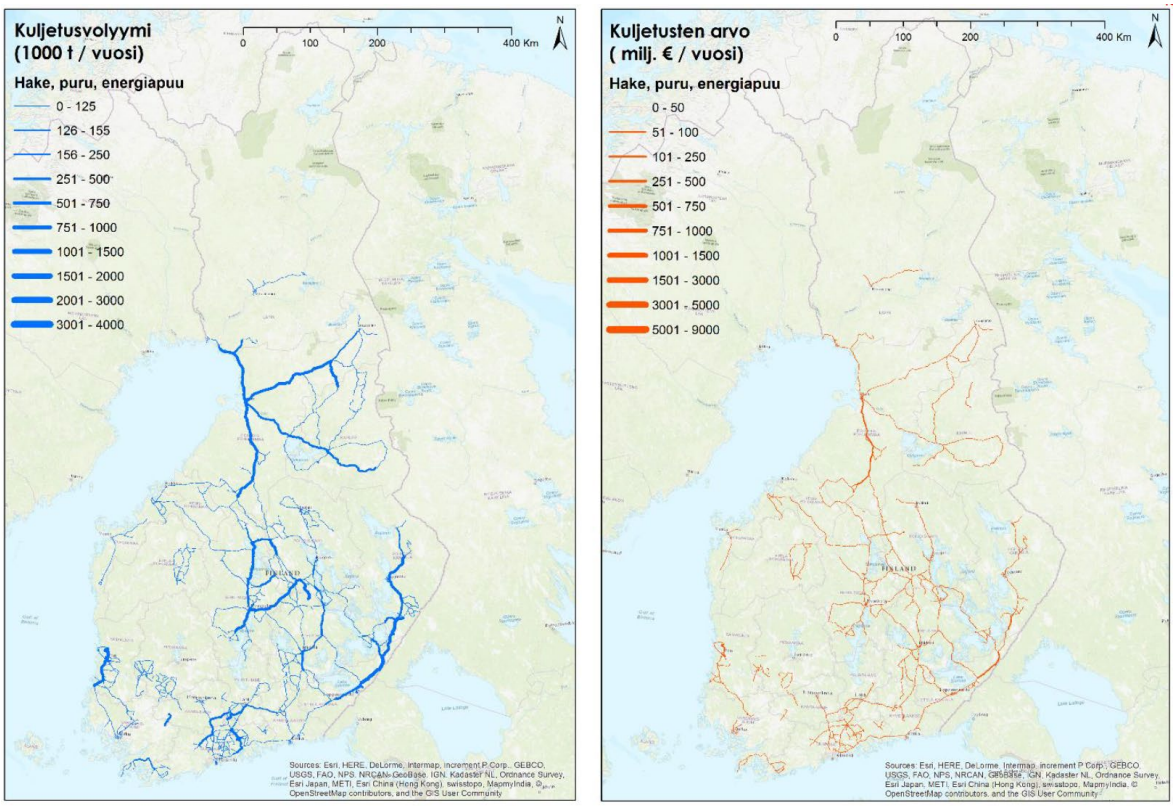


Kuva 37. Ehdotettuja HCT-reittejä raakapuun, sivutuotehakkeen ja sahatavaran kuljetuksiin (Metsäteollisuus ry:n ja Metsäteho Oy:n kyselyt metsäyhtiöille).
Lisäksi maksimissaan 84-tonnisille ehdotetaan tässä esitettyä laajempaa verkkoa (tarvittaessa olosuhteiden salliessa).

Ainespuun, hakkeen ja energiapuun kuljetusvirrat tieverkolla on esitetty kuvissa 38–39. Merkittäviä kuljetusvirtoja kohdistuu sekä tuotantolaitoksiin että rautateiden kuormauspaikoille.



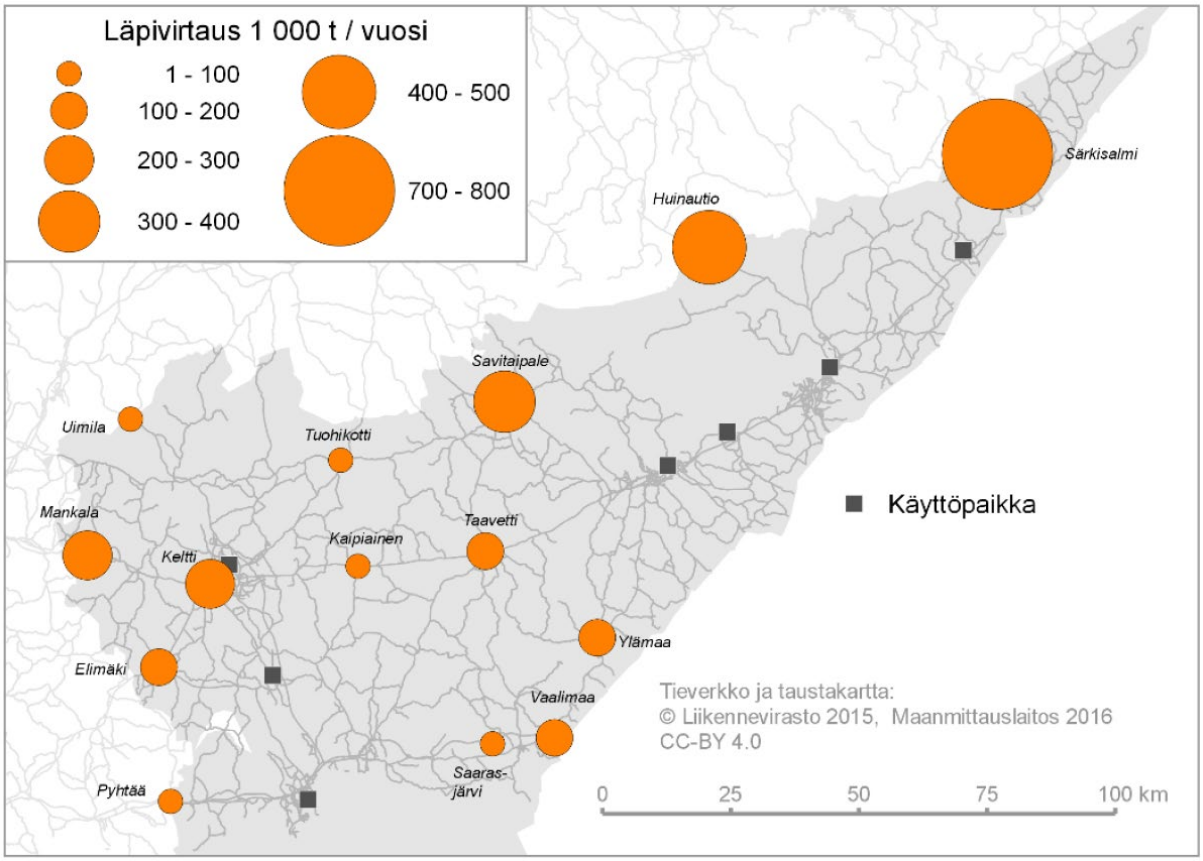
Kuva 38. Ainespuun kuljetusvirrat tieverkolla (Tilastokeskus lähteessä WSP Finland Oy 2017).



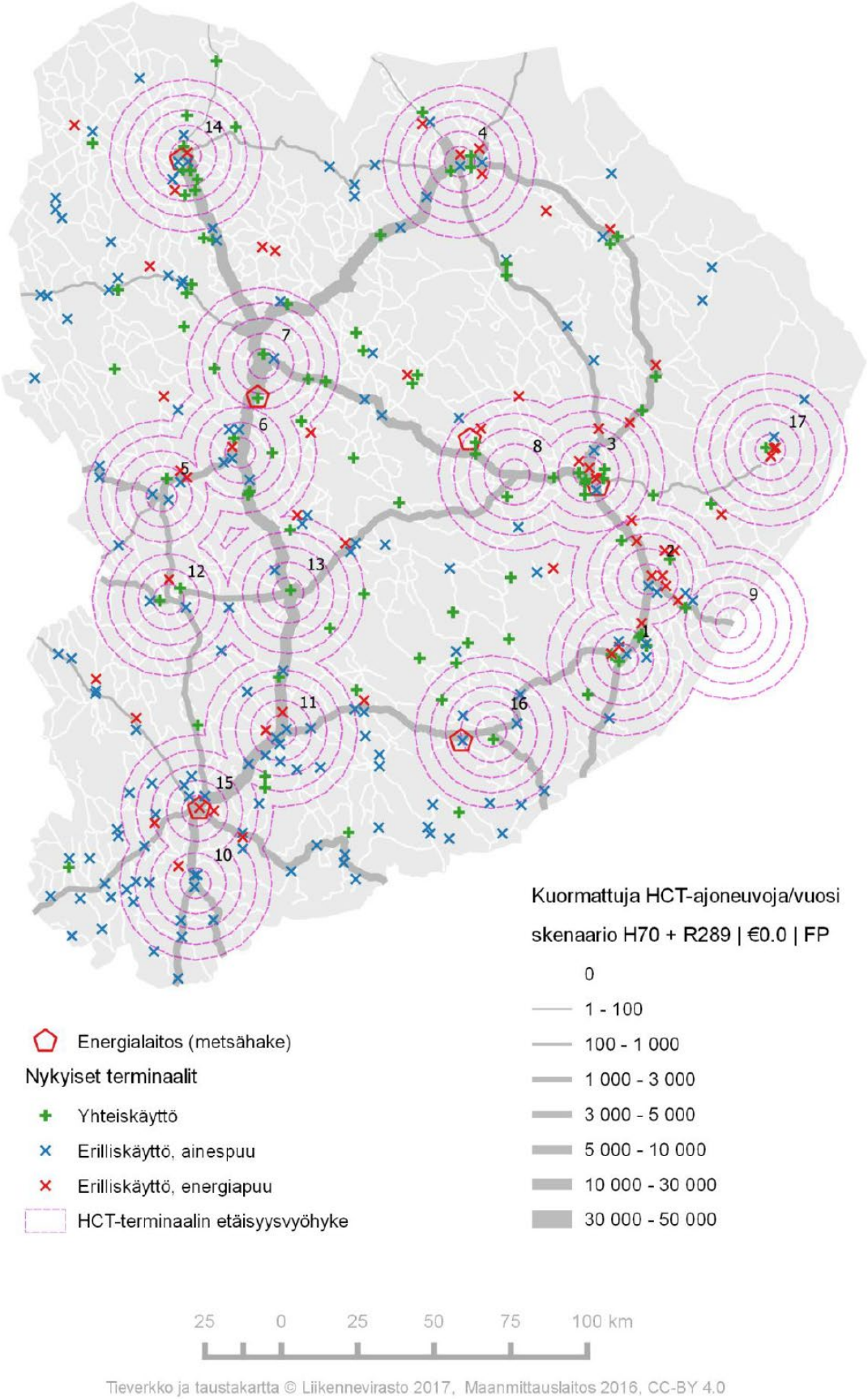
Kuva 39. Hakkeen, purun ja energiapuun kuljetusvirrat tieverkolla (Tilastokeskus lähteessä WSP Finland Oy 2017).

Puun siirto metsäautosta HCT-yhdistelmään voidaan toteuttaa varsinaisen tiekuljetusterminaalin lisäksi missä tahansa kuormauspaikassa, jossa joko:
a) voidaan lyhytaikaisesti säilyttää valmiiksi kuormattua perävaunua tai jalkalavaa,
b) voidaan varastoida puuta lyhyt- tai pitkäaikaisesti tai
c) kaksi yhdistelmää mahtuu yhtä aikaa siirtokuormauksen ajaksi.
Puun tiekuljetusterminaalien sijaintipaikkoja on koottu Suomen metsäkeskuksen (2019) karttapalveluun, joka vaatii vielä täydentämistä.

Lappeenrannan teknillisen yliopiston simulointitutkimuksissa (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2017 ja Korpinen & Aalto 2017) on tunnistettu tiekuljetusketjuihin sopivien HCT-terminaalien potentiaalisimpia sijoittumispaikkoja Kaakkois- ja Itä-Suomessa (kuvat 40-41). Tarkastelut indikoivat samalla potentiaalisten HCT-käytävien sijoittumista ko. alueilla. Tarkasteluita onkin tarpeen laajentaa muillekin alueille Suomessa.



Kuva 40. Kaakkois-Suomen puun käyttöpaikat ja HCT-terminaalien läpi virtaaman kuitupuun määrä skenaariossa, jossa on 30 HCT-ajoneuvoa, 86 metsäautoa, 14 terminaalia ja oletettu terminaalikustannus 0,50 €/t (Korpinen & Aalto 2017).



Kuva 41. Itä-Suomen HCT-kuljetusvirrat ja nykyiset puuterminaalit (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2017).

Yksittäisen tuotantolaitoksen ja kuljetusyrityksen näkökulmasta potentiaalisia HCT-käytäviä ovat ne, joita pitkin tehtaalle on säännöllisesti kuljetuksia. HCT-kuljetusten hyödyntämisen kannalta ehdoton vähimmäisvaatimus on, että yksittäistä käytävää pitkin kuljetetaan HCT-kuormia 1–2 HCT-yhdistelmän kapasiteetin verran (keskimäärin noin 85 000–170 000 kuutiota/vuodessa).

HCT-kuljetusten seurantajärjestelmät
Jotta HCT-kuljetukset rajoittuisivat vain HCT-käytäville, esillä on ollut HCT-yhdistelmien painojen ja reittien seuranta (Männistö 2018). Ruotsissa HCT-kuljetusten seurantaa onkin pohdittu jo pidemmälle (Asp ym. 2016). Puu- ja hakekuljetusketjuissa kuorman paino mitataan kuormainvaaoilla (tienvarsivarastot, kuljetusyritysten omat terminaalit) ja siltavaaoilla (tehtailta lähtevät sivutuote- ja vaihtopuukuljetukset). Kuormapainotietoja siirretään kuljetusketjussa mm. LogForce-järjestelmän avulla, joka olisi helposti muokattava ratkaisu myös viranomaisten painoja koskeviin tietotarpeisiin (Ovaskainen 2018). LogForce-järjestelmää on jo pilotoitu puun kuormapainojen reittikohtaisessa seurannassa Väyläviraston tarpeisiin (Mulju 2017).

3.8 Liikenneturvallisuus

Massojen noston osalta keskeisiä liikenneturvallisuutta koskevia tutkimusaiheita ovat olleet ajoneuvojen stabiliteetti, liikkuvuus, kiihtyvyys ja jarrutusmatkat. Ajoneuvojen pidentämisen osalta tutkimuksia on tehty koskien ajoneuvojen kääntyvyyttä ja muun liikenteen ohituskäyttäytymistä. Keskeisiä tuloksia koskien stabiliteettia, kääntyvyyttä ja ohituskäyttäytymistä on koottu ajoneuvojen pituuksien noston vaikutuksia koskevaan selvitykseen (Venäläinen 2019).

Oulun yliopiston tutkimuksessa (Pirnes ym. 2018) verrattiin 84- ja 104-tonnisten HCT-yhdistelmien luistoa, kiihtyvyyttä ja jarrutusmatkoja 76-tonniseen yhdistelmään (taulukot 12–14). Maantiellä talviolosuhteissa suoritetuissa tutkimuksissa yhdistelmien liikkuvuus (luisto) oli tavanomaisen liikenteen vaatimusten mukaista, vaikka luistoa havaittiin tietyissä tilanteissa. Suljetun alueen kokeissa 104-tonnisen kiihtyvyys 50 km/h:n ajonopeuteen talviolosuhteissa kesti 56 % kauemmin kuin 76-tonnisella yhdistelmällä. Jarrutusmatka oli 104-tonnisella noin 10 % pidempi kuin 76-tonnisella. Kesäolosuhteiden täysjarrutuskokeiden toteutus jouduttiin keskeyttämään puukuormien siirtymisriskin takia. Kummankaan HCT-yhdistelmän jarrutusstabiliteetissa ei havaittu ongelmia.

Taulukko 12. Tuloksia yhdistelmien liikkuvuutta ja kiihdytyksiä koskevista tutkimuksista talviolosuhteissa (Pirnes ym. 2018).

Yhdistelmän koko	Liikkuvuus (luisto)	Kiihdytys (0=>50 km/h)
84 t (P&A Trans tai Malinen)	Kuormattuna harvoin luistoa kiihdytystilanteessa. Hetkellistä luistoa lähinnä metsäautoteillä liikkeellelähdössä. Yleisempää oli vetävien pyörien luisto yhdistelmän ollessa kuormaamaton.	Ei mitattu
104 t (Ketonen)	Kuormattuna merkittävää, hetkellistä pyörien luistoa liikkeellelähdöissä ja satunnaisesti Magneettimäessä. Kuormaamattomana ei havaittu luistoa.	56 sek eli 56 % kauemmin kuin 76-tonnisella (jonka kiihdytys 36 sek)

Taulukko 13. Oulun yliopiston ensimmäisen kesäolosuhteiden jarrutuskokeen tuloksia (Pirnes ym. 2018).

Ajoneuvo-yhdistelmä	Aloitusnopeus [km/h]	Jarrutusmatka [m]	Keskimääräinen hidastuvuus [g] (huippuarvo)
104 t Ketonen	50	39	0,252 (0,45)
84 t P&A Trans	60	-	- (0,47)
76 t Ketonen	60	40	0,354 (0,41)
Lapin ammattiopisto	77	31	0,752

Taulukko 14. Oulun yliopiston toisen kesäolosuhteiden jarrutuskokeen tuloksia (Pirnes ym. 2018).

Ajoneuvo-yhdistelmä	Aloitusnopeus [km/h]	Jarrutusmatka [m]	Keskim. hidastuvuus [g] (huippuarvo)
104 t Ketonen	60	53	0,267 (0,71)
84 t P&A Trans	40	12	0,524 (0,58)
84 t P&A Trans	48	17	0,533 (0,58)

3.9 Työllisyysvaikutukset

Ajoneuvojen käyttöä tiellä koskeneen asetusmuutoksen taustamuistiossa (Valtioneuvoston asetus… 2018) on arvioitu suurempien yhdistelmien toisaalta parantavan työllisyyttä (teollisuuden kilpailukyvyn nousu ja siten kuljetusvolyymien kasvun kautta). Toisaalta tehokkaammat kuljetukset vähentävät kuljettajien tarvetta, mitä ei kuljettajapulan takia pidetä kuitenkaan ongelmana. Puutavarakuljetuksissakin uusien kuljettajien tarve ylittää alalle valmistuvien määrän, vaikka kuljettajien kokonaistarve ei kasvaisikaan (Strandström & Poikela 2016). Kuljetuksissa, joissa puukuorma siirretään metsäautoista HCT-yhdistelmiin, voidaan HCT-kuljetusosuudella hyödyntää kuljettajia, joilla ei ole metsäpään kuljetuskokemusta. Tämä lisää kuljettajaresurssien joustavaa hyödyntämistä.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET

Tämän raportin valmistumisvaiheessa liikenne- ja viestintäministeriö ei ollut tehnyt esitystä uusista ajoneuvojen massoista, joten selvitys tehtiin niiden massaluokkien osalta, joille on myönnetty puutavara- ja hakekuljetusten HCT-kokeilulupia. Luvat kattavatkin hyvin eri massaluokkia 84 ja 104 tonnin välillä. Kaikilla HCT-puutavara- ja hakeyhdistelmillä on nykyisin sallittua (76 tonnia) korkeampi paino. Pelkällä pituuksien nostolla saavutettaisiin puukuljetuksissa vain rajattuja hyötyjä.

Seuraaviin taulukoihin on koottu erikokoisten HCT-yhdistelmien vaikutuksia puutavara- ja hakekuljetuksissa. Vaikutusarviot ovat osin alustavia, koska uusimmilla HCT-yhdistelmillä tiedonkeruu jatkuu vielä polttoaineen kulutuksen ja kustannusten osalta. Myöskään tulokset viimeisimmistä tierasitustutkimuksista eivät olleet vielä käytettävissä. Tästä raportista tullaankin julkaisemaan päivitetty versio keväällä 2019.

Suuremmat ajoneuvoyhdistelmät vähentävät puutavarakuormien määrää 72 000–157 000:lla ja hakekuormien määrää 11 000–39 000:lla vuodessa. Kuljetuskustannukset vähentyisivät 12,1–36,0 milj. eurolla vuodessa. Kuljetusmatkasta ja puun siirtokuormausmenetelmästä riippuen puutavarakuljetuksissa kustannussäästö olisi 0,8–11,4 % per tuoretonni (100–300 km:n kuljetusmatka, joissakin tapauksissa matka oltava yli 100 km säästön saavuttamiseksi). Sivutuotehakekuljetuksissa kustannussäästö olisi 4,9–15,6 % (per m^3, 50–300 km:n kuljetusmatka) Polttoaineen kulutus laskisi puutavarakuljetuksissa 5,6–20,1 % (per tuoretonni, 100–300 km:n kuljetusmatka). Tässä raportissa esitetyt tulokset koskevat vain kokeiluluvan saaneita HCT-yhdistelmiä. Kokeiluiden yhteydessä on todennäköisesti syntynyt kehitysideoita, joilla yhdistelmistä saataisiin tässä esitettyä kustannustehokkaampia ja toimivampia.

Suurimpien HCT-puutavarayhdistelmien osalta kustannusvertailua hankaloittaa se, että ko. yhdistelmät edellyttävät metsästä saapuvan kuorman siirtokuormausta HCT-yhdistelmään. Tästä syntyy kuljetusketjuun lisäkustannuksia, mutta toisaalta terminaalivaiheella voidaan saavuttaa monia toimintavarmuus- ja muita hyötyjä, joiden kustannusvaikutuksia ei ole arvioitu. Sivutuotehakkeen, terminaalissa haketetun energiapuun ja tehtaiden välisen vaihtopuun kuljetuksissa suuria HCT-yhdistelmiä voidaan hyödyntää ilman siirtokuormauksesta syntyvää lisäkustannusta.

Liikenneturvallisuustutkimuksissa ei ole havaittu HCT-yhdistelmissä merkittäviä eroja nykyisiin yhdistelmiin nähden. Suuri osa HCT-yhdistelmistä simuloitiin niiden stabiliteetin osalta jo HCT-kokeiluluvan hakuvaiheessa.

HCT-yhdistelmien tierasitusvaikutuksia on jo tutkittu muutamassa selvityksessä, mutta parin julkaisemattoman tutkimuksen takia yhteenveto tuloksista esitetään tämän väliraportin sijasta myöhemmin valmistuvassa loppuraportissa. Puutavarakuljetusten tierasitusten vähentämiseksi on tässä raportissa kuvattu eri keinoja (esim. ajantasainen teiden kuljetuskelpoisuusluokitus, CTI, lisäpyörälliset perävaunut). Ko. keinoja käyttöönottamalla tierasitusta ja tievaurioita voidaan vähentää jo nykykokoisissa yhdistelmissä.

Taulukko 15. Yhteenveto HCT-yhdistelmien vaikutuksista puutavarakuljetuksissa (verrattuna 76-tonniseen yhdistelmään). Vaikutusarviot perustuvat raportin laatimishetkellä käytössä olleisiin tutkimusaineistoihin ja -tuloksiin.

Vaikutus	84M	84T	90T	92T	94T*	100T	104T
Ajot 1 000 kpl/v	−82	−72	−89	−81	−115	-137	−157
Kuljetuskustannukset milj. €/v	−18,1	−8,6/−9,2	LP	LP	+8,0	LP	−17,5
Kuljetuskustannukset per tuoretonni (100–300 km)	−7,5…−8,2 %	+3,9…−9,9 %	LP	LP	+10,9…−7,2 %	LP	+7,7…−11,4 %
Polttoaineen kulutus per tuoretonni (100–300 km)	−13,5…−14,8 %	−12,8…−20,1 %	LP	LP	−5,6…−14,0 %	LP	−8,5…−17,5 %
Tierasitus	Julkaisemattomien tutkimusraporttien takia yhteenveto tierasitustutkimuksista esitetään tämän väliraportin sijasta myöhemmin valmistuvassa loppuraportissa.						
Liikenneturvallisuus	*Liikkuvuus (luisto)*: Maantiellä talviolosuhteissa 104- ja 84-tonnisilla tavanomaisen liikenteen vaatimusten mukainen, vaikka luistoa havaittiin tietyissä tilanteissa *Kiihdytys*: 104-tonnisella 56 sek (eli 56 % kauemmin kuin 76-tonnisella) (Pirnes ym. 2018) *Stabiliteetin, kääntyvyyden ja muun liikenteen ohituskäyttäytymisen* osalta tutkimustuloksia on koottu ajoneuvojen pidentämistä koskevaan selvitykseen (Venäläinen 2019).						
Ajoneuvon kestävyys	104- ja 84-tonnisten vetolaitteiden aisavoimissa ei merkittäviä eroja 76-tonnisiin verrattuna. (Pirnes ym. 2018). Selvitys erikokoisten yhdistelmien korjaus- ja huoltotarpeista käynnistymässä vuoden 2019 aikana.						
Työllisyys	Kuljettajapulan takia HCT-yhdistelmillä ei arvioida olevan negatiivisia vaikutuksia autokuljettajien työllisyyteen.						

LP = laskelma puuttuu (lisätään myöhemmin valmistuvaan loppuraporttiin)

Taulukko 16. Yhteenveto HCT-yhdistelmien vaikutuksista hakekuljetuksissa (verrattuna 76-tonniseen yhdistelmään). Vaikutusarviot perustuvat raportin laatimishetkellä käytössä olleisiin tutkimusaineistoihin ja -tuloksiin.

Vaikutus	84H	85H	90H	91H	100H
Ajot 1 000 kpl/v	−18	−11	−28	−31	−39
Kuljetuskustannukset milj. €/v	−8,8	−3,5	LP	−13,6	−17,9
Kuljetuskustannukset per m^3 (50–300 km)	−4,9…−5,9 %		LP	−11,1…−12,1 %	−14,9…−15,6 %
Polttoaineen kulutus	LP	LP	LP	LP	LP
Tierasitus	Ei tutkittu erikseen, ks. puutavarayhdistelmiä koskeva taulukko				
Liikenneturvallisuus					
Ajoneuvon kestävyys					
Työllisyys					

LP = Laskelma puuttuu (lisätään myöhemmin valmistuvaan loppuraporttiin)

84-tonnisia metsäautoja on ollut ajossa Pohjois-Suomessa ja valmisteilla on hanke, jossa tutkittaisiin 84-tonnisten hyödyntämistä mahdollisimman laajasti soratieverkolla tien kantavuuden muutokset huomioon ottaen (varsinkin talvisin jäätyneet tiet). Päällystettyjen teiden osalta HCT-kuljetukset on ajateltu rajoitettavan vain tietyille HCT-reiteille. Näin taataan reittien sopivuus HCT-yhdistelmille ja toisaalta priorisoidaan tarvittavat infrastruktuuri-investoinnit yhteysväleille, joilla hyödyt HCT-yhdistelmille ovat suurimmat. Puutavara- ja hakekuljetusten osalta HCT-reitistöjä tarvitaan:

- HCT-terminaalien (ja muiden siirtokuormauspaikkojen) ja metsäsektorin tuotantolaitosten välille
- HCT-terminaalien ja suurimpien raakapuun rautatieterminaalien välille ja
- metsäsektorin tiettyjen tuotantolaitosten välille (vaihtopuu- ja sivutuotekuljetukset).

Selvityksen aikana tunnistettuja jatkotutkimustarpeita ovat:

- Mahdollisimman optimien (kustannuksiltaan, polttoainetaloudeltaan ja tierasitukseltaan) puutavara- ja hakeyhdistelmien tunnistaminen ja kehittäminen käyttökokeiluiden aikana saatujen kokemusten ja mahdollisten erillisten mallinnusten pohjalta. Optimit yhdistelmät tulee tunnistaa eri tilanteisiin ja eri kokoluokkiin (metsäautot, terminaaliyhdistelmät ja sivutuotehakeyhdistelmät).
- Tässä väliraportissa esitettyjen polttoaineen kulutuslaskelmien tarkistaminen uudella seurantadatalla.
- Selvitys yhdistelmien kokonaismassan vaikutuksista ajoneuvojen huolto- ja korjauskustannuksiin.
- Täydentävät tierasitustutkimukset (esim. mallia soratien palautumisajasta ei ole).
- Toimintamallit ja työkalut yhdistelmien massojen seurantaan mahdollisilla HCT-käytävillä (ml. vain talviajalle rajoitetut HCT-liikennöintialueet).
- Massojen nostoa rajoittavien siltojen tunnistaminen ja mahdolliset toimintamallit siltarasituksen vähentämiseksi (esim. välimatkat tai -ajat siltojen ylittämisessä HCT-kalustolla).
- Tierasitusta ja polttoaineen kulutusta vähentävien keinojen (CTI, hybridivetoautot yms.) vaikutusten tutkiminen HCT-kalustolla.
- Raakapuun ja hakekuljetusten HCT-käytävien toteutuksen priorisointi ottaen huomioon HCT-kuljetusten potentiaaliset hyödyt ja mahdollisten pullonkaulojen poistamisen kustannukset.
- Raakapuun HCT-terminaaliverkoston alueelliset tarkastelut jo tehtyjen tarkasteluiden lisäksi.
- Yhteenveto Ruotsin HCT-tutkimusten tuloksista.

Väylävirasto (Männistö 2019) on tunnistanut massojen nostoon liittyen seuraavia tutkimus- ja selvitystarpeita:

- tie- ja siltarasitusten analysointi eri kokonaispainoilla (ml. katurakenteiden kestävyys ja yksityistiet)
- reittivaihtoehtojen tarkastelut eri tyyppisille kuljetuksille ja korkeampien massojen tieverkon kattavuus
- ongelmasiltojen tunnistaminen
- ajoneuvotekniset vaatimukset
- reittien julkaisutapa käyttäjille
- massojen ja käytettyjen reittien seurantajärjestelmän tarpeellisuus
- kuljetusten kustannushyödyt
- potentiaaliset hyödyntäjät ja niiden volyymit.

LÄHTEET

Asp, T., Wandel, S., Olbäck, M. & Miller-Tiedemann, S. 2016. Kravspecifikation för Intelligent Tillträdeskontroll 74 ton. Saatavissa: https://closer.lindholmen.se/sites/default/files/content/resource/files/slutrapport_itk-projekt.pdf. [Viitattu 23.9.2018].

Bergqvist, M., Björheden, R. & Eliasson, L. 2016. Kompakteringseffekter på skogsbilvägar. Arbetsrapport från Skogforsk nr. 917–2016. Saatavissa: https://www.skogforsk.se/contentassets/2a1f59a536e54a2792c0d7dc7f46cd46/kompakteringseffekter-pa-skogsbilvagar-arbetsrapport-917-2016.pdf. [Viitattu 2.6.2018].

Korpilahti, A. 2015. Bigger vehicles to improve forest energy transport. Metsätehon tuloskalvosarja 3/2015. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/bigger-vehicles-to-improve-forest-energy-transport/. [Viitattu 29.12.2017].

Korpinen, O-J & Aalto, M. 2017.Optimoitu puuterminaaliverkosto. Teoksessa: Venäläinen, P., Aalto, M., Heljanko, E., Hilmola, O-P., Korpinen, O-J., Ovaskainen, H., Pesonen, M. & Poikela, A. Terminaalitoiminnot energiatehokkaassa puutavaralogistiikassa - T3 Uudet terminaalikonseptit ja -verkostot. Metsätehon raportti 242. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_242_Terminaalitoiminnot_energiatehokkassa_puutavaralogistiikassa_T3.pdf. [Viitattu 22.9.2018].

Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2017. Puutavaran terminaalipaikkojen simulointi Itä-Suomen alueelle. Saatavissa: https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/terminaaleista-tehoa-biotalouteen-hanke-liite-6-tutkimusraportti.pdf. [Viitattu 23.9.2018].

Lapp, T. & Iikkanen, P. 2017. HCT-ajoneuvojen liikennejärjestelmävaikutukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 57/2017. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2017-57_hct-ajoneuvojen_web.pdf. [Viitattu 4.1.2018].

Liikenne- ja viestintäministeriö. 2018. Valtioneuvoston asetusehdotus ajoneuvon käytöstä tiellä annetun asetuksen muutokseksi pidempien yhdistelmien sallimiseksi tiellä käytettäväksi. Muistio 13.7.2018.

Liikennevirasto. 2012. Liikenteen päästökustannukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2012. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lts_2012-23_liikenteen_paastokustannukset_web.pdf. [Viitattu 13.10.2017].

Liikennevirasto. 2018. HCT sillat ja tieverkko. Kalvosarja 17.1.2018. Saatavissa:https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1519726340/de337270a6b0fe1fd3e9d577a873d5e2/29672-HCT_tieverkon_kantavuus_Minna_Torkkeli_Livi.pdf. [Viitattu 8.1.2019].

Luonnonvarakeskus. 2017. Lämpö- ja voimalaitosten kiinteiden puupolttoaineiden käyttö metsäkeskusalueittain (1 000 m³). Tilasto. Saatavissa: http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__04%20Talous__10%20Puun%20energiakaytto/01_Laitos_ekaytto.px/?rxid=361231d8-67e0-4779-8fe6-e32c37d19617. [Viitattu 21.11.2017].

Luonnonvarakeskus. 2019. Teollisuuspuun kaukokuljetustavat ja keskikuljetusmatkat muuttujina kuljetustapa ja vuosi. Tilasto. Saatavissa: http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__08%20Muut__Teollisuuspuun%20korjuu%20ja%20kaukokuljetus/05.11_Teollisuuspuun_kaukokuljetustavat_kesk.px/?rxid=9ad548ba-c593-4cb0-8f31-2dbb34461cc8. [Viitattu 26.6.2019].

Löfroth, C. & Gelin, O. 2015. ETTaero – En förstudie av aerodynamisk utformning av skogsfordon. Saatavissa: https://www.skogforsk.se/contentassets/dd9d19187ead43cfb36a914417e5bffa/ettaero-en-forstudie-av-aerodynamisk-utformning-av-skogsfordon-arbetsrapport-870-2015.pdf. [Viitattu 3.6.2018].

Metsähallitus. 2018. Ekotehokkuutta puukuljetuksiin: Lappiin haetaan alueellista HCT-kokeilulupaa. Tiedote 2.5.2018. Saatavissa: http://www.metsa.fi/-/lappiin-haetaan-alueellista-hct-kokeilulupaa. [Viitattu 22.9.2018].

Metsäteho Oy & Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2017. Terminaalitoiminnot energiatehokkaassa puutavaralogistiikassa – Loppuraportti. Metsätehon tuloskalvosarja 2/2017. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/terminaalitoiminnot-energiatehokkaassa-puutavaralogistiikassa-loppuraportti/ . [Viitattu 29.12.2017].

Mulju, T. 2017. Puutavara-autojen tienkäyttötiedot – loppuraportti. Saatavissa: https://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/367242/Puutavara_autojen_tienk%C3%A4ytt%C3%B6tiedot_trimble/157eaf49-5ad0-42ae-9778-a7b64d1e02bc. [Viitattu 23.9.2018].

Männistö, V. 2018. Raskaan liikenteen mitta- ja massauudistus. Kalvosarja 16.8.2018.

Männistö, V. 2019. HCT-väylät 80-100 –tonnisille? - Tienpitäjän näkemyksiä. Julkaisematon kalvosarja 29.5.2019.

Oulun yliopisto. 2016. HCT-ajoneuvoyhdistelmän renkaiden kenttäseurannan kooste 19.12.2015–19.8.2016. Julkaisematon raportti 24.8.2016.

Ovaskainen, H. 2018. HCT-autojen seuranta. Julkaisematon kalvosarja 21.9.2018.

Pekkala, V. 2018. Tien rasitukset tieverkossa HCT- ja muiden puunkuljetusyhdistelmien vaikutusten vertailu. Loppuraportti 15.8.2018. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tien_rasitukset_tieverkossa_LOPPURAPORTTI_20180825_VPe.pdf. [Viitattu 27.8.2018].

Pekkala, V. & Haataja, M. 2018. HCT-yhdistelmien vaikutus soratien urautumiseen. Julkaisematon raporttiluonnos 23.5.2019

Pennanen O., Örn, J. & Väkevä, J. 2004. Puutavara-autojen polttoaineen kulutus. Metsätehon raportti 166. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_166.pdf. [Viitattu 13.10.2017].

Pirnes, V. & Haataja, M. 2018. HCT-puutavarayhdistelmien ajoseuranta- ja stabiliteettitutkimus – Vetoaisavoimamittaukset. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/vetoaisavoimamittaukset_eu_pohja.pdf. [Viitattu 27.8.2018].

Pirnes, V., Tuutijärvi, M-T & Haataja, M. 2018. HCT-puutavarayhdistelmien ajoseuranta- ja stabiliteettitutkimus - Yhdistelmien liikkuvuus ja ajovakaus. Oulun yliopisto 17.8.2018. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/hct_puutavarayhd_liikkuvuus_ajovakaus_eu_pohja.pdf. [Viitattu 27.8.2018].

Poikela, A. & Venäläinen, P. 2017. HCT-kuljetusketjut. Teoksessa: Venäläinen, P., Aalto, M., Heljanko, E., Hilmola, O-P., Korpinen, O-J., Pesonen, M. & Poikela, A. Terminaalitoiminnot energiatehokkaassa puutavaralogistiikassa – T3 Uudet terminaalikonseptit ja -verkostot. Metsätehon raportti 242. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/terminaalitoiminnot-energiatehokkaassa-puutavaralogistiikassa-t3-raportti242/. [Viitattu 2.6.2018].

Puumalainen, T. 2018. Yksityisteiden kuljetuskelpoisuusluokitus. Kalvosarja 27.9.2018.

Rahja, J. 2018. Ensimmäinen laatuaan – Kurssi yksityisteiden silloista. Tie&Liikenne 3/2018, sivu 42.

Sauna-aho, J., Koskinen, O. H., Sauna-aho, P. & Rivanti, T. 2018. HCT- ja normaaliajoneuvojen energiankäyttö, hiilidioksidipäästöt ja tiekuormitus – Loppuraportti. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 51/2018. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2018-51_hct_normaaliajoneuvojen_web.pdf. [Viitattu 28.11.2018].

Siekkinen, A. & Korpilahti, A. 2015. Rengaspaineiden säätö puutavara-ajoneuvoissa. Metsätehon tuloskalvosarja 13/2015. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2015_13_Rengaspaineiden_saato_puutavara_ajoneuvoissa_ak.pdf. [Viitattu 2.6.2018].

Strandström, M. 2017a. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2016. Metsätehon tuloskalvosarja 6/2017. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2017_06_Metsahakkeen_tuotantoketjut_2016.pdf. [Viitattu 5.1.2017].

Strandström, M. 2017b. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2016. Metsätehon tuloskalvosarja 1a/2017. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/puunkorjuu-ja-kaukokuljetus-vuonna-2016/. [Viitattu 29.11.2018].

Strandström, M. 2018. Ajoneuvoyhdistelmien kääntyvyys metsäteiden kääntymispaikoilla ja liittymissä. Metsätehon tuloskalvosarja 1/2019. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2019_01_Ajoneuvoyhdistelmien_kaantyvyys_metsateiden.pdf. [Viitattu 4.9.2019].

Strandström, M. & Poikela, A. 2016. Metsäalan työvoimatarve – Savotta 2025. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/metsaalan-tyovoimatarve-savotta-2025/. [Viitattu 2.12.2018].

Suomen metsäkeskus. 2019. PohjoisenPuunTiet-Hanke – Puuterminaalit kartalle. Internetsivu. Saatavissa: https://metsakeskus.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=9ad8e7509e0e4cb992f2c2bf783b93d6. [Viitattu 3.9.2019].

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 2017. Yksikköpäästötaulukoissa esitettyjen polttoaineiden tunnusluvut 2016. Internetsivusto. Saatavissa: http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tunnusluvut/tunnusluvuttie.htm. [Viitattu 3.9.2019].

Tilastokeskus. 2017. Keskimääräinen kuljetusmatka ja kuormausaste kotimaan liikenteessä tavaralajeittain vuonna 2016. Tilasto. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/kttav/2016/kttav_2016_2017-04-28_tau_010_fi.html. [Viitattu 2.12.2018].

Tilastokeskus. 2019. Tieliikenteen tavarankuljetukset – Taulukot. Tilastosivu. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/kttav/tau.html. [Viitattu 4.9.2019].

Toivonen, T. 2016. BIFI-projektin laajennus - Sorateiden pintakelirikon tunnistaminen. Liikenneviraston raportti.

Traficom. 2019. Pidemmät ja raskaammat HCT-rekat. Internetsivusto. Saatavissa: www.https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/pidemmat-ja-raskaammat-hct-rekat. [Viitattu 12.4.2019].

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja – Energia 4/2017. Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/79189. [Viitattu 13.10.2017].

Valtioneuvoston asetus Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta - Vaikutustenarviointi. Saatavissa: http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/tris/fi/search/?trisaction=search.detail&year=2018&num=477. [Viitattu 4.9.2019].

Venäläinen, P. 2017. HCT-kuljetuskäytävät. Teoksessa: Venäläinen, P., Aalto, M., Heljanko, E., Hilmola, O-P., Korpinen, O-J., Ovaskainen, H., Pesonen, M. & Poikela, A. Terminaalitoiminnot energiatehokkaassa puutavaralogistiikassa - T3 Uudet terminaalikonseptit ja -verkostot. Metsätehon raportti 242. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_242_Terminaalitoiminnot_energiatehokkassa_puutavaralogistiikassa_T3.pdf. [Viitattu 22.9.2018].

Venäläinen, P. 2019. Puutavara- ja hakeajoneuvojen pidentämisen vaikutukset – Täydennetty versio. Metsätehon raportti 246. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Metsatehon_raportti_246_Puutavara_ja_hakeajoneuvojen_pidentamisen_vaikutukset.pdf. [Viitattu 8.1.2019].

Venäläinen, P., Poikela, A. & Strandström, M. 2019. Puun korjuun ja kuljetusten päästöt. Julkaisematon kalvosarjaluonnos.

Virtala, P., Pirnes, V. & Pitkänen, P. 2018. Perävaunun aiheuttaman tierasituksen pienentäminen uudella akselistoratkaisulla. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 55/2018. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2018-55_peravaunun_aiheuttaman_web.pdf. [Viitattu 18.1.2019].

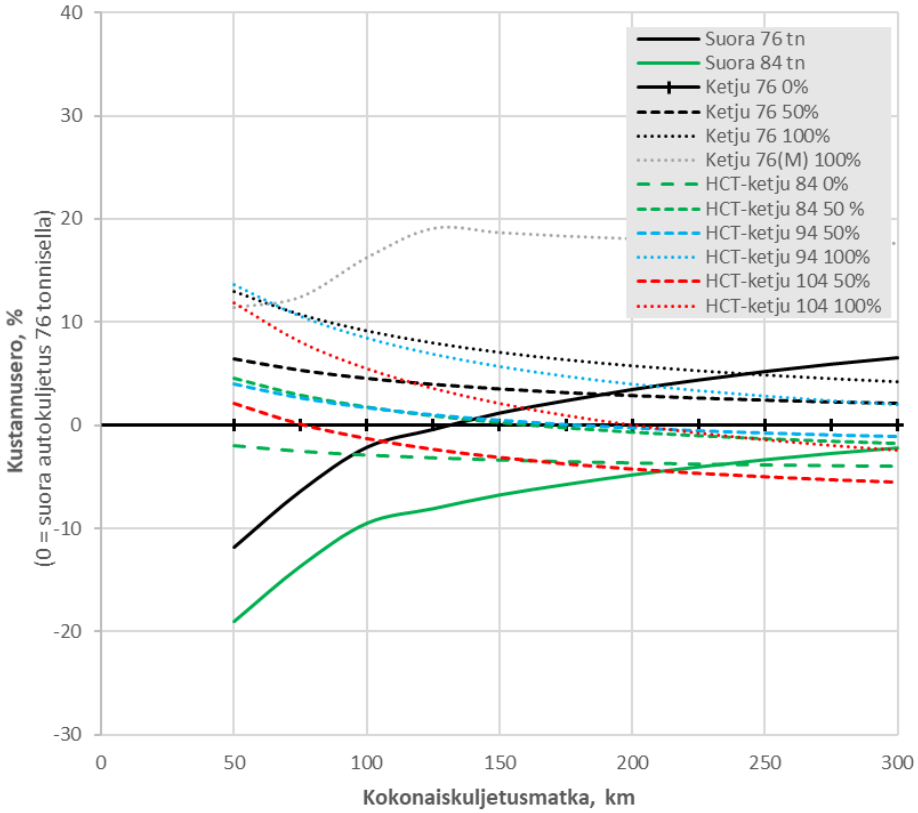
Vuorimies, N., Kalliainen, A., Rossi, J., Kurki, A., Kolisoja, P., Varin, P. & Saarenketo, T. 2018. Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015–2017. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 63/2018. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2018-63_tierakenteen_rasittuminen_web.pdf. [Viitattu 8.1.2019].

Väylä. 2019. Säädettävät rengaspaineet mahdollistavat puukuljetukset myös kelirikkoaikaan. Saatavissa: https://vayla.fi/-/saadettavat-rengaspaineet-mahdollistavat-puukuljetukset-myos-kelirikkoaikaan#.XDR9LVwzZaR. [Viitattu 8.1.2019].

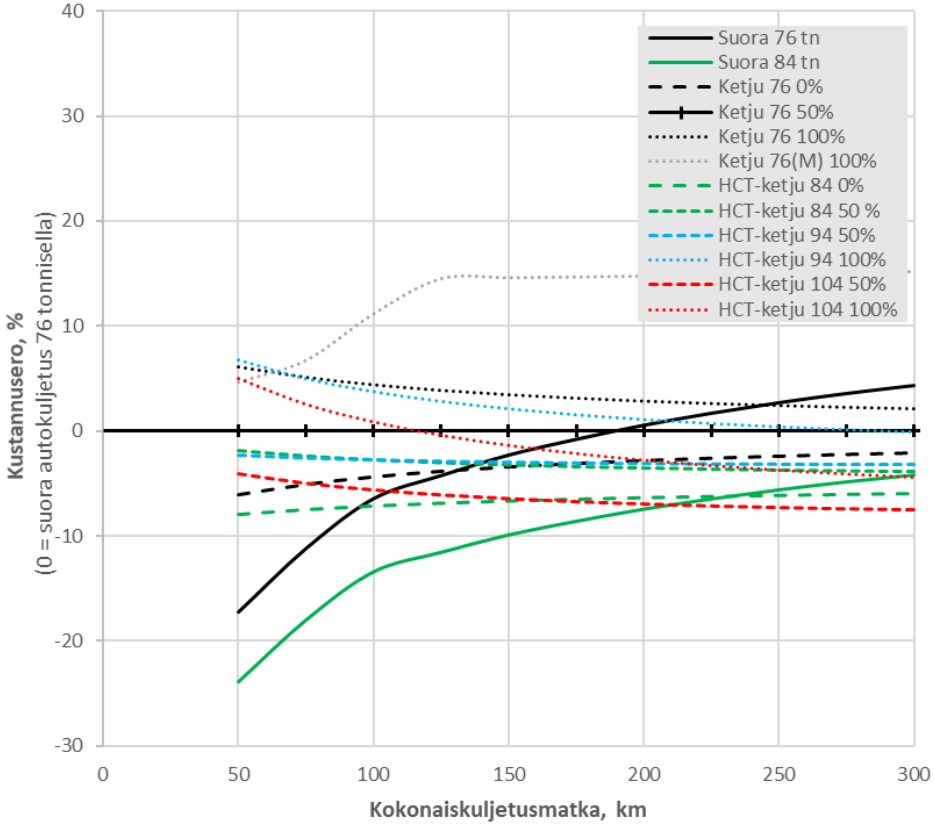
WSP Finland Oy. 2017. Elinkeinoelämän kuljetukset tieverkolla – volyymi- ja arvoanalyysi. Saatavissa: https://kauppakamari.fi/wp-content/uploads/2017/12/elinkeinoelaman-kuljetukset-tieverkollavolyymi-ja-arvoanalyysiwsp-finland.pdf. [Viitattu 21.5.2018].

Liite 1. Kuljetuskustannusten vertailu 1

Vertailukohteena Ketju 76 0 % (kaikki kuorma valmiiksi lastattuna perävaunuun ja jalkalavaan)

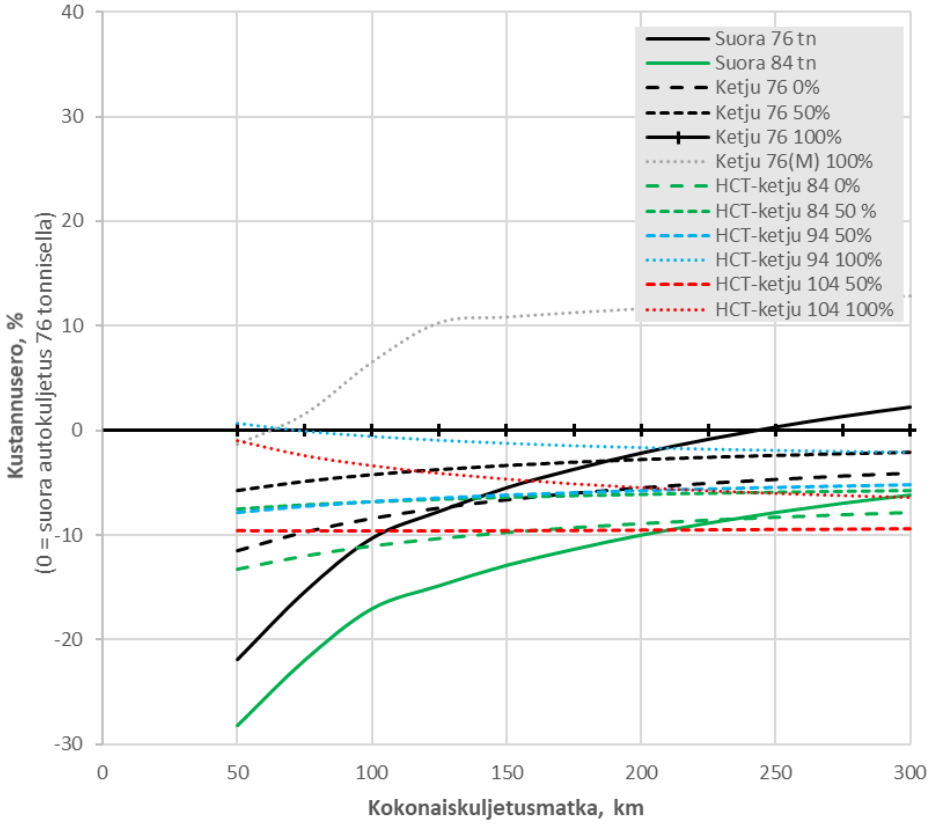


Vertailukohteena Ketju 76 50 % (puolet kuormasta valmiiksi lastattuna perävaunuun)

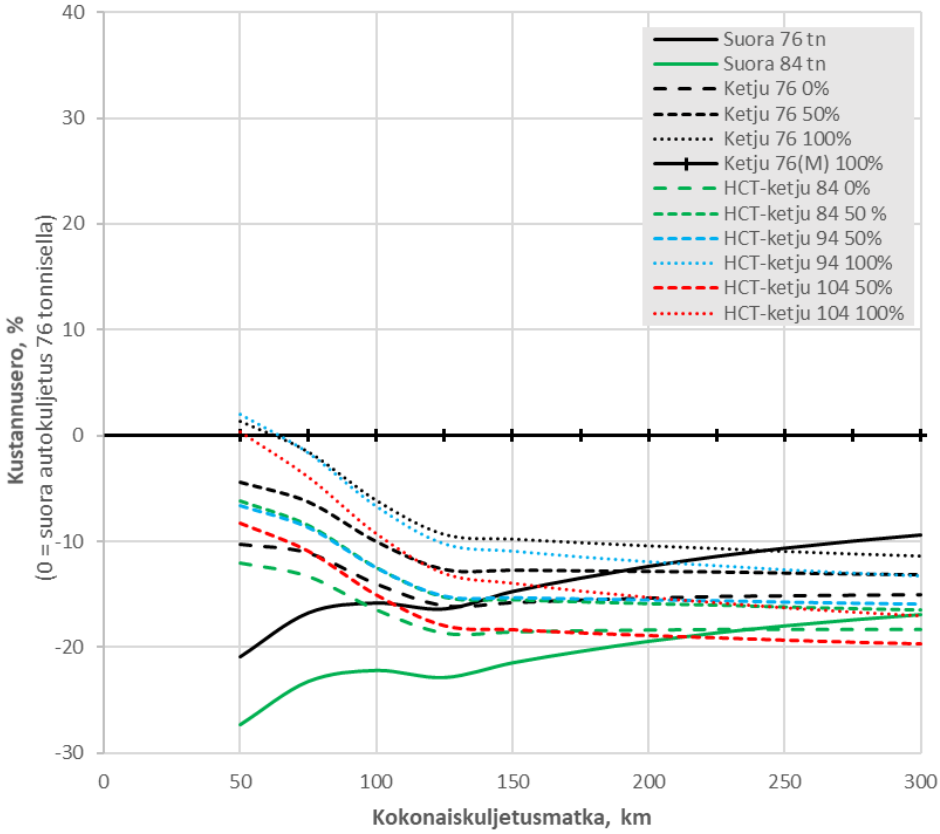


Liite 1. Kuljetuskustannusten vertailu 2

Vertailukohteena Ketju 76 100 % (terminaaliauto, siirtokuormaus kokonaan maan kautta)

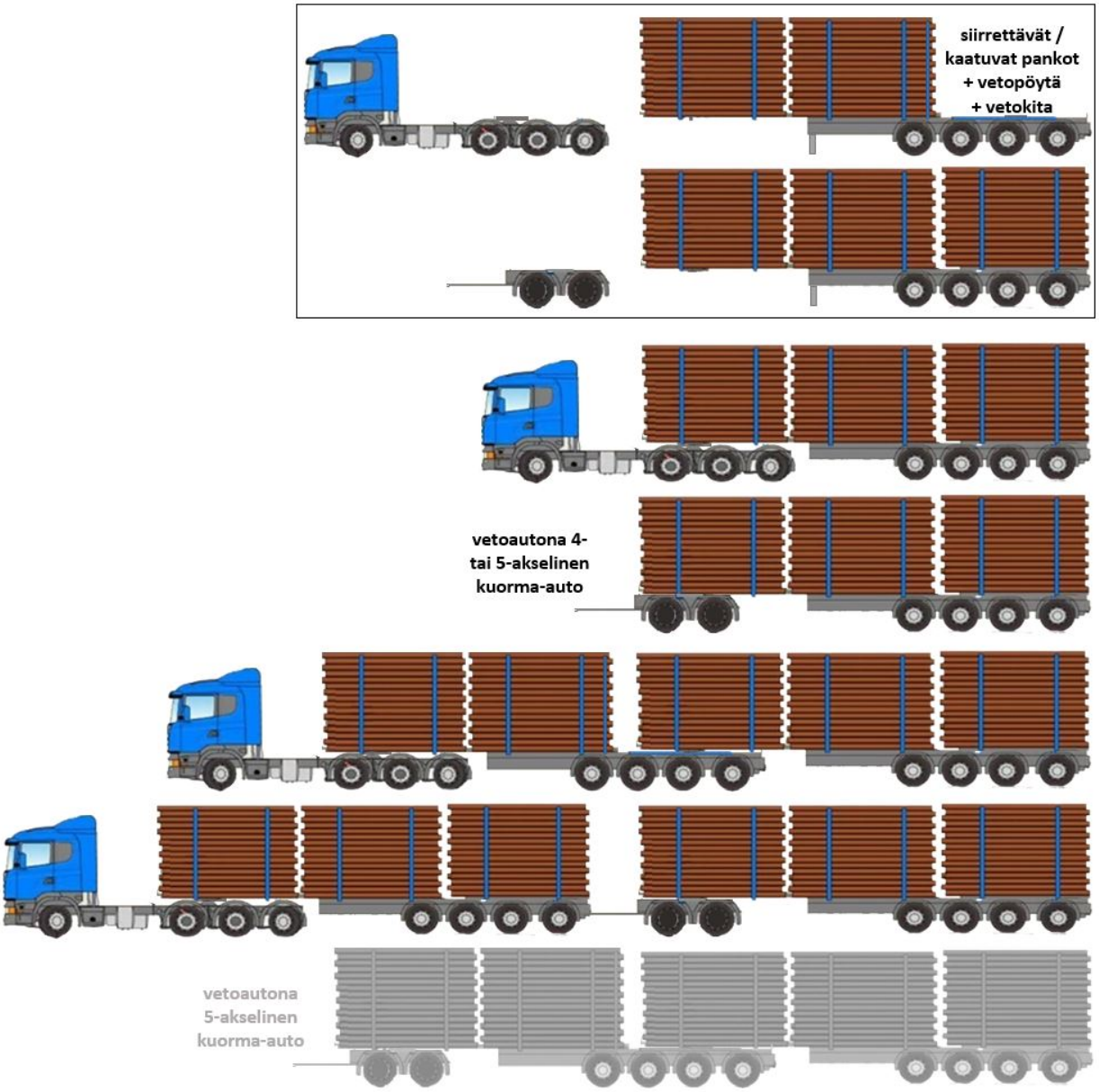


Vertailukohteena Ketju 76 100 % (metsäauto, siirtokuormaus kokonaan maan kautta)



Liite 2. Yhdistelmien polttoaineen kulutuksen seurantajaksot.

Ketonen[T]	**Verrokki[M]**	**Orpe[T] (94 t)**	**Orpe[T] (100 t)**	**Verrokki[T]***
7.10.2015-30.9.2016	1.3.2014-28.2.2015	1.10.2015-30.9.2016*	*	1.10.2015-30.9.2016
Hannonen[T]	**Verrokki[T]**	**P&A Trans[M]**	**Verrokki[M]**	
13.6.2016-31.5.2017	13.6.2016-25.11.2016	1.6.2016-14.6.2017	22.8.2016-10.8.2017	
Malinen[M]	**Verrokki[M]**	**Moilaspojat[T]**	**Malmstedt[T]**	
1.1.2017-31.7.2017	24.1.2017-4.12.2017	4.5.2018-*	**	
Huhtala[H]	**Verrokki[HA]**	**Verrokki[HB]**	**Wickström[H]**	**Verrokki[H]**
1.5.2017-10.4.2018	19.6.2017-28.11.2017	*	1.7.2017-4.6.2018	3.7.2017-6.3.2018
Sammalisto[HA]	**Sammalisto[HB]**	**Verrokki[HA*]**	**Verrokki[HB]**	**Konnekuljetus[H]**
12.1-31.12.2018	19.12.2017-31.12.2018	14.12.2017-31.12.2018	15.12.2017-31.12.2018	3.9.2018-*

**Seuranta käynnissä*
***Erillinen opinnäytetyö käynnissä*

Liite 3. Yhteen muunneltavaan perävaunutyyppiin perustuva HCT-konsepti.