Metsätehon raportti 258
(aiheen 2. väliraportti)
18.11.2020

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 258 (aiheen 2. väliraportti)
18.11.2020

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 AJONEUVOYHDISTELMÄT **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 27
3.5.1 Vetolaitteet 27
3.5.2 Renkaat 28
3.6 Polttoaineen kulutus ja päästöt 30
3.6.1 Polttoainekulutukseen vaikuttavat tekijät ja tietojen keruu 30
3.6.2 Kuljetusreitin vaikutus polttoaineen kulutukseen 33
3.6.3 Polttoaineen kulutusfunktiot 35
3.6.4 Kuljetusten polttoaineen kulutusvertailut 36
3.6.5 Ajovastusmittauksiin perustuvat kulutus- ja päästölaskelmat 40
3.6.6 Valtakunnalliset kulutus- ja päästölaskelmat 41
3.7 Tie- ja siltarasitus 45
3.7.1 Tiet 45
3.7.2 Keinoja vaikuttaa tierasitukseen 54
3.7.3 Sillat 56
3.7.4 HCT-käytävät ja -terminaalit 58
3.8 Liikenneturvallisuus 65
3.9 Työllisyysvaikutukset 66

4 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET **68**

LÄHTEET **73**

LIITTEET

TIIVISTELMÄ

Suomessa on ollut käynnissä HCT-yhdistelmien kokeiluita. Tässä toisessa väliraportissa on kuvattu kokonaismassojen noston vaikutuksia puutavara- ja hakekuljetuksissa. Selvitys pohjautuu sen laatimisvaiheessa käytettävissä oleviin tutkimustuloksiin ja -aineistoihin. Tämä raportti täydentää ja päivittää 16.9.2019 valmistuneen väliraportin tuloksia. 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). Tämänhetkisten laskelmien mukaan HCT-yhdistelmät vähentäisivät vuosittain jopa 102 000–224 000 puutavara- ja 12 000–42 000 hakekuormaa 76-tonnisiin yhdistelmiin verrattuna. Kuljetuskustannukset vähentyisivät 17,8–82,7 milj. € vuodessa (puutavarakuljetuksissa 0,8–11,4 % per m^3 100–300 km:n kuljetusmatkalla ja hakekuljetuksissa 4,9–14,5 % 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) ja hakekuljetuksissa 6,5–16,4 % (per tuoretonni 50–300 km:n kuljetusmatkalla).

Tierasitustutkimusten mukaan suuretkaan HCT-yhdistelmät eivät lisää paksupäällysteisten teiden uraantumista. Ohutpäällysteisistä teistä paksuimmilla tierasitus ei kasvane, mutta erikokoisille HCT-yhdistelmille soveltuvien teiden määrittäminen vaatii tarkentamista. Myös sorateiden ja siltojen osalta lisätutkimus on tarpeen.

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

Yli 76-tonniset 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) (2020) kokeilulupa. Tässä raportissa HCT-yhdistelmät ovat yli 76 tonnia painavia ja/tai yli 25,25 metriä pitkiä. Ajoneuvojen pidentämisen salliva asetusmuutos tuli voimaan 21.1.2019[1].

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli arvioida ajoneuvojen massojen noston vaikutuksia puutavaran ja hakkeen kuljetuksiin. Raportti täydentää Metsäteho Oy:n selvitystä (Venäläinen 2019), jossa on tarkastelu ajoneuvojen pituuksien noston vaikutuksia. Lisäksi tähän raporttiin on tarkistettu ja täydennetty aiemmassa raportissa esitettyjä laskelmia. Tämä toinen väliraportti kuvaa tuloksia sen aineiston pohjalta, joka oli käytettävissä kesään 2020 mennessä. Raportti korvaa edellisen, 16.9.2019 julkaistun ensimmäisen väliraportin. Seuraava raporttiversio julkaistaan viimeistään syksyllä 2021.

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

Väyläviraston 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 vietiin uuteen 1.6.2020 voimaan astuneeseen tieliikennelakiin.

2 TUTKITUT KULJETUSVIRRAT JA AJONEUVOYHDISTELMÄT

2.1 Kotimaisen puutavaran ja hakkeen autokuljetukset

HCT-yhdistelmien valtakunnallisten vaikutusten arvioinnissa on käytetty vuoden 2018 suorien autokuljetusten volyymeja ja keskikuljetusmatkoja (taulukko 1). Metsäteollisuus käytti vuonna 2018 noin 60 milj. m^3 (noin 47 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 12,8 milj. m^3 (Strandström 2019b). Lämpö- ja voimalaitokset käyttivät 20 milj. m^3 kiinteitä puupolttoaineita (ml. pelletit ja kierrätyspuu) (Luonnonvarakeskus 2020a).

Taulukko 1. Kotimaisen puun autokuljetusten määrät ja keskikuljetusmatkat vuonna 2018 (Metsäteollisuus ry 2020, Strandström 2019a ja b, Lapp & Iikkanen 2017, Luonnonvarakeskus 2020a-c, Tilastokeskus 2020, Ylitalo 2017).

2018	Metsäteollisuus		Lämpö- ja voimalaitokset (ml. metsäsektorin tuotantolaitoksilla)			
	Ainespuu	**Sivutuote**	**Metsähake**	**Kuori**	**Puru**	**Puutähdehake**
autokuljetus, 1 000 t/v	44 067,0	2 520,7	2 045,3	2 488,9	726,3	322,3
autokuljetus, 1 000 m^3/v	51 705,0	7 953,1	7 021,0	7 658,0	2 571,0	1 073,0
ka. kuljetusmatka autolla, km	105	110	60	60	60	60

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

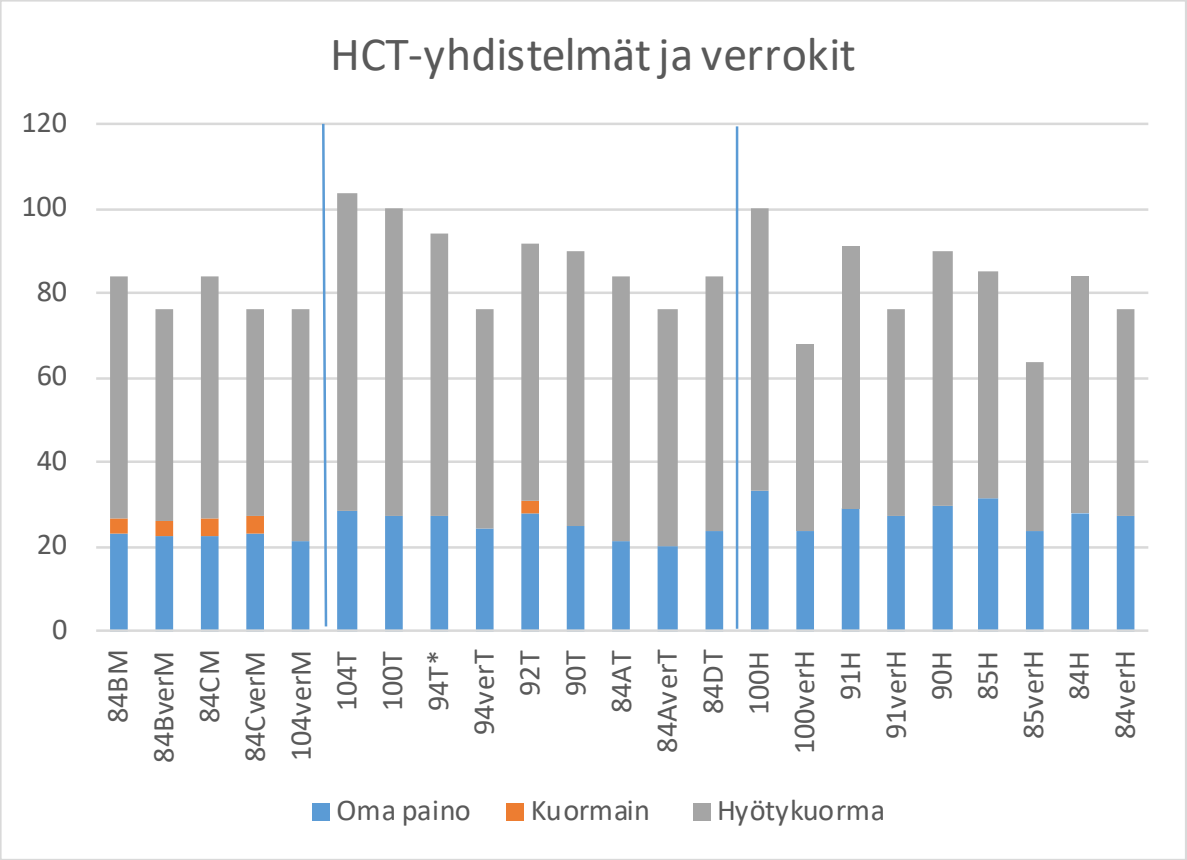
Puukuljetusten lisäksi merkittäviä metsäsektorin autokuljetusvolyymeja muodostavat tuotekuljetukset[2] (ks. WSP Finland Oy 2017) ja muut raaka-ainekuljetukset (esim. erilaiset kemikaalit).

2.2 Tutkitut HCT- ja verrokkiyhdistelmät

Selvityksessä on tarkasteltu vain niitä yhdistelmäratkaisuita, joita HCT-kokeilussa on ollut mukana. Lisäksi Metsäteho Oy:llä on käynnissä haastattelututkimus, jossa kartoitetaan kokeiluihin osallistuneiden kuljetusyritysten ja metsäyhtiöiden näkemyksiä HCT-kuljetuksiin soveltuvimmista yhdistelmistä (ml. kokeiluista puuttuvat yhdistelmätyypit tai kokeiluyhdistelmistä hieman poikkeavat yhdistelmät).

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.



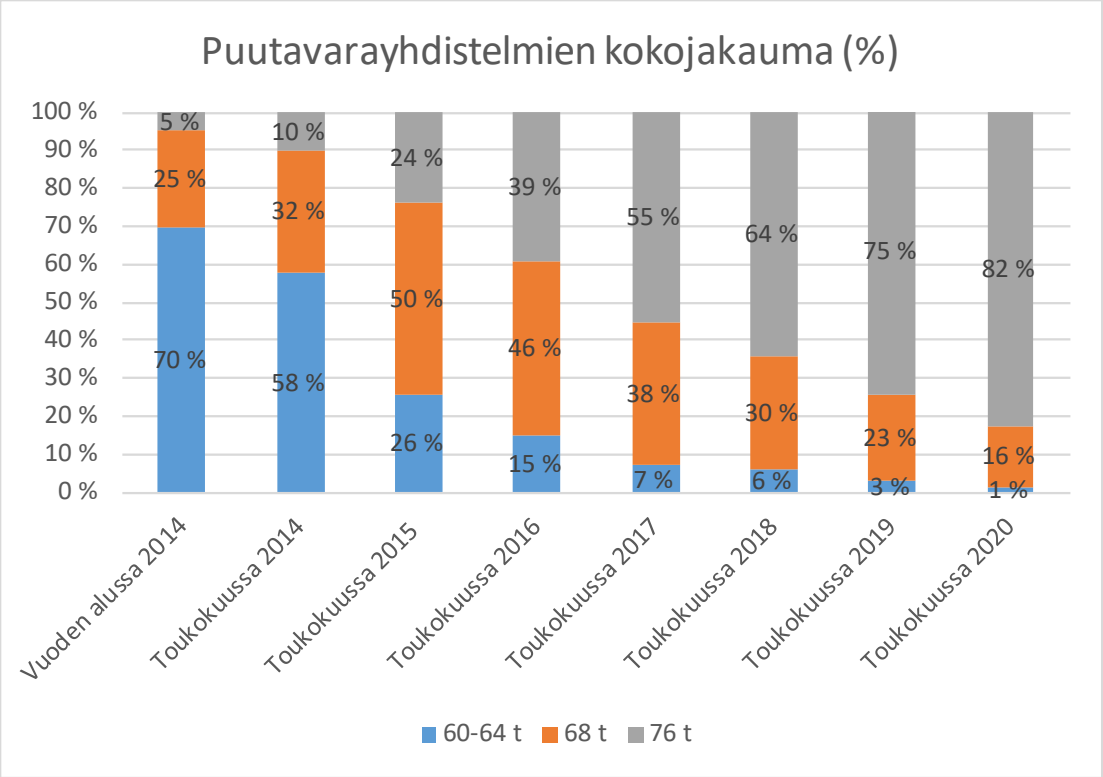
Kuva 1. Tutkittujen HCT- ja verrokkiyhdistelmien omat ja kokonaispainot.
**Suunniteltu kokonaispaino 100 tonnia
M = metsäauto, T = terminaaliauto, H = hakeauto, ver = verrokkiauto
Metsäautot, joille ei ole merkitty kuormaimen painoa, ajavat pääosin ilman kuormainta

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).
- 84,5-tonnisten hakeautojen luvut muodostettiin keskiarvotuloksina 84-tonnisen ja 85-tonnisen yhdistelmän lukemista.

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

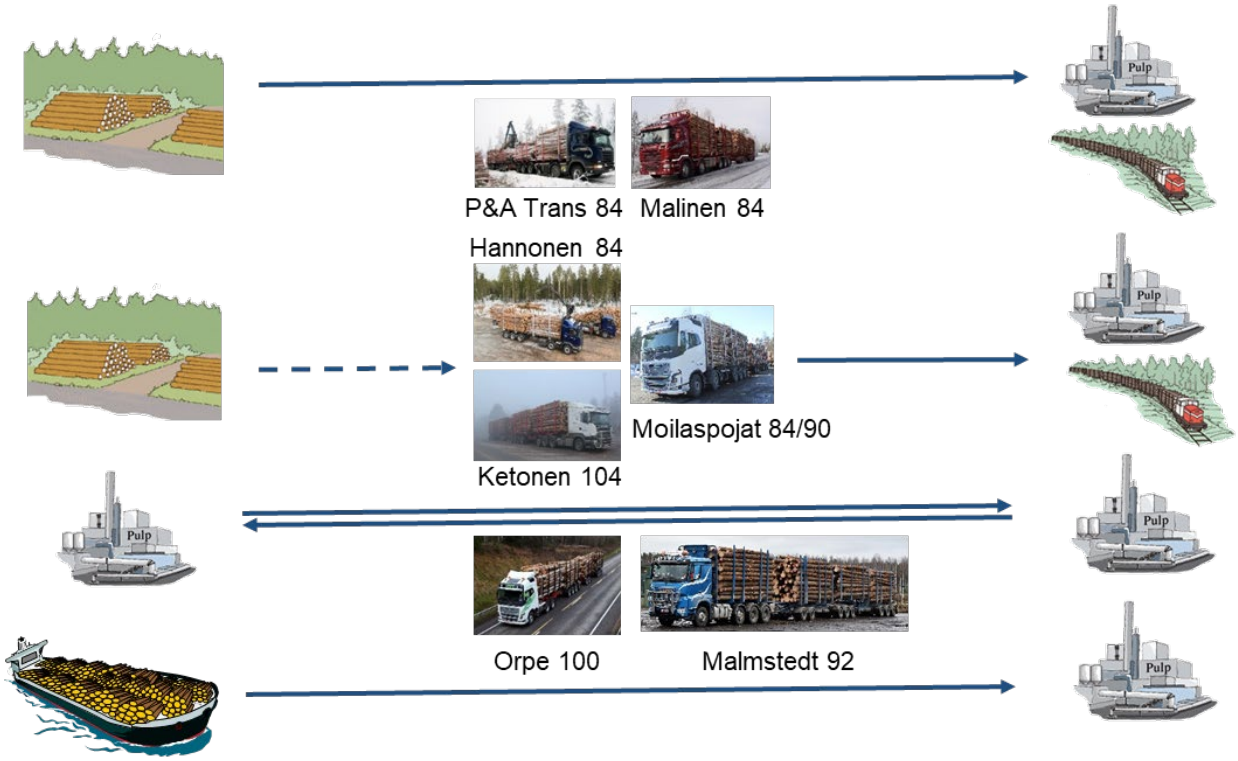
Verrokkeina laskelmissa käytettiin HCT-yhdistelmien kanssa samoilla reiteillä tai vähintään samoilla alueilla ajavia yhdistelmiä. Puutavarayhdistelmien kaikki verrokit ovat 76-tonnisia, jotkakattavatkin nykyisin suurimman osan kotimaisen puutavaran autokuljetuksista (kuva 2). Tarkemmissa laskelmissa mukana olevat hakeyhdistelmien verrokit ovat 68- ja 76-tonnisia.



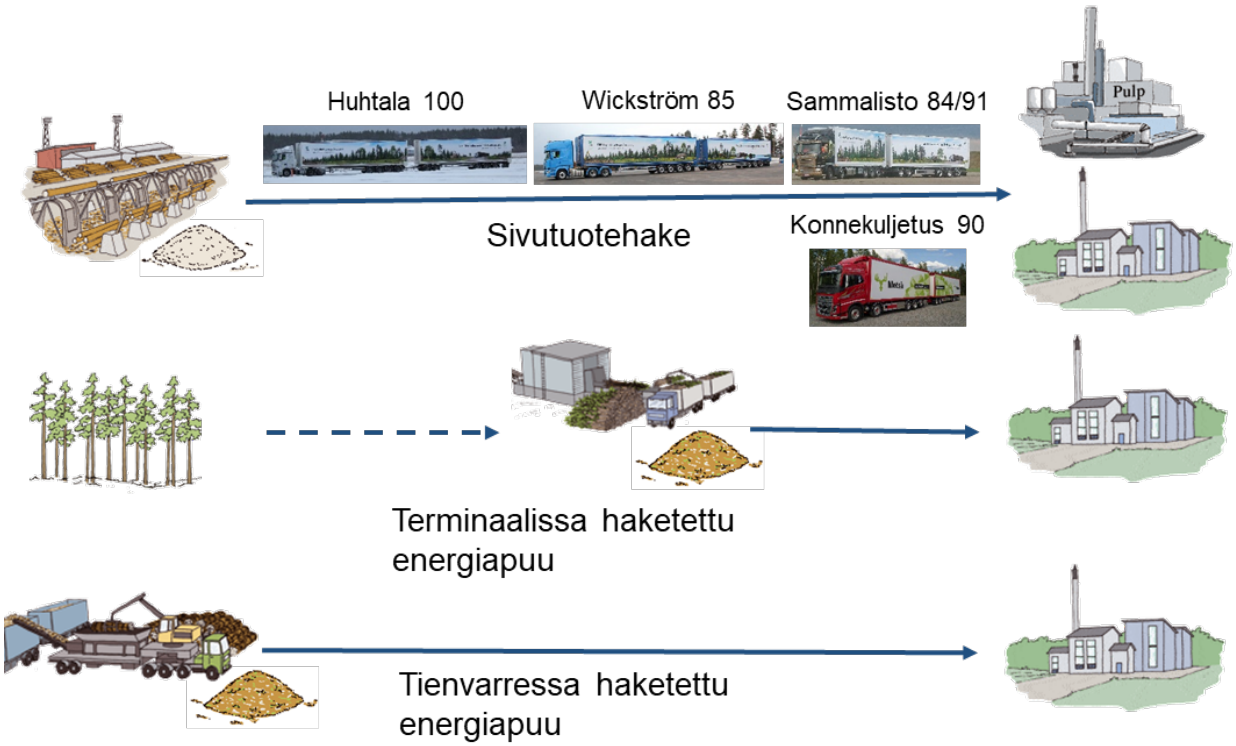
Kuva 2. Puutavarayhdistelmien kokorakenteen kehitys Metsäteho Oy:n valituille metsäyhtiöille lähettämän kyselyn mukaan. Esitetty jakauma on suuntaa antava kuljetusyritysten moniasiakkuuden takia.

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).

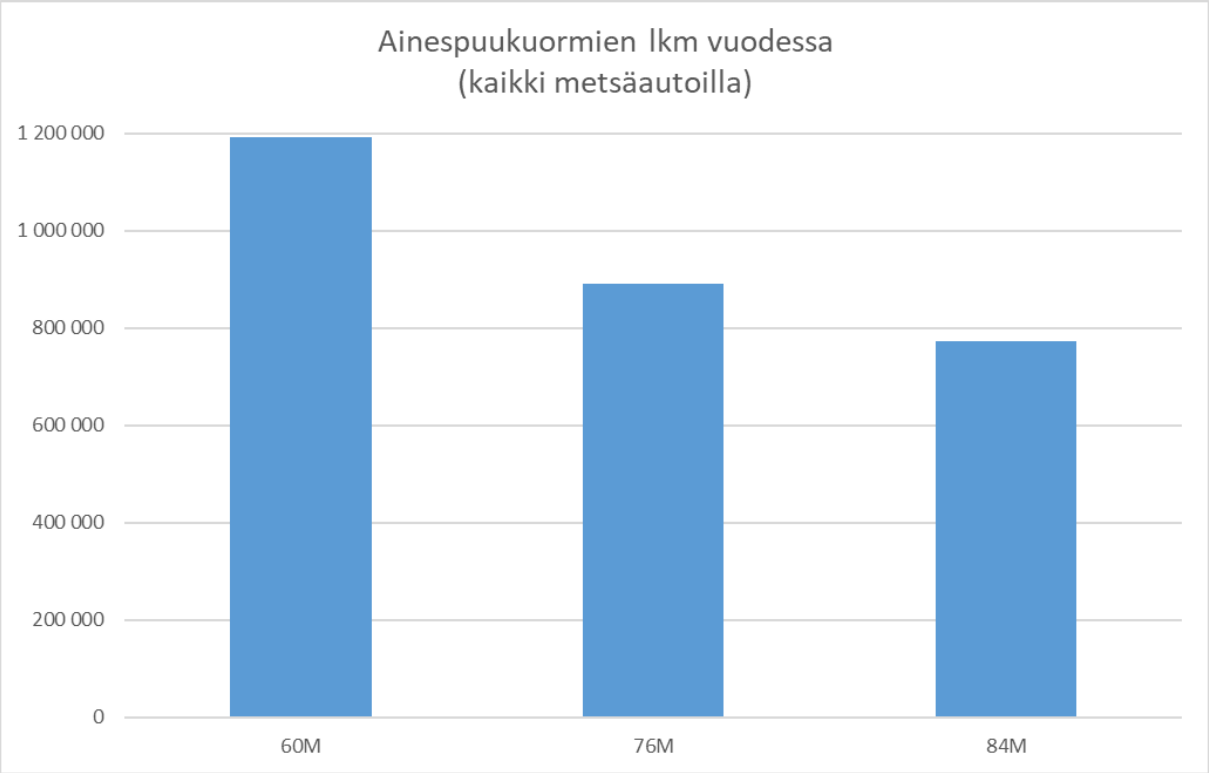


Kuva 4. HCT-hakeyhdistelmien kuljetusketjuja. (Kuvat: Koneurakointi Aki Sammalisto Oy, Metsä Group, Metsäteho Oy).

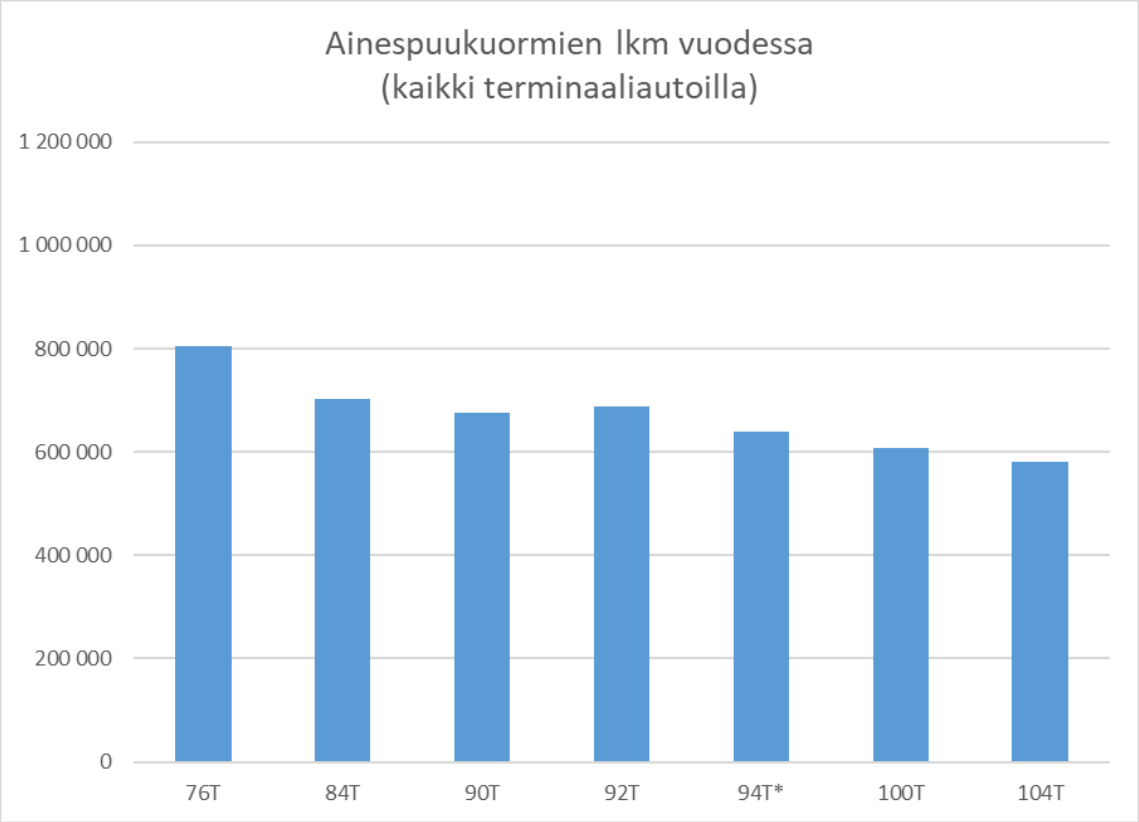
3 YHDISTELMIEN MASSOJEN NOSTON VAIKUTUKSIA

3.1 Ajojen määrä

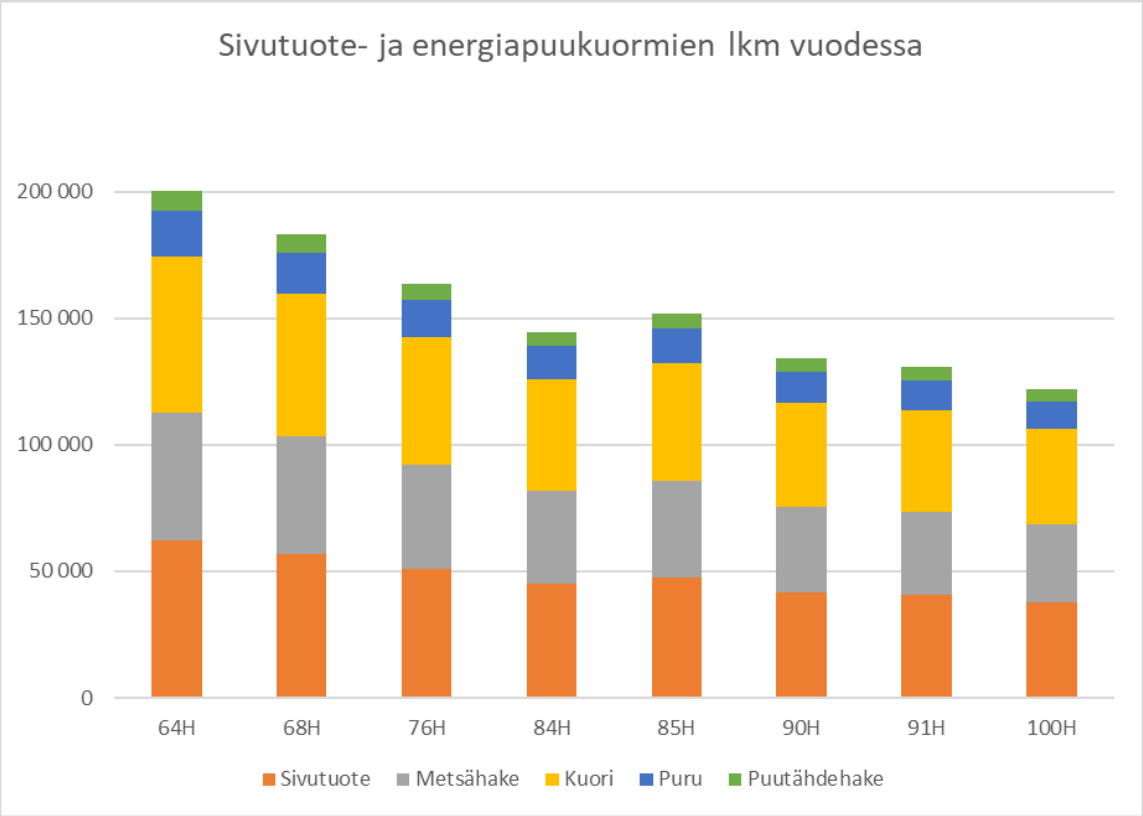
Valtakunnallisissa vertailuissa oletettiin taulukon 1 mukaiset kuljetusvolyymit, ja että menokuljetus on aina täynnä ja paluukuljetus on tyhjä. Lisäksi oletettiin, että kaikki kotimainen puu kuljetettaisiin ko. kokoluokan yhdistelmillä Ajoneuvoyhdistelmien kokoluokan kasvaessa tarvittavien kuormien määrä vähenee, mikä vähentää kuljetuskustannuksia, polttoaineen kulutusta kuljetettua tuoretonnia kohden ja ruuhkia varsinkin toimituskohteiden lähellä sekä pienentää liikenneonnettomuuksien riskiä. 84-tonnisilla metsäautoilla vähennettäisiin vuosittaisten ajojen määrää yli 120 000:lla 76-tonnisiin verrattuna (kuva 5). HCT-kokeiluissa mukana olevat terminaaliautot vähentäisivät puolestaan vuosittaisten ajojen määrää 100 000–220 000:lla (kuva 6). HCT-hakeyhdistelmät vähentäisivät kuormien määrää 76-tonnisiin nähden 10 000–40 000:lla vuodessa (kuva 7).



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



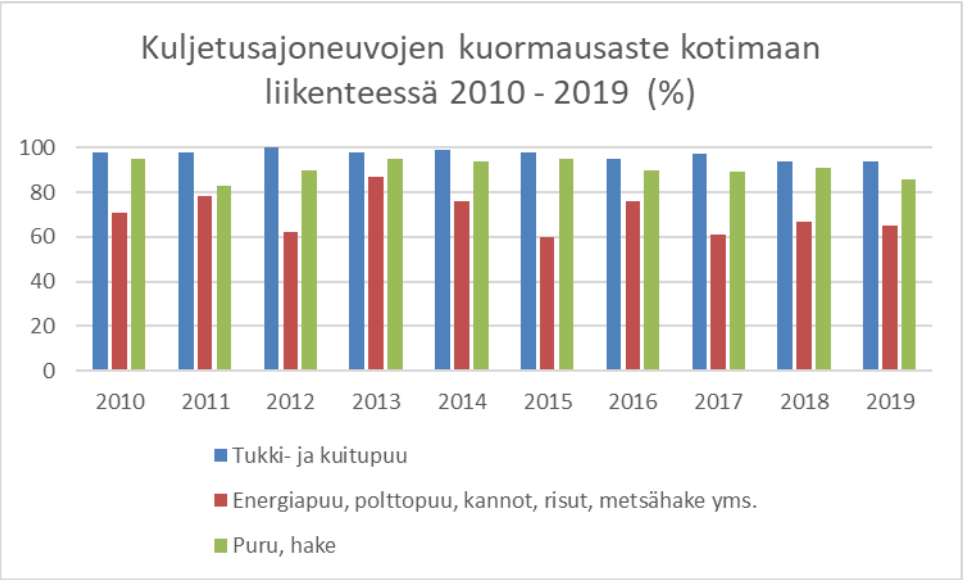
Kuva 6. Vuosittaisten ainespuukuormien lukumäärä, kun kaikki kotimainen autopuu kuljetettaisiin ko. kokoluokkien terminaaliautoilla.



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

3.2 Kuljetustehokkuus

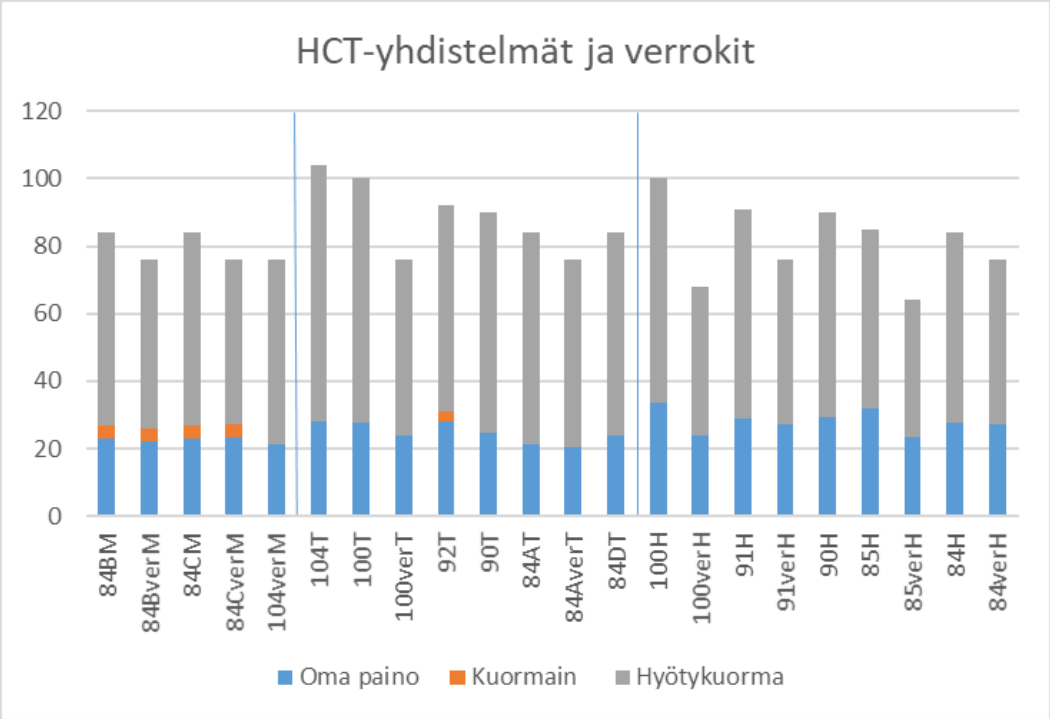
Kuljetustehokkuudella tarkoitetaan tässä puutavara- ja hakeyhdistelmien kuormatilan hyödyntämisen tehokkuutta. Kuljetuskustannuksia ja tarvittavia ajojen määrää on tarkasteltu erikseen omissa luvuissaan. Ainespuu- ja hakekuljetuksissa ajoneuvojen kuormausasteet ovat korkeita (kuva 8), joten kokonaispainoltaan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



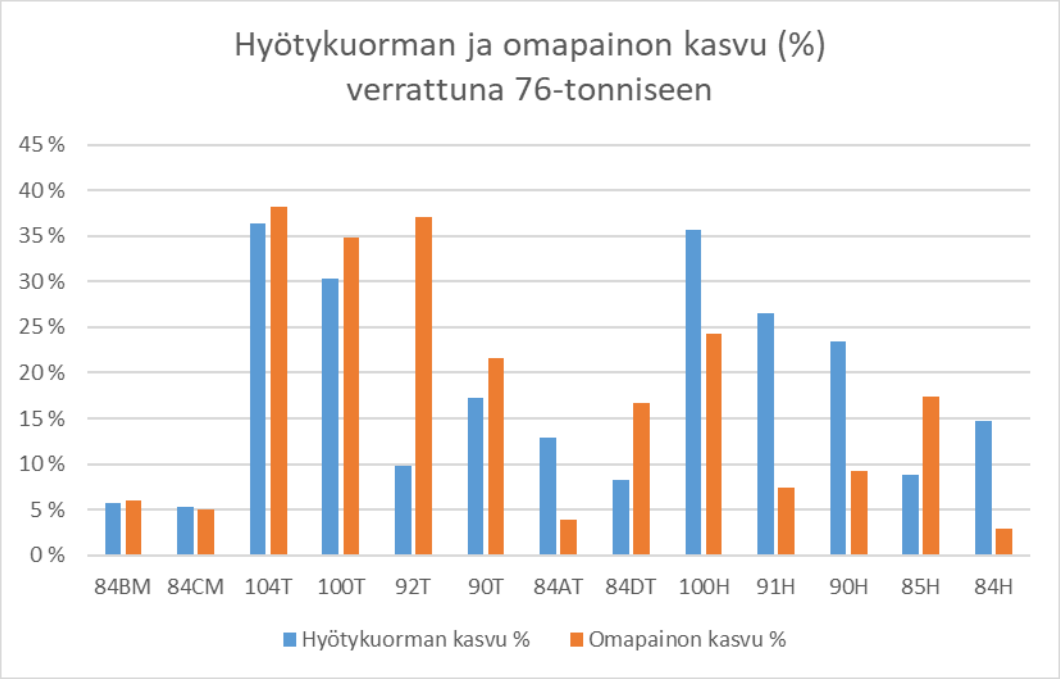
Kuva 8. Puun autokuljetusten kuormausasteet (Tilastokeskus 2020).

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 (%).



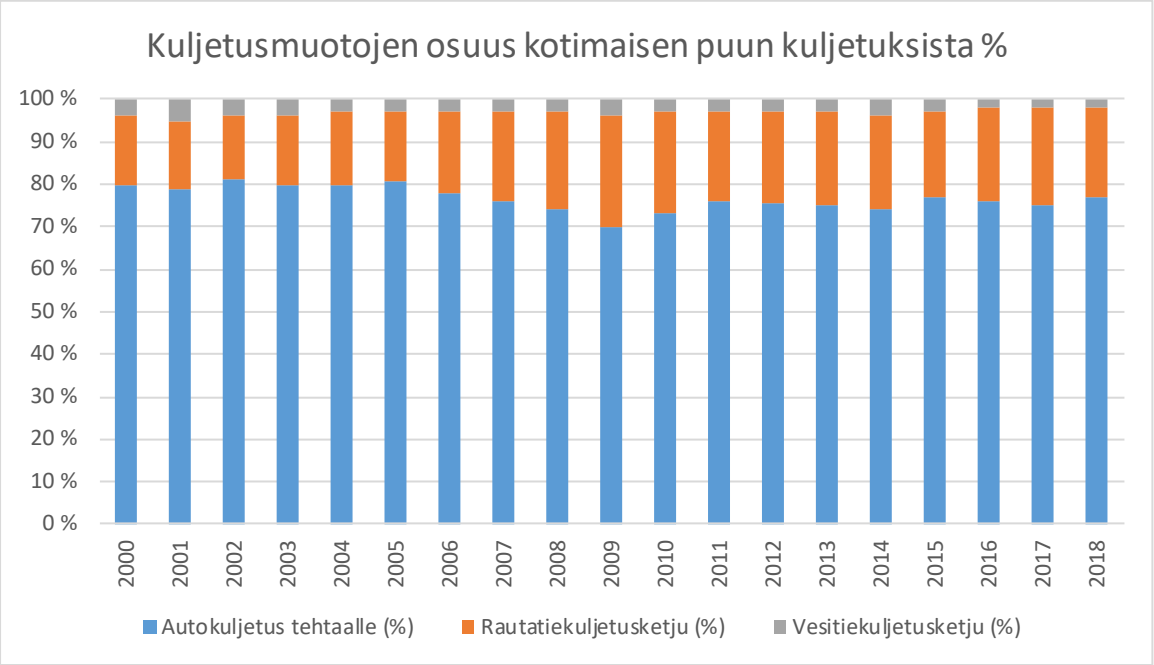
Kuva 10. Hyötykuorman ja omapainon kasvu verrattuna 76-tonniseen tyyppiyhdistelmään (nostureiden painoja ei ole otettu huomioon).

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 2000–2018 (% kuljetetuista kuutioista vuodessa) (Metsäteho Oy lähteessä Luonnonvarakeskus 2020c).

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).

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. Kuljetuskustannuslaskelmien kustannustekijät.

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	
(Puutavaran siirtokuormaukset)	
Työaika	
Vuosityöaika	
Auton käyttötunnit	
Kuljettajien työtunnit	

*Hakeyhdistelmien erillisen kuormauskaluston kulutusta ei ole otettu huomioon

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 puutavara-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 32–43 min ja purun kesto 33–42 min yhdistelmän koosta riippuen.	**Puutavara-auton kuormaus- ja purkukustannukset***:* Terminaalin ja käyttöpaikan kalustolla suoritetun kuormauksen ja purkamisen kustannus 0,30 €/m^3/käsittelykerta + auton odotuskustannus (ks. tarkemmin Poikela & Venäläinen 2017).

*Kerättyjä ajonopeustietoja käytetään lähinnä poissulkemaan aineistosta kuljetuksia, joihin sisältyy pitkiä taukoja. Ajonopeuksiin vaikuttavat yhdistelmän ominaisuuksien lisäksi kuljetusreittiominaisuudet, eikä näiden vaikutuksia ole arvioitu.

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).

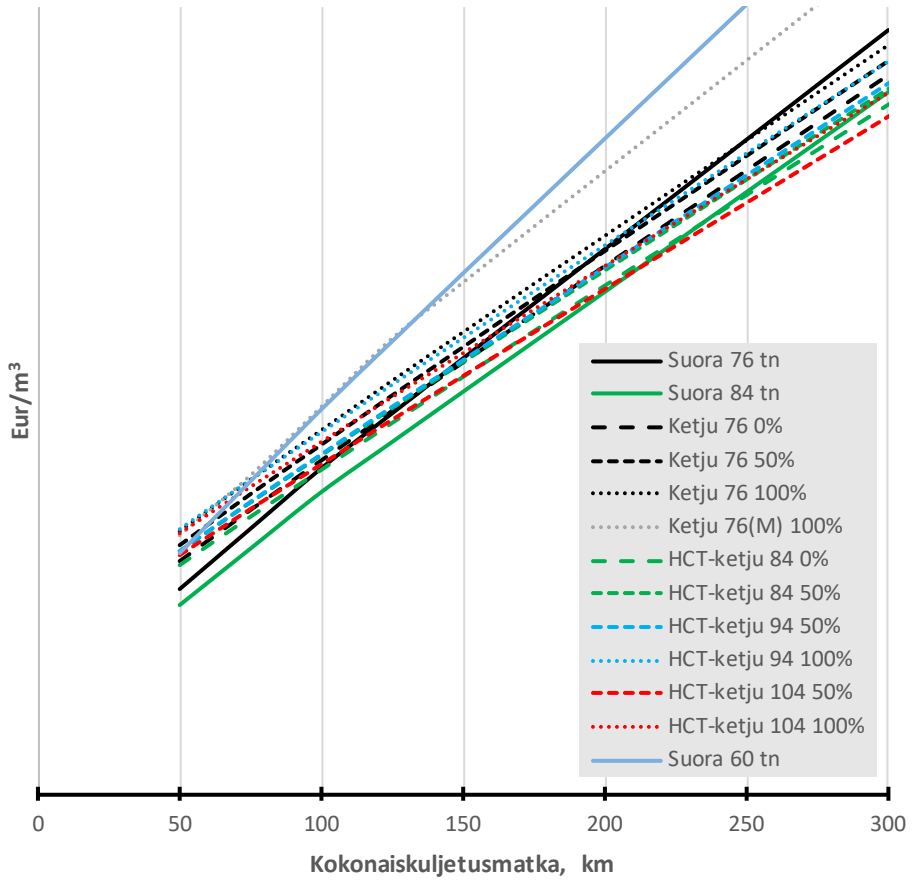
Kuva 12. Jalkalavaa kyytiin ottava HCT-auto Hannosen terminaalissa (Metsä Group).

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.

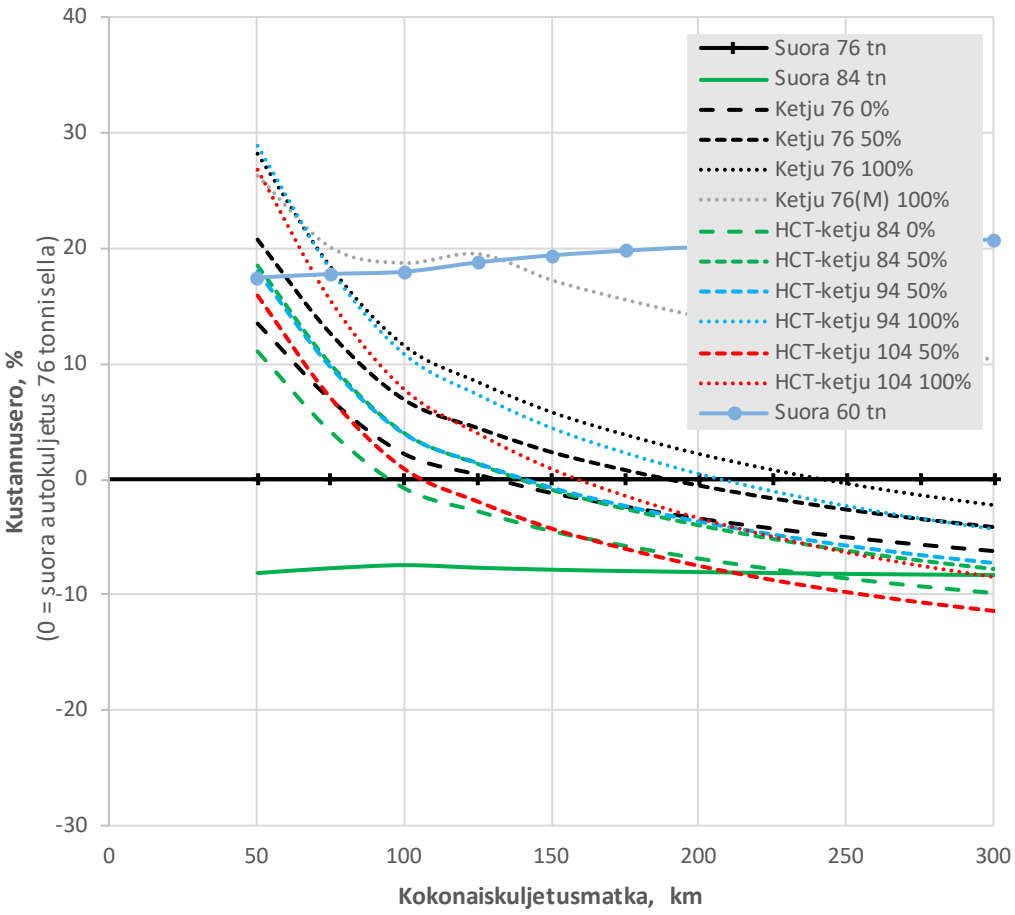
Verrattaessa kustannuksia **suoriin kuljetuksiin 76-tonnisilla metsäautoilla** 84-tonninen metsäauto tuo kuljetuskustannussäästön (kuvat 14 ja 15).[3] **HCT-kuljetusketjuista**[4] suurimmat säästöt (ja säästöt jo noin 100 km:n kuljetusmatkalla) tuovat kuljetukset 84-tonnisella ja 104-tonnisella terminaaliautolla (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] Väätäisen ym. (2020) simulointitutkimuksessa 84-tonnisen yhdistelmän tuoma kustannussäästö 76-tonniseen verrattuna oli kuljetusmatkasta riippuen 4,2–6,0 % kuljetettua kuutiota kohden. Ko. simuloinnissa oletettiin puunippujen keskimääräiseksi pituudeksi 4,2 metriä.

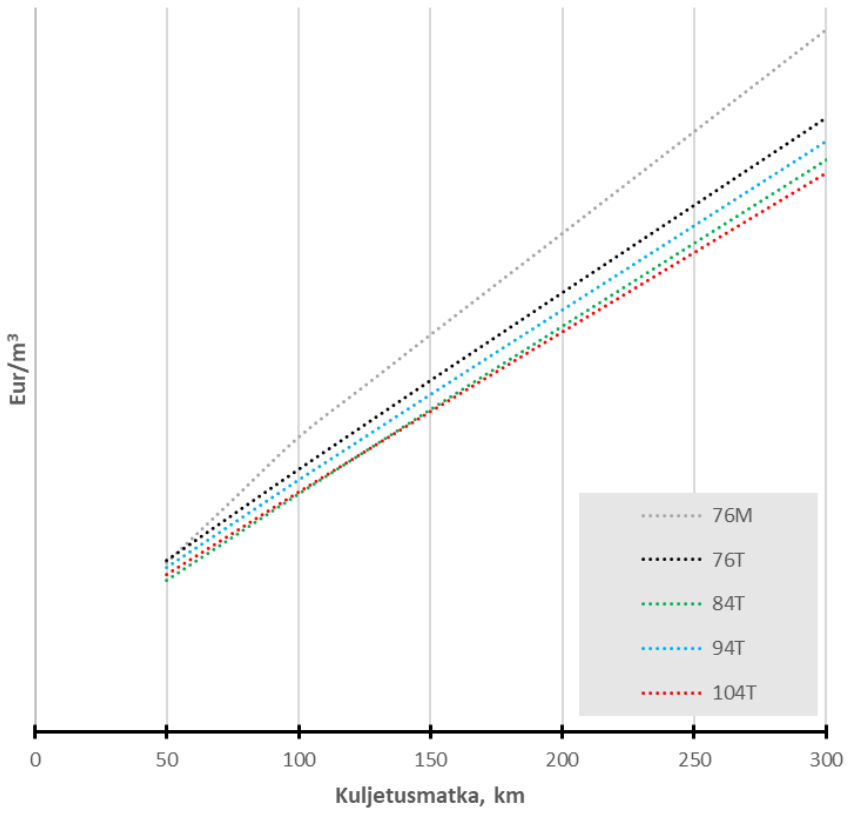
[4] Ks. eri siirtokuormaustapojen kuvaus (0 %, 50 % ja 100 %) taulukossa 3 luvussa 3.4.1



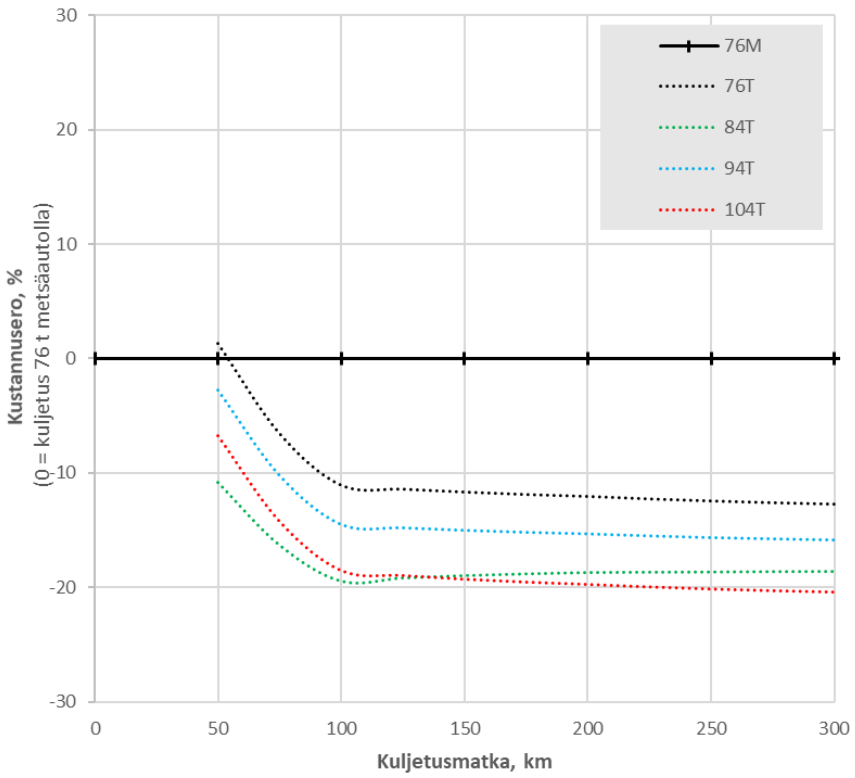
Kuva 15. Puun kuljetusketjujen kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla kuljetettua kuutiota kohden (erotus suoraan kuljetukseen 76-tonnisella yhdistelmällä, %).

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 & 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-tonnisiin yhdistelmiin verrattuna.

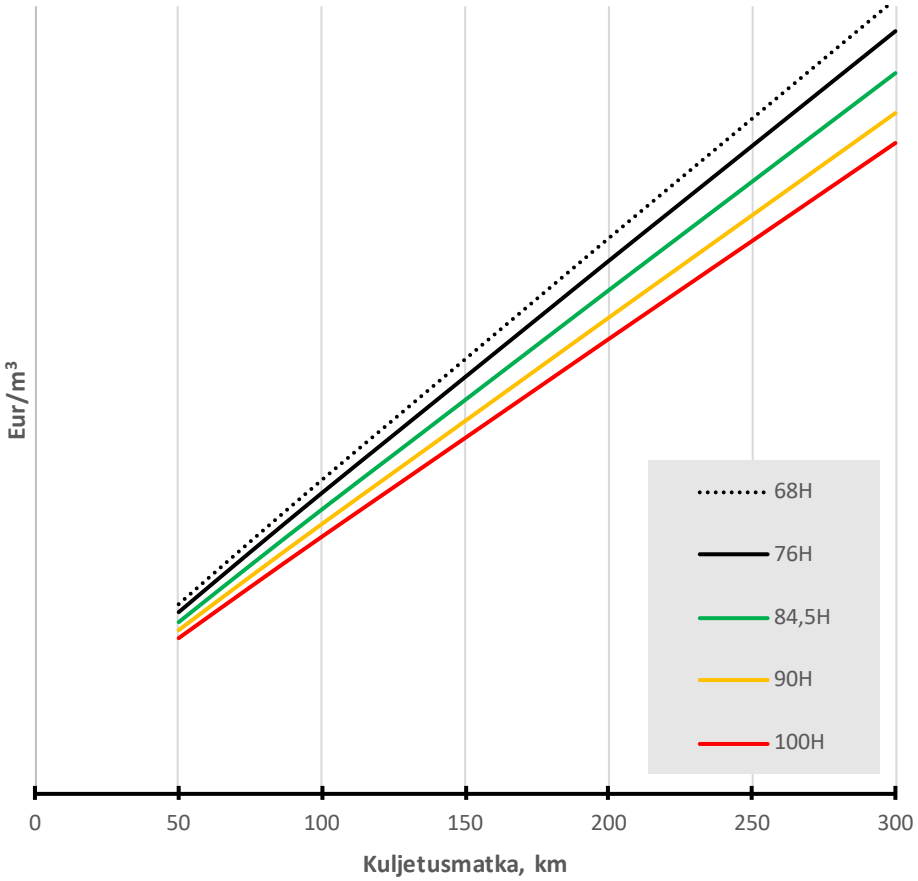


Kuva 16. Puun terminaalien välisten ajojen kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla (€/m³).

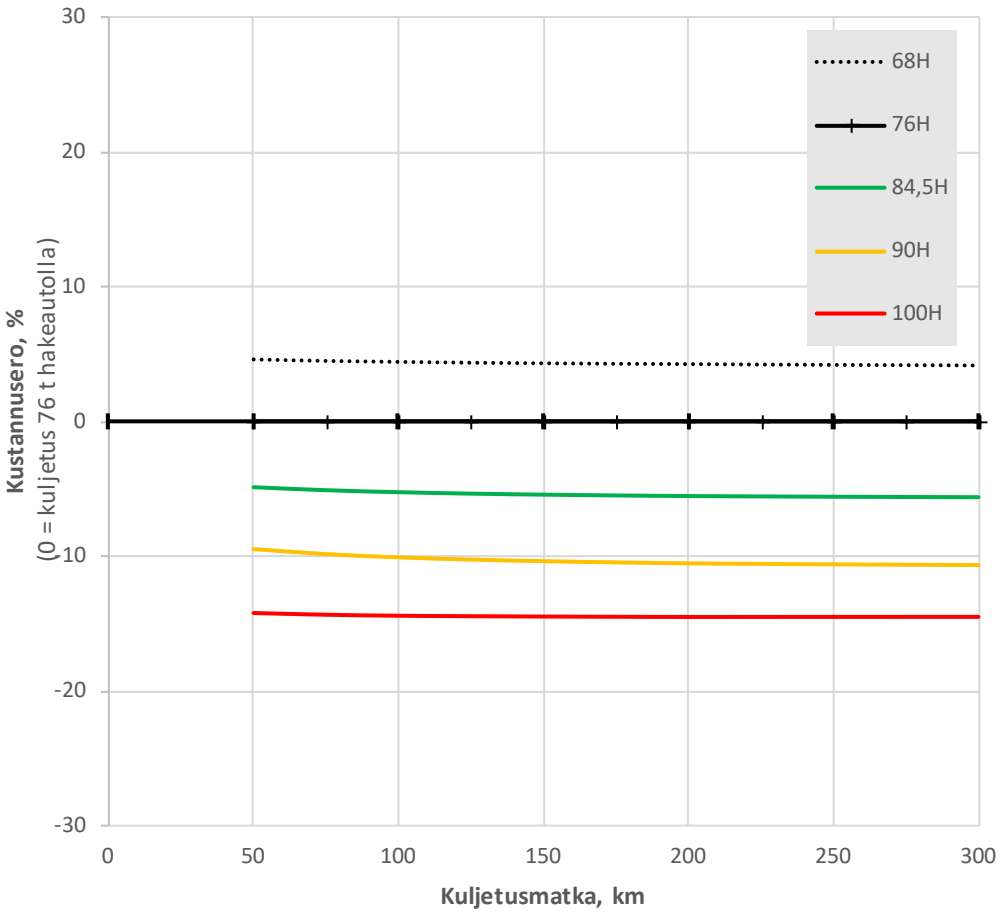


Kuva 17. Puun terminaalien välisten ajojen kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla kuljetettua kuutiota kohden (erotus kuljetukseen 76-tonnisella metsäautolla, %).

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).

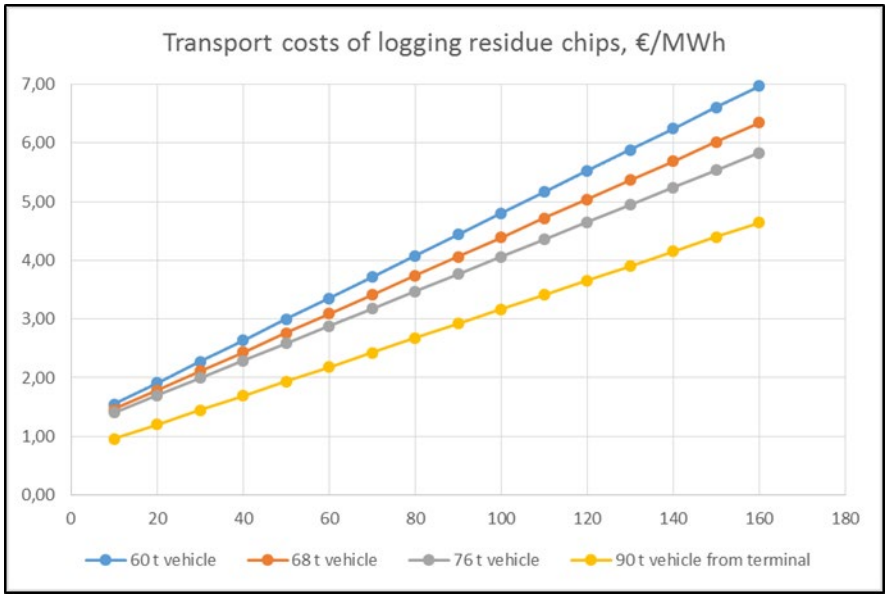


Kuva 18. Sivutuotehakekuljetusten alustavat kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla (€/m^3).

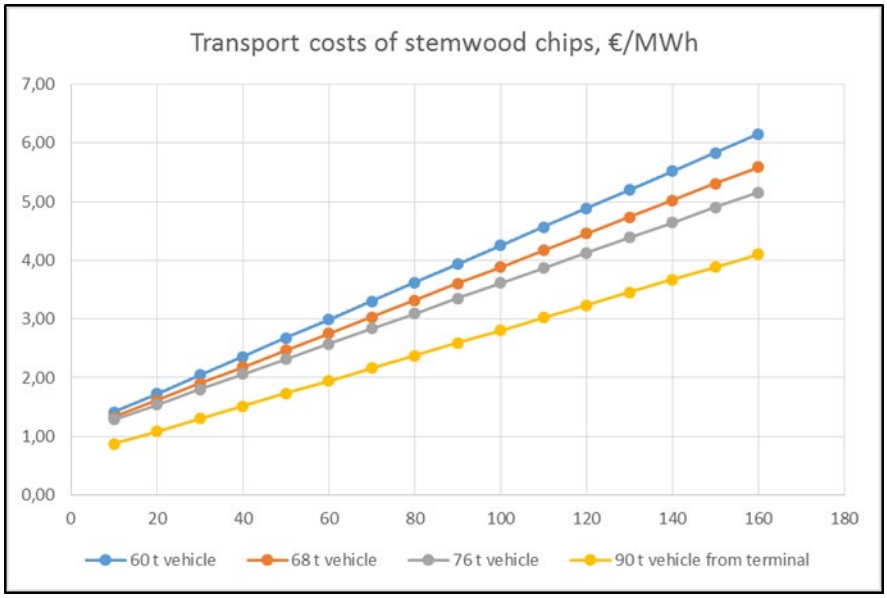


Kuva 19. Sivutuotehakekuljetusten alustavat kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla kuljetettua kuutiota kohden (erotus kuljetukseen 76-tonnisella hakeautolla, %).

Energiapuukuljetusten kustannusvertailuita laadittiin BEST-hankkeen yhteydessä (Korpilahti 2015) (kuvat 19 ja 20). Energiapuun matalan tiheyden takia HCT-yhdistelmät sopivat parhaiten hakkeen ja rankapuun kuljetuksiin. Energiapuusta 35 % haketetaan nykyisin terminaaleissa, ja terminaalihaketuksen osuus on ollut kasvussa (Strandström 2019a). 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 19. Hakkuutähdehakkeen kuljetuskustannukset eri kuljetusmatkoilla (90-tonnisen osalta terminaalista kuljetettuna) (Korpilahti 2015).

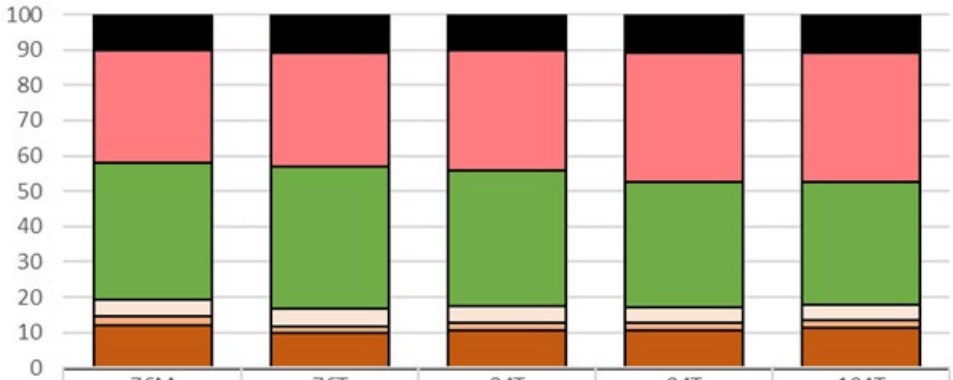


Kuva 20. Rankapuuhakkeen kuljetuskustannukset eri kuljetusmatkoilla (90-tonnisen osalta terminaalista kuljetettuna) (Korpilahti 2015).

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 21 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.



	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 21. 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.

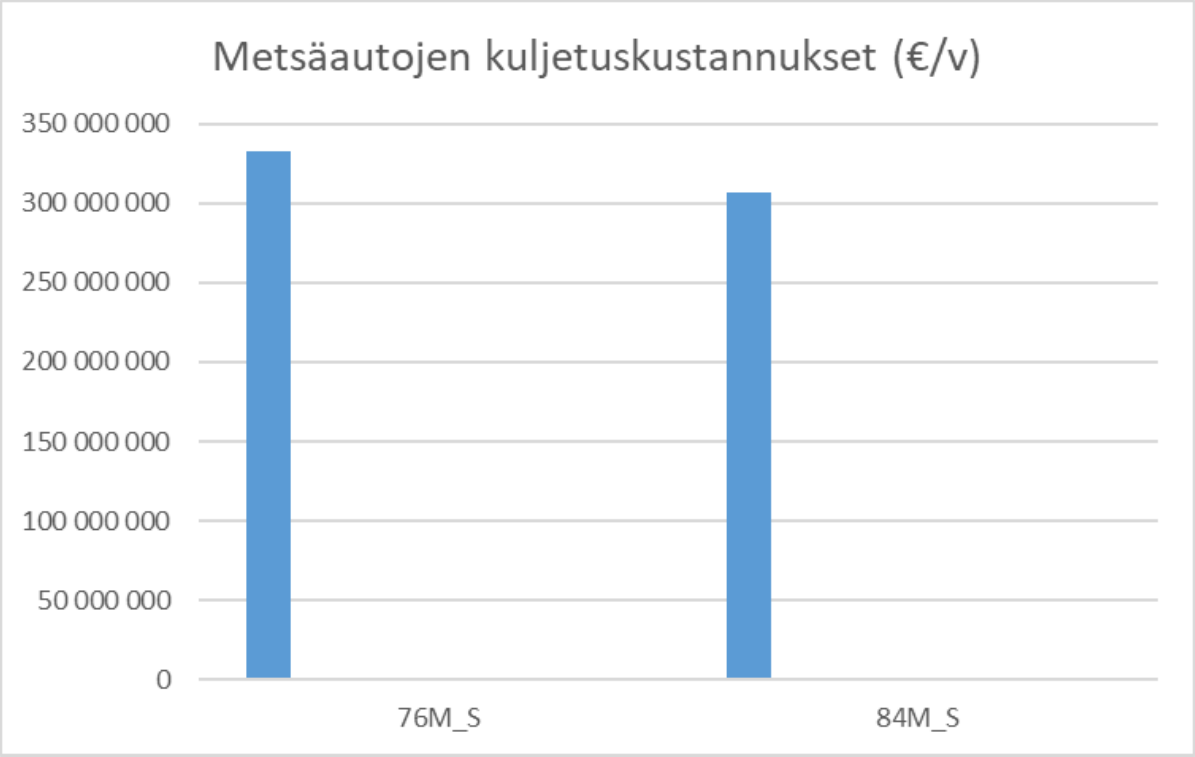
3.4.3 Valtakunnalliset kustannuslaskelmat

Valtakunnalliset kustannuslaskelmat perustuvat luvun 2.1 kuljetusvolyymeihin ja keskimääräisiin kuljetusmatkoihin.

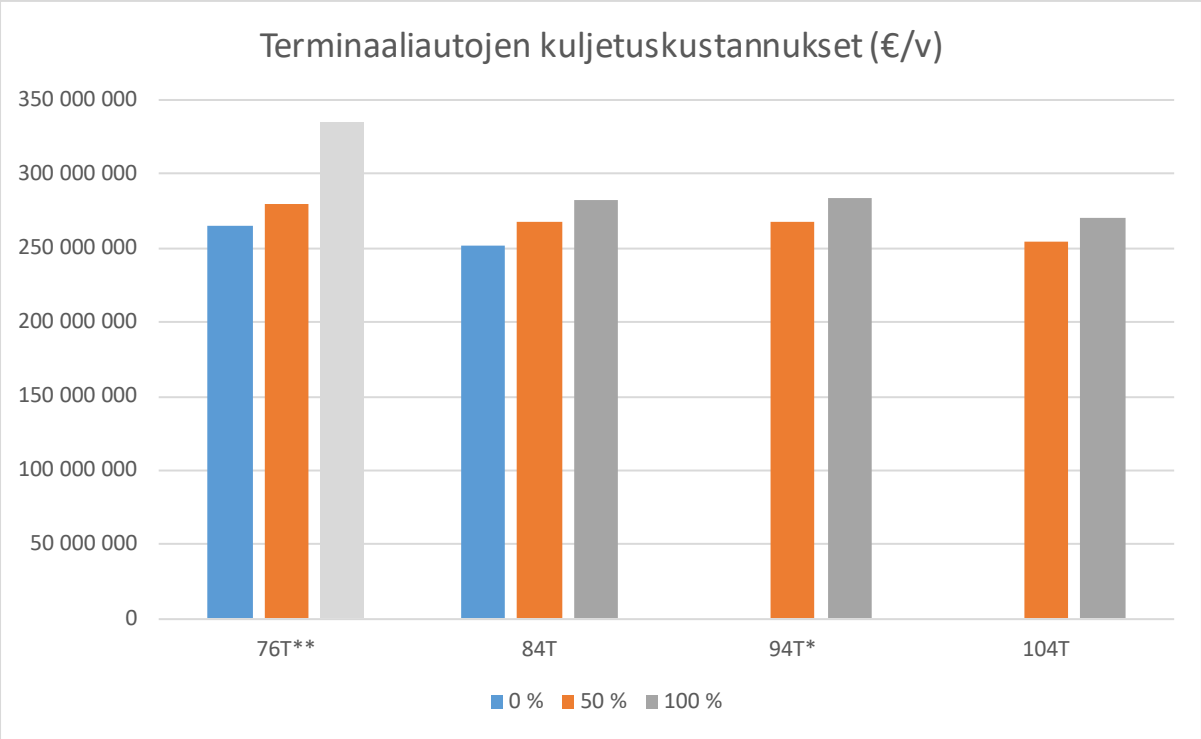
Kaikki kuljetukset yhden kokoluokan yhdistelmillä

Laskelmissa on oletettu, että kaikki kuljetukset hoidetaan ko. kokoisella kalustolla. Laskelmissa ei ole otettu huomioon, että HCT-yhdistelmät ovat taloudellisempia keskimääräistä pidemmillä kuljetusmatkoilla.

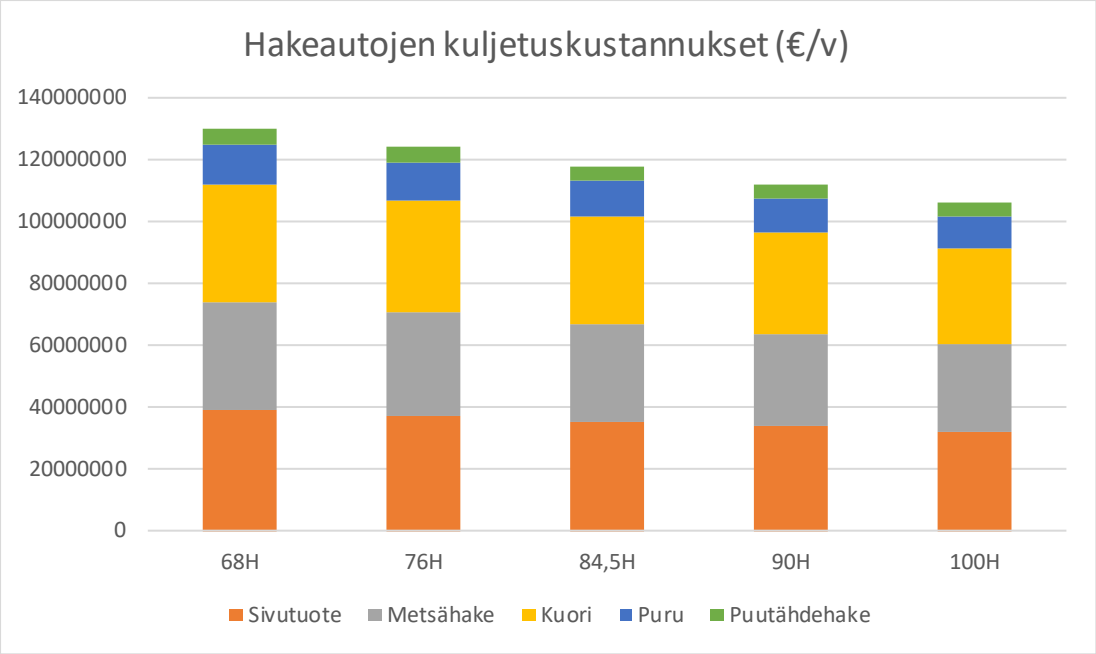
Suorissa metsästä tehtaalle kuljetuksissa 84-tonniset HCT-yhdistelmät voivat tuoda yli 26 milj. euron vuosittaisen kustannussäästön (kuva 22). Terminaaliyhdistelmille ei laskettu tässä alkukuljetuskustannusta, vaan oletettiin että se on kaikilla yhdistelmillä sama. HCT-terminaaliyhdistelmät tuovat vuosittain 13–65 milj. euron säästöt (kuva 23). Hakkeen kuljetuksissa HCT-yhdistelmillä voidaan saavuttaa vuosittain 6,3–17,9 miljoonan euron säästöt 76-tonnisiin yhdistelmiin verrattuna (kuva 24).



Kuva 22. Valtakunnalliset pyöreän puun kuljetuskustannukset kalustokoon mukaan (€/v, suora kuljetus metsäautoilla tehtaalle, kuormain 4 t sisältyy omapainoon).



Kuva 23. 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 24. Valtakunnalliset hakkeen kuljetuskustannukset kalustokoon mukaan (€/v, hakeautot, 75 km:n keskikuljetusmatka).

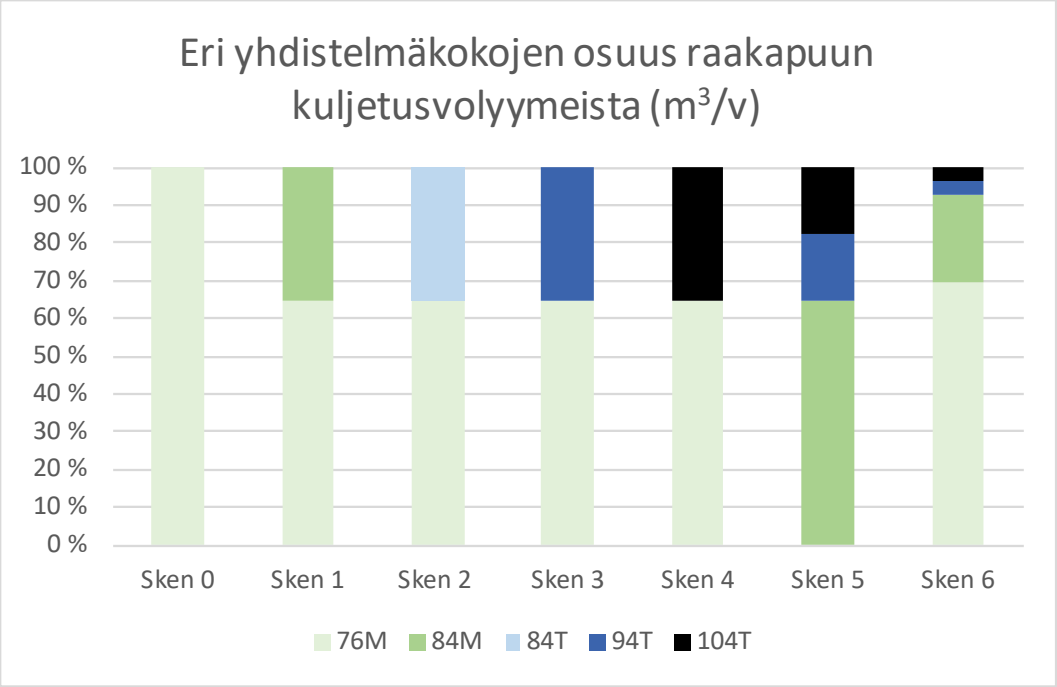
Skenaarioita erilaisilla yhdistelmien kokojakaumilla

Taulukossa 4 ja kuvassa 25 on esitetty skenaarioita, joissa eri kokoisten yhdistelmien osuudet raakapuun kuljetusvolyymeista vaihtelevat. Maksimissaan 100 km:n kuljetusmatkojen osuus kuljetetusta volyymista on 65 % ja yli 100 km pitkien osuus 35 % (Lapp & Iikkanen 2017). Skenaarioita tullaan tarkentamaan myöhemmin, kun mm. tierasitustutkimusten perusteella osataan arvioida paremmin yhdistelmien eri kokoluokkien soveltuvuutta tieverkon eri osiin.

Taulukko 4. Skenaarioita puutavarayhdistelmien kokojakaumasta kuljetusmatkaluokittain.

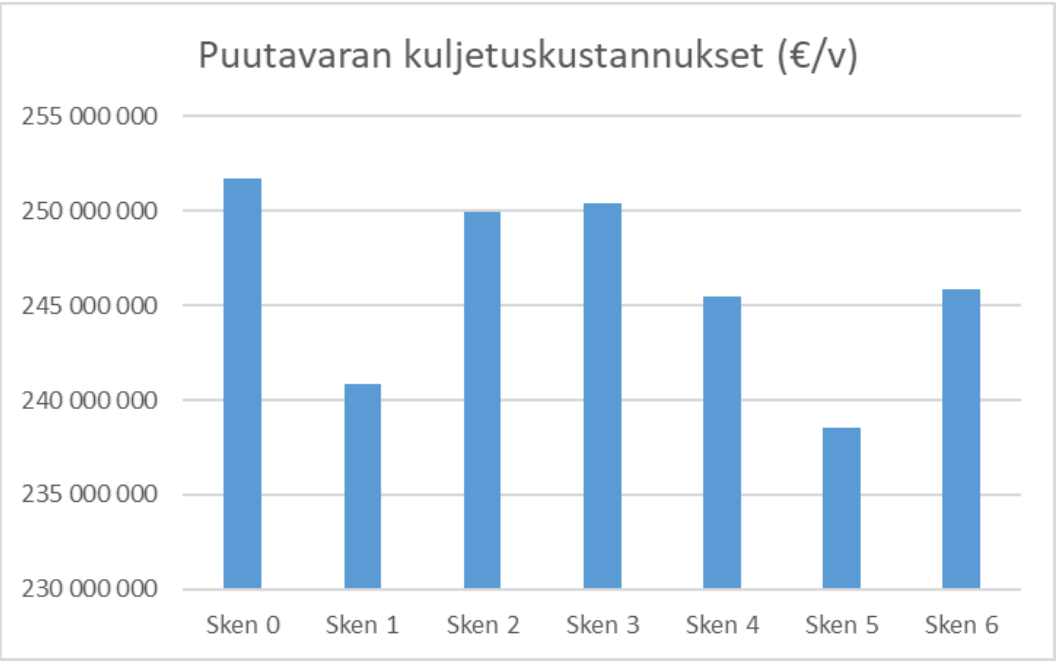
	Kuljetusmatka max 100 km	**Kuljetusmatka yli 100 km**
0	100 % 76M	100 % 76M
1	100 % 76M	100 % 84M
2	100 % 76M	100 % 84T
3	100 % 76M	100 % 94T
4	100 % 76M	100 % 104T
5	100 % 84M	50 % 94T, 50 % 104T
6	80 % 76M, 20 % 84M	50 % 76M, 30 % 84M, 10 % 94T, 10 % 104 T

Terminaaliyhdistelmien osalta on oletettu, että 50 % kuormasta siirtyy perävaunussa metsäautosta terminaaliautoon ja 50 % siirtokuormataan maan kautta.



Kuva 25. Skenaarioita erikokoisten yhdistelmien osuuksista puutavaran kuljetusvolyymeista.

Tarkastelluista skenaariosta edullisin olisi skenaario 5, jossa maksimissaan 100 km:n kuljetusmatkoilla käytettäisiin 84-tonnisia metsäautoja ja yli 100 km:n kuljetuksissa puoliksi 94-tonnisia ja puoliksi 100-tonnisia yhdistelmiä (kuva 26). Nykytilaan (skenaario 0) nähden vähiten hyötyjä toisi skenaario 3, jossa maksimissaan 100 km:n kuljetuksissa käytettäisiin nykyisiä 76-tonnisia yhdistelmiä ja yli 100 km:n kuljetuksissa 94-tonnisia yhdistelmiä.



Kuva 26. Puutavaran vuosittaiset kuljetuskustannukset eri skenaarioissa. Eri kuljetusmatka-oletuksista johtuen skenaario 0:n vuosikustannus eroaa kuvissa 22–23 esitetyistä vuosikustannuksista.

3.5 Ajoneuvojen kestävyys

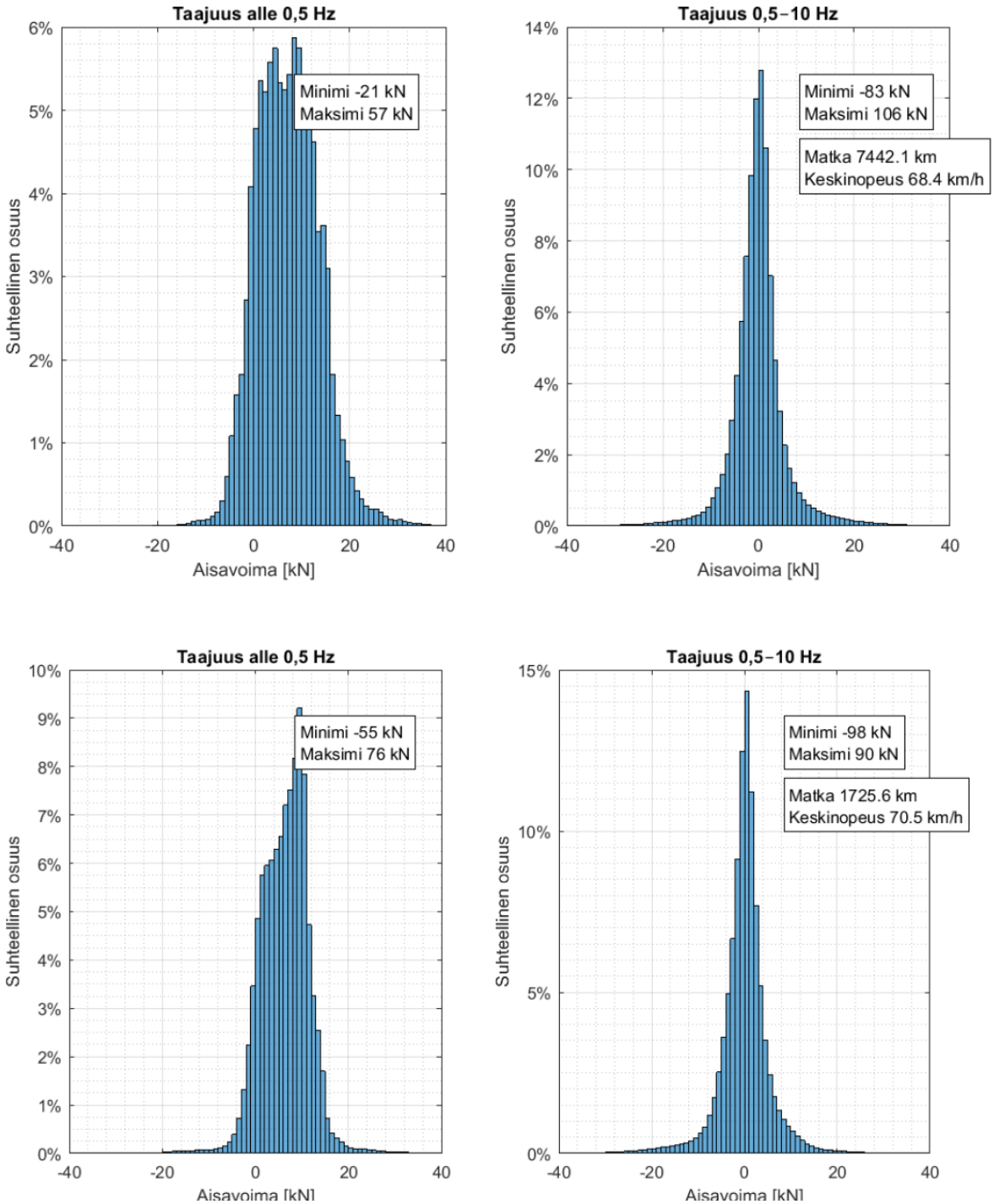
Yhdistelmän koon kasvaminen lisää ajoneuvojen eri osien rasitusta. Rasitustasojen luotettavampi arvioiminen vaatisi yhdistelmien vielä pidempää ja useampaa yhdistelmää koskevaa seurantaa.

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 tehtävällä 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.

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 27). 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).

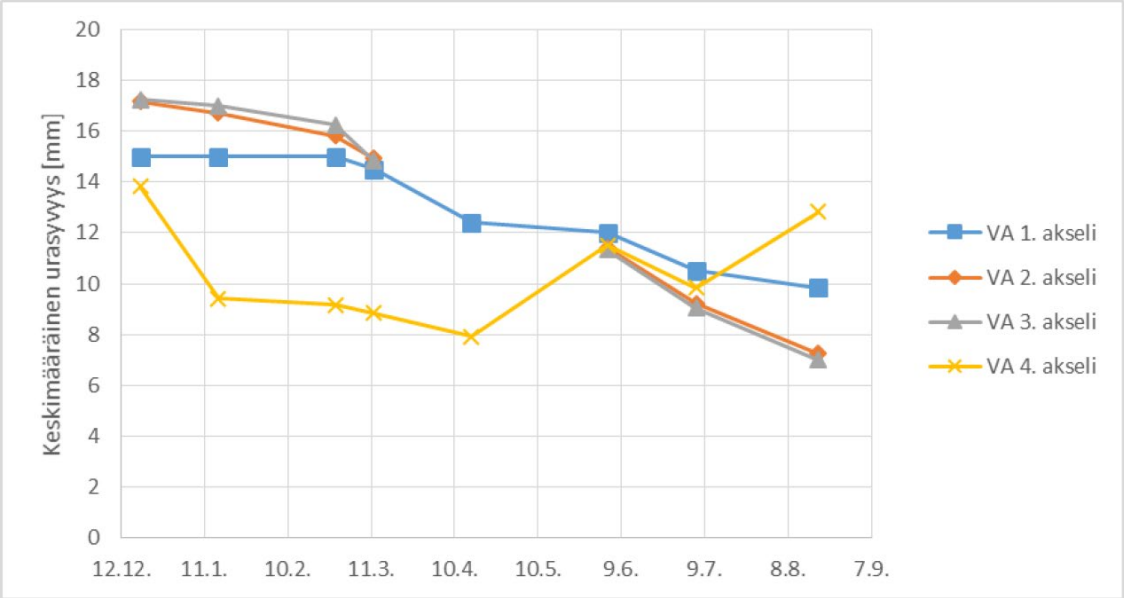


Kuva 27. Mitatut aisavoimat valta- ja kantateillä 84-tonnisella (ylempi rivi) ja 76-tonnisella (alempi rivi) yhdistelmällä (Pirnes & Haataja 2018).

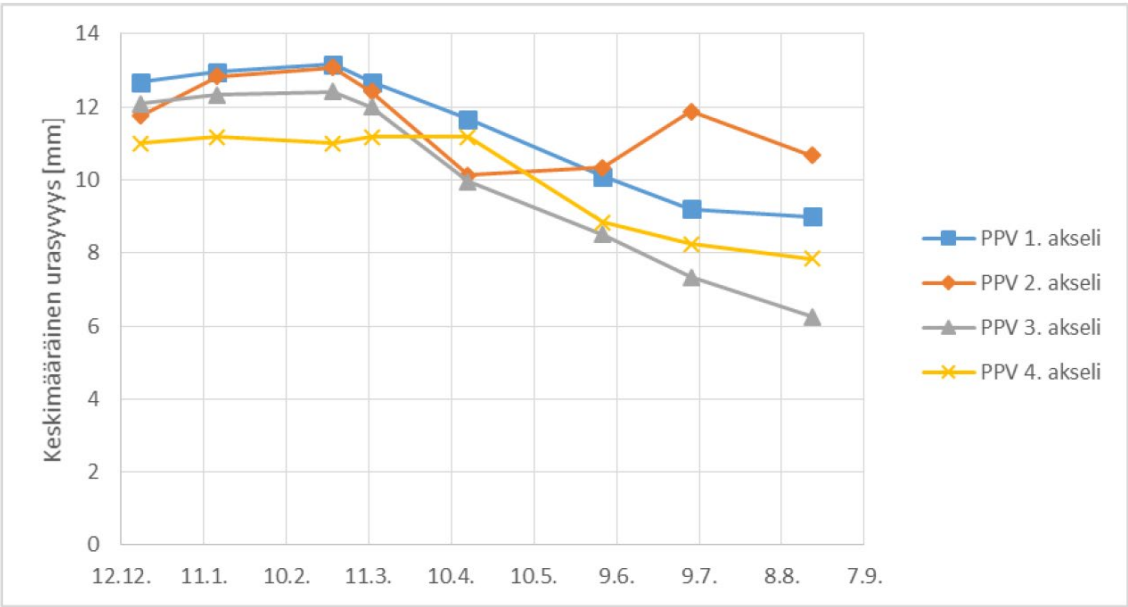
3.5.2 Renkaat

Oulun yliopisto (2016) seurasi Ketosen 104-tonnisen yhdistelmän renkaiden kulumista rengasuria mittaamalla (kuvat 28–30). 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

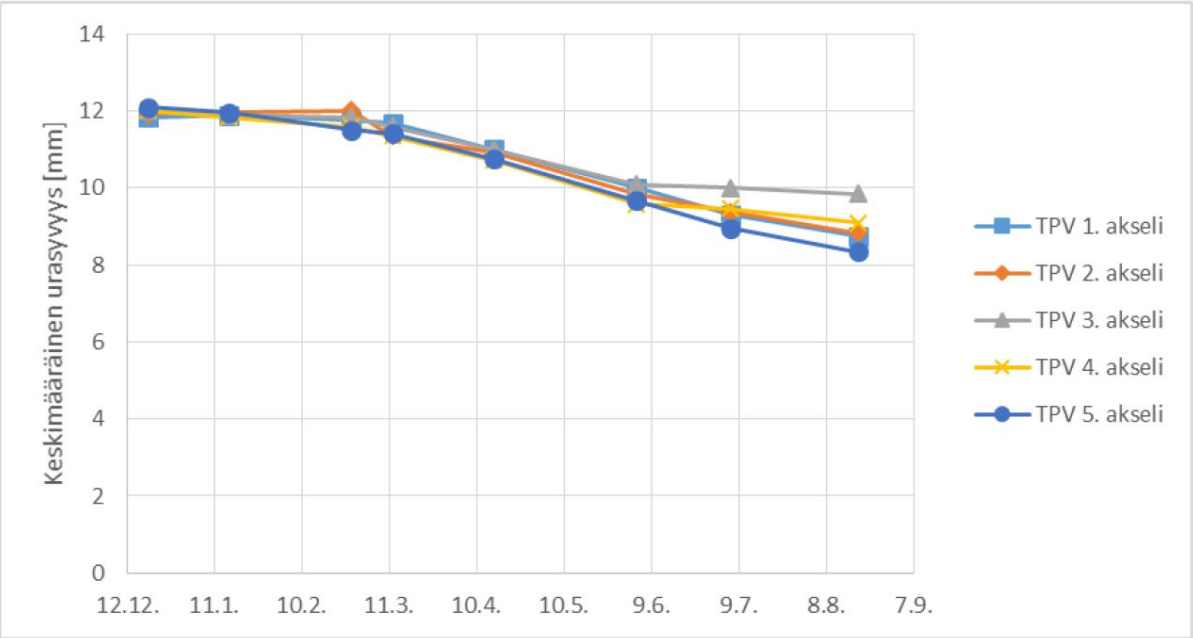
muun kokoisiin yhdistelmiin tai metsäautoihin. Tutkimusta renkaiden ja ajoneuvon muiden osien kulumisesta on tarpeen jatkaa.



Kuva 28. 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 29. 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 30. 104-tonnisen HCT-yhdistelmän varsinaisen perävaunun renkaiden urasyvyyksien keskiarvo akseleittain eri mittauskerroilla (Oulun yliopisto 2016).

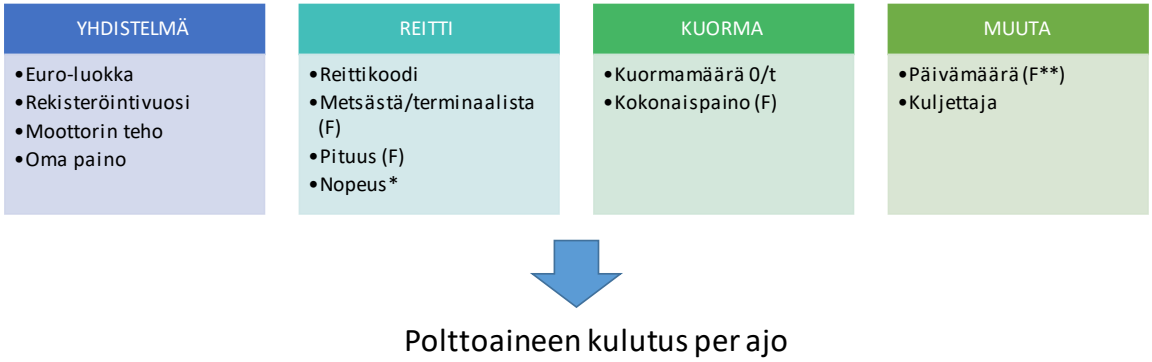
3.6 Polttoaineen kulutus ja päästöt

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 31):

- 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 31. 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 5).

Taulukko 5. 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 (90T)	Volvo DynaFleet/Connect
Konnekuljetus (90H)	Volvo DynaFleet/Connect
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 6). Hallintajärjestelmät näyttävät yleensä pienempää kulutusta kuin tankkausseurannalla saatu kulutustieto. Talvella erotusta nostaa lämmityslaitteiden käyttö, jonka polttoaineen kulutus ei näy hallintajärjestelmien tiedoissa.

Taulukko 6. Tankkausseurannan pohjalta saatu kalibrointierotus ajoneuvojen hallintajärjestelmien ilmoittamiin kulutuslukemiin nähden).

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 %
90T	1,62 %	7-8/18, 1, 3 / 19	2,27 %	0,98 %
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 %
84verH	1,66 % (talvi)	10,12 / 18	na	1,66 %
85H	4,49 %	1-6/18	1,17 %	7,81 %
90H	0,92 %	9/18-8/19	0,13 %	1,71 %
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 7 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 7. 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

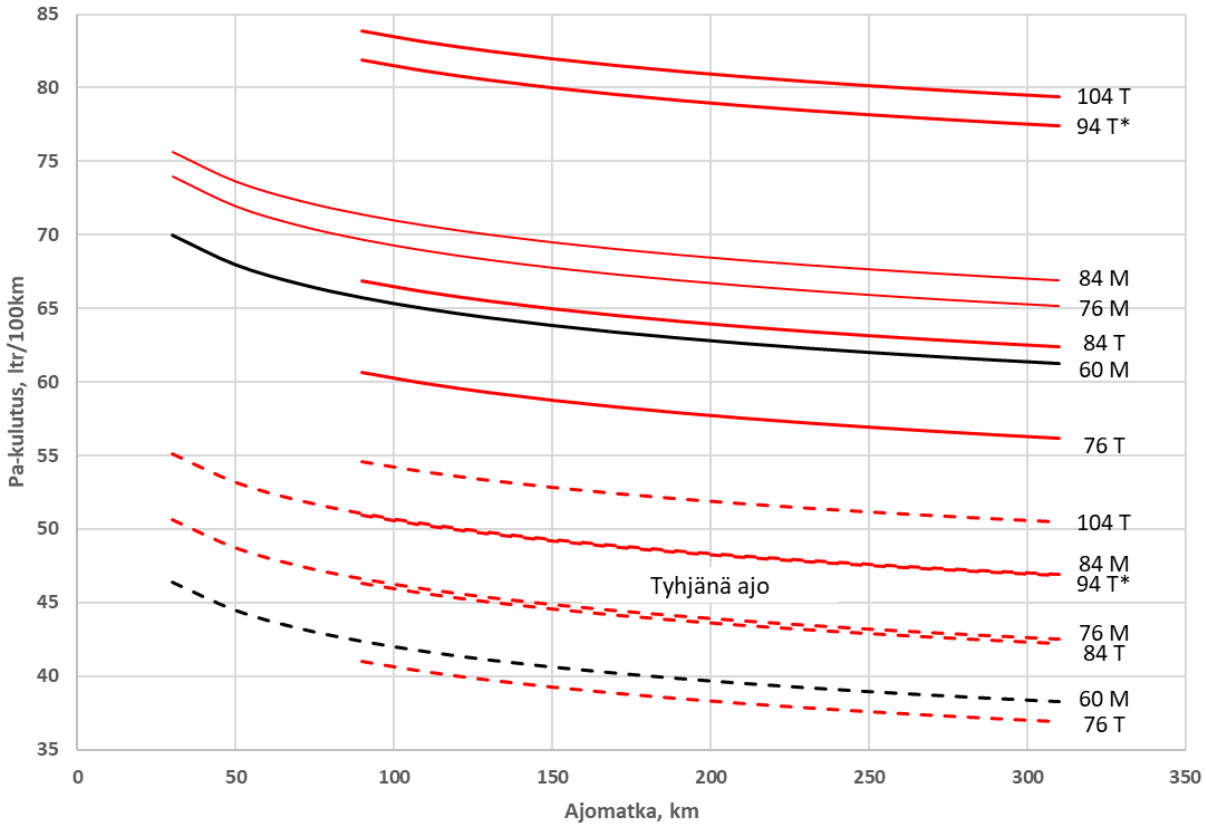
Kuljetusreittien ominaisuuksien vaikutusta polttoaineen kulutukseen on kuvattu taulukossa 8. Keskikuljetusmatkan vaikutus kulutukseen on poistettu tämän raportin laskelmissa arvioimalla kerätyn datan pohjalta polttoaineen kulutus kaikille kuljetusmatkoille.

Taulukko 8. 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.

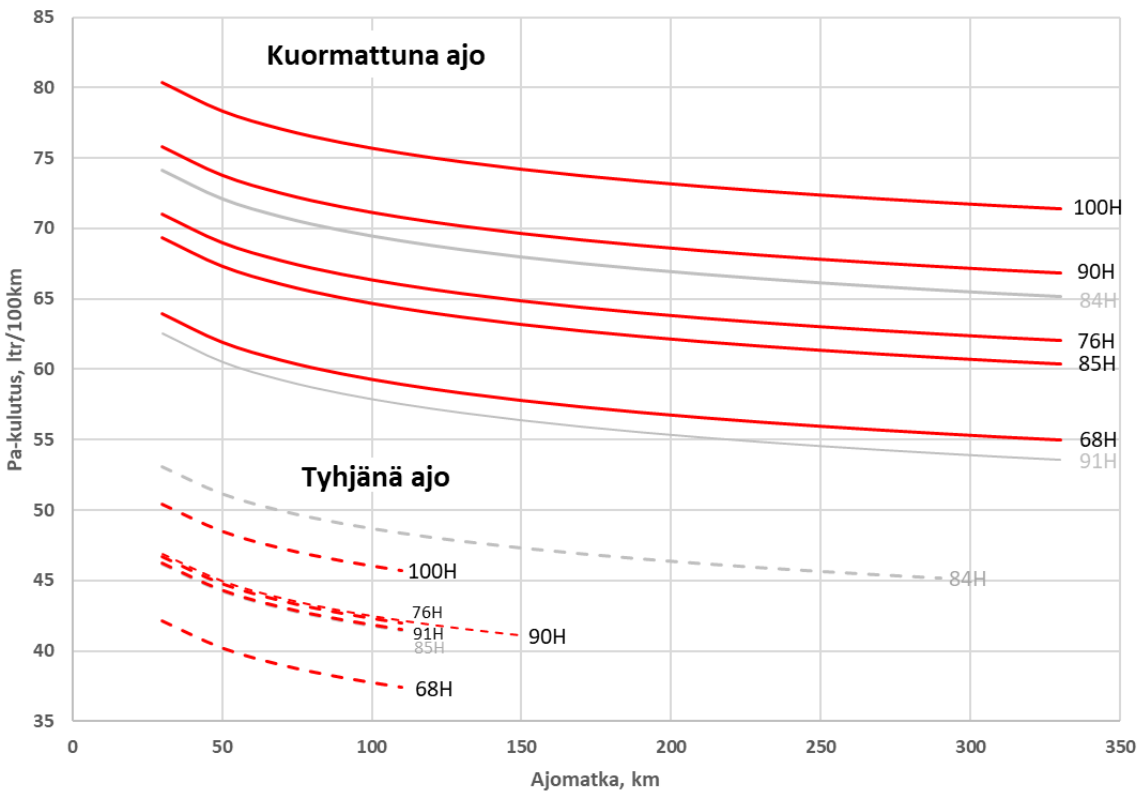
3.6.3 Polttoaineen kulutusfunktiot

Puutavarayhdistelmien kesä- ja talviaineiston (Q2&Q3 ja Q1&Q4) polttoaineen kulutukset analysoitiin erikseen. Laaditut kulutusfunktiot edustavat kuitenkin koko vuoden keskitasoa (kuvat 32 ja 33). Puutavarayhdistelmän perusfunktion muoto (≈ kulmakerroin) on sama kuin 60-tonnisella 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.



Kuva 32. Polttoaineen kulutus (litraa / 100 km) eri puutavarayhdistelmillä ja kuljetusmatkoilla.[5] *Yhtenäinen viiva = täytenä ajo, katkoviiva = tyhjänä ajo.*

[5] Malmstedtin 92-tonninen, terminaalien välillä ajava puutavarayhdistelmä ajaa erillisen tutkimuksen (Palander ym. 2020) mukaan 165 km:n keskikuljetusmatkaa ja keskimääräinen kulutus on 73 litraa / 100 km.



Kuva 33. Polttoaineen kulutus (litraa / 100 km) eri hakeyhdistelmillä ja kuljetusmatkoilla. Yhtenäinen viiva = täytenä ajo, katkoviiva = tyhjänä ajo. Harmaalla merkittyjä funktioita tullaan tarkistamaan myöhemmin lisäaineiston avulla.

3.6.4 Kuljetusten polttoaineen kulutusvertailut

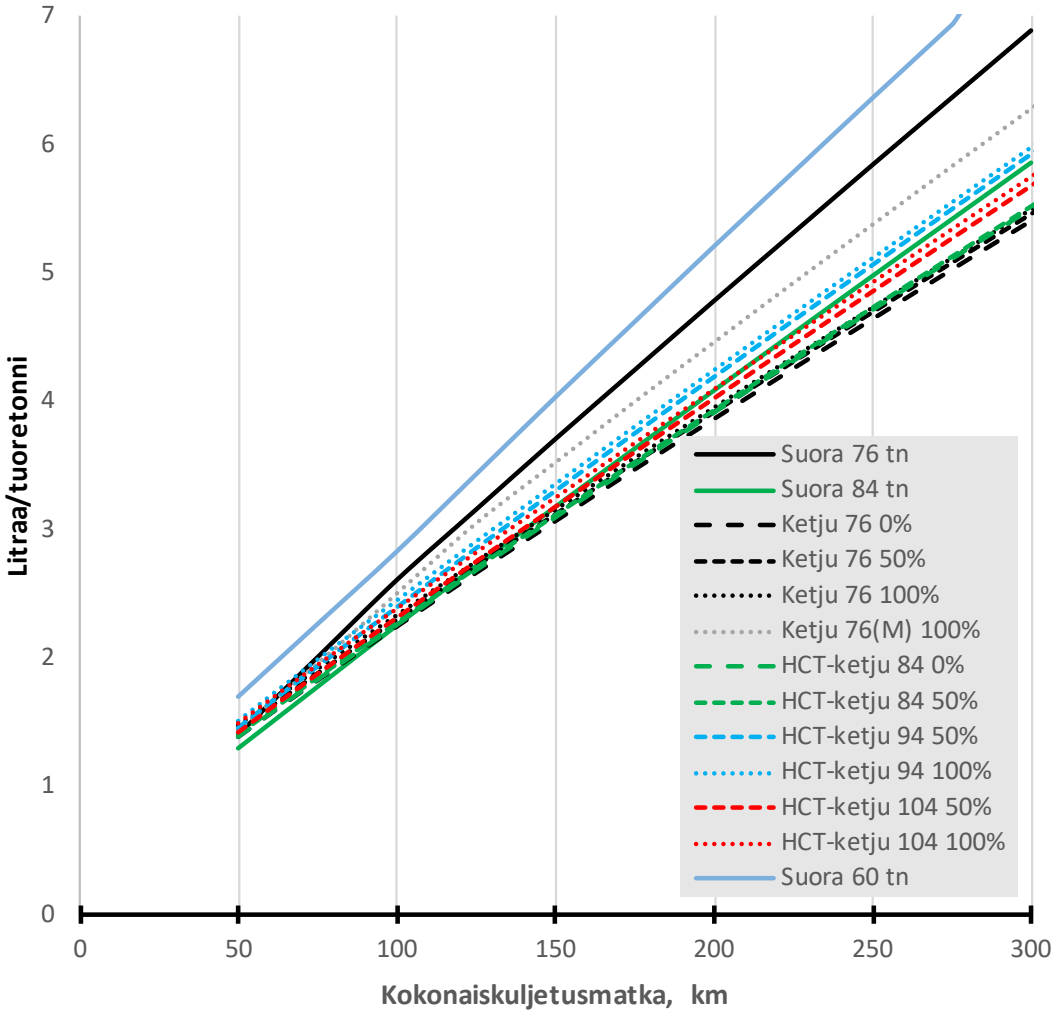
Suorien puutavarakuljetusten laskelmissa on otettu huomioon pelkkä ajovaiheen polttoaineen kulutus ja ketjukuljetuksissa myös siirtokuormauksen osuus polttoaineen kulutuksesta. Terminaalista eteenpäin kuljettava auto joko kuormataan kokonaan maasta (100 %:n tapaus kuvissa 34–35), kuormataan puoliksi 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 15 %:n säästön polttoaineen kulutuksessa tuoretonnia[6] kohden. 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.

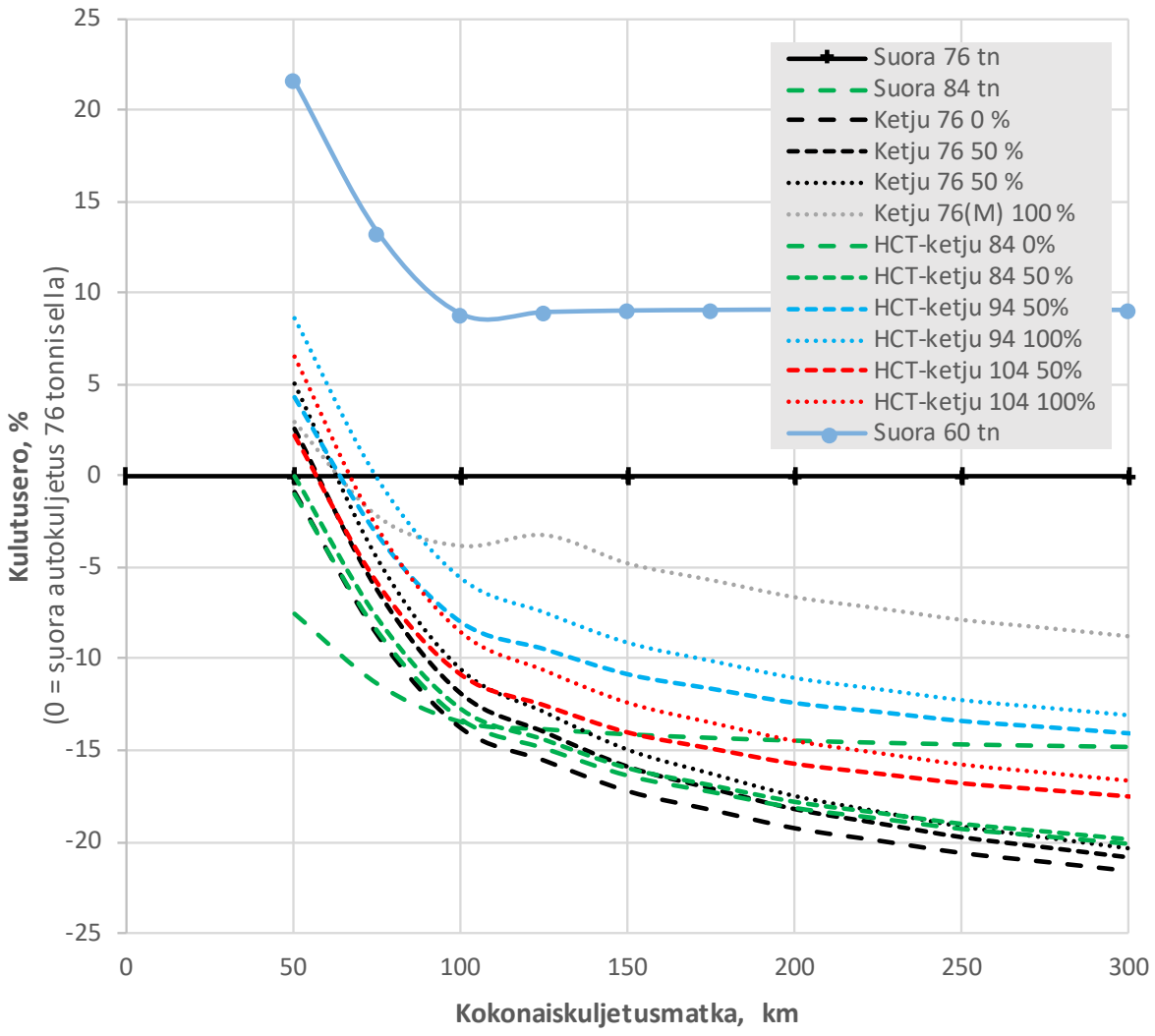
Hakekuljetuksissa HCT-yhdistelmät tuovat 7–16 %:n polttoaineen kulutussäästön 76-tonniseen yhdistelmään verrattuna kuljetettua tuoretonnia kohden laskettuna (kuvat 36–37).

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.

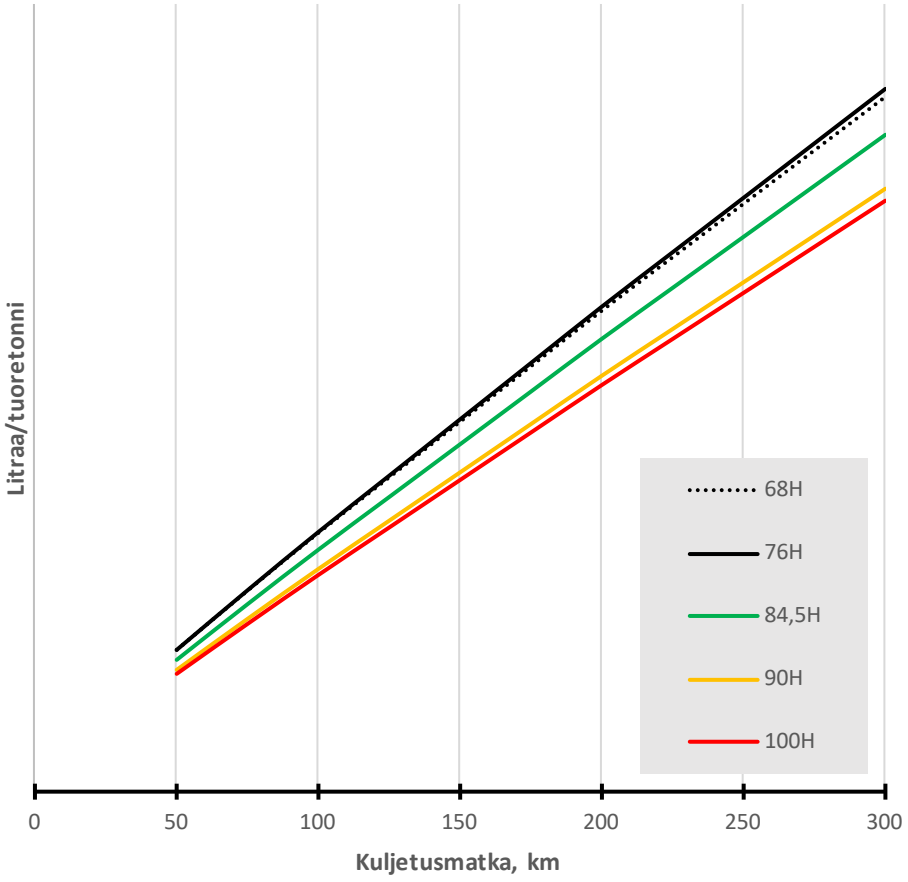
[6] Tuoretonni = tonni pyöreää puuta tai haketta kuljetuskosteudessa



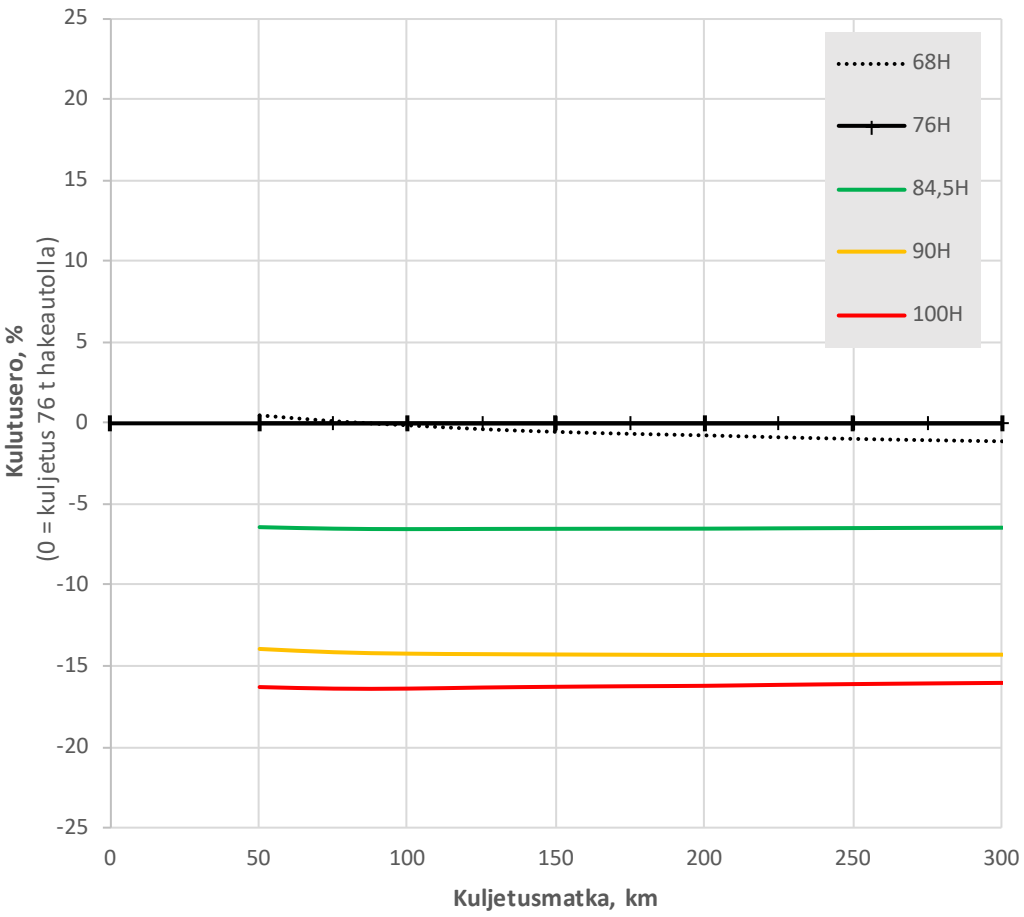
Kuva 34. Puutavaran kuljetusketjujen polttoaineen kulutuksen vertailut eri kuljetusmatkoilla (litraa/tuoretonni).



Kuva 35. Puutavaran kuljetusketjujen polttoaineen kulutuksen vertailut eri kuljetusmatkoilla (erotus suoraan kuljetukseen 76-tonnisella yhdistelmällä, % per kuljetettu tuoretonni).



Kuva 36. Sivutuotehakekuljetusten polttoaineen kulutuksen vertailut eri kuljetusmatkoilla (litraa/tuoretonni).



Kuva 37. Sivutuotehakekuljetusten polttoaineen kulutuksen vertailut eri kuljetusmatkoilla (erotus kuljetukseen 76-tonnisella yhdistelmällä, % per kuljetettu 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 9). Taulukossa 10 on laskettu polttoaineen kulutuksia per tkm raakapuun irtotilavuusmassan mukaan.

Taulukko 9. 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 10. 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

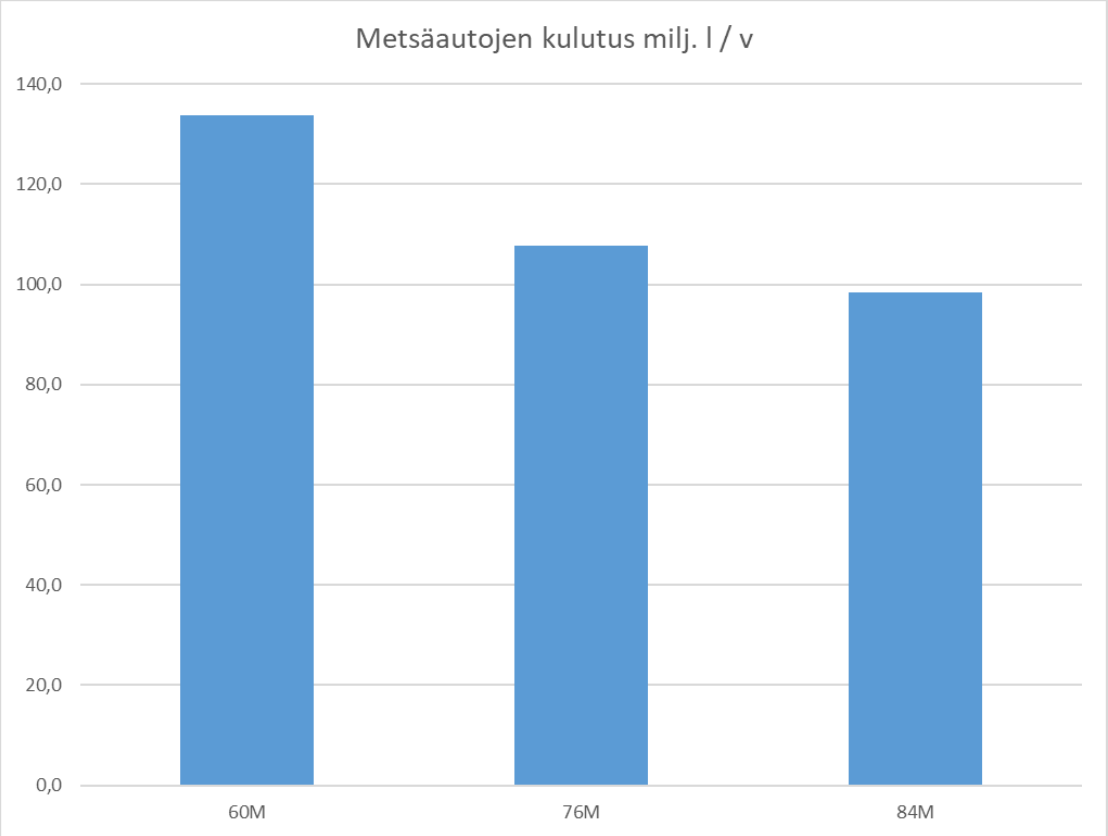
Kansallisen energia- ja ilmastostrategian (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017) mukaan liikenteen päästöjä tulee vähentää vuoteen 2030 mennessä noin 50 % vuoden 2005 tilanteeseen verrattuna. Päivitetty strategia valmistuu vuoden 2021 aikana.

Valtakunnallisissa laskelmissa HCT-yhdistelmien vaikutuksista puutavarakuljetusten hiilidioksidipäästöihin ja päästökustannuksiin käytetään seuraavia oletuksia:

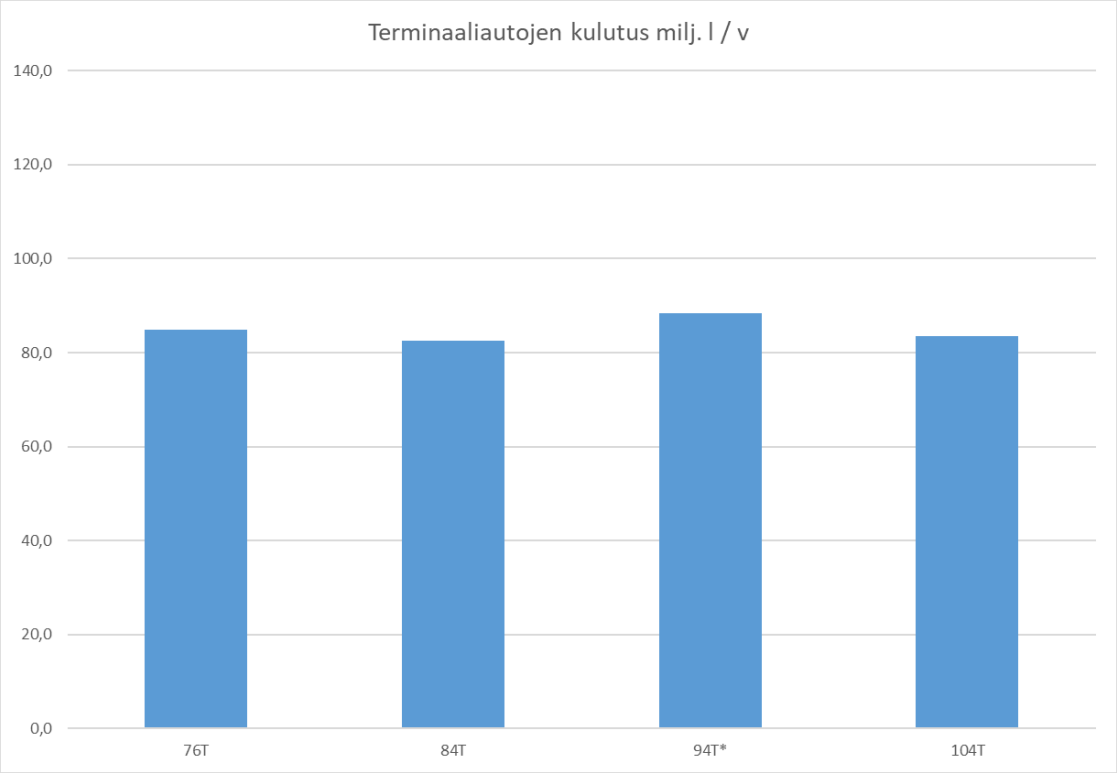
- kuljetusvolyymit ovat vuoden 2018 mukaiset (ks. taulukko 1)
- keskikuljetusmatka puutavarayhdistelmillä 105 km ja hakeyhdistelmillä 75 km, täysi menokuljetus ja tyhjä paluukuljetus
- 60-tonnisen metsäauton kulutustaso on tutkimuksen Pennanen ym. (2004) mukainen
- muiden ajoneuvojen kulutustasot ovat aiemmin esitettyjen Metsäteho Oy:n kulutusfunktioiden mukaiset
- polttoaineen hiilidioksidipäästökerroin on vuoden 2019 mukainen (2,1924 kg/diesellitra)(Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy)
- hiilidioksidin päästökustannus on 37 €/päästötonni (vuoden 2010 rahassa) (Liikennevirasto 2012).

Kaikki kuljetukset yhden kokoluokan yhdistelmillä

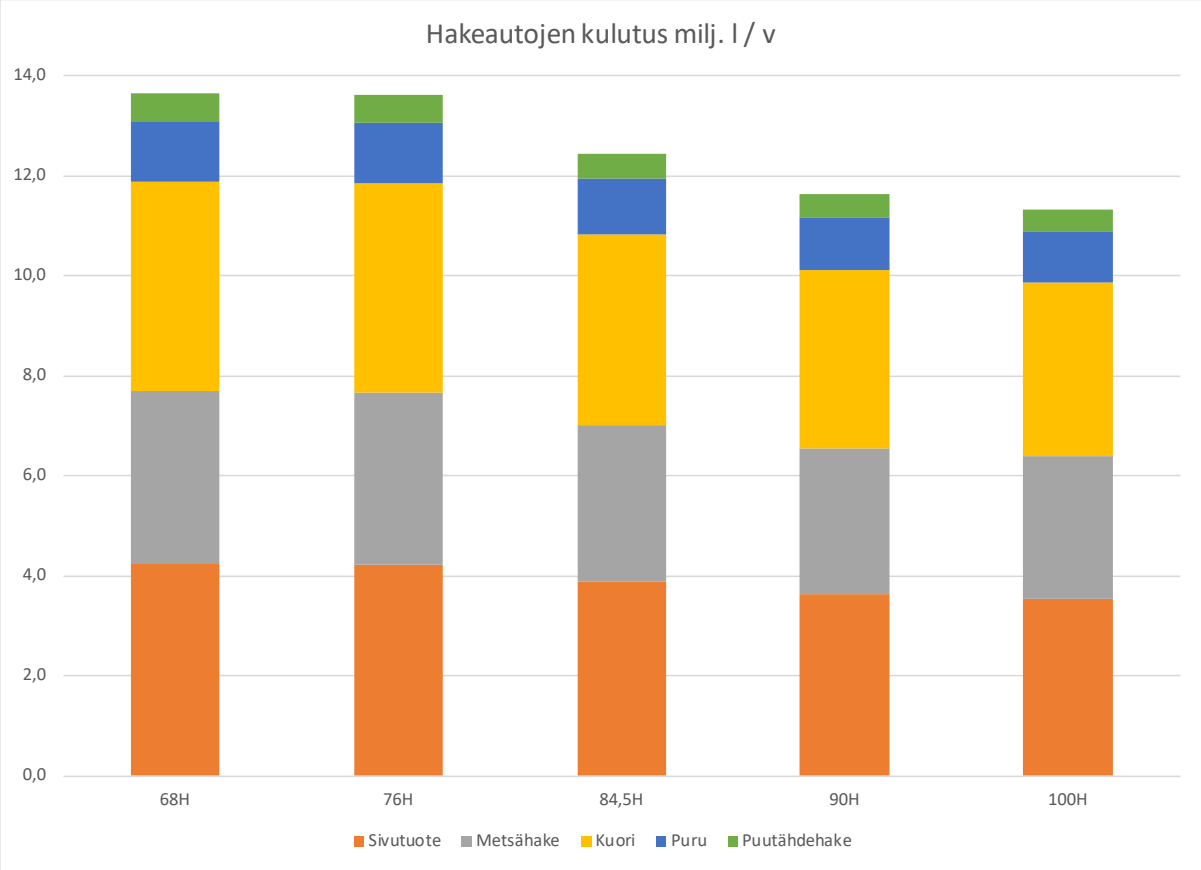
Siirtyminen 76-tonnisista metsäautoista 84-tonnisiin puutavarayhdistelmiin vähentäisi vuodessa 9 milj. litraa dieselin kulutusta (kuva 38). Pelkästään keskimatkan mukaan laskettuna (ottamatta huomioon, että suuremmat HCT-yhdistelmät ovat taloudellisempia keskimääräistä pidemmillä kuljetusmatkoilla) ja ilman oletusta meno-paluukuljetuksista, 84-tonninen terminaaliauto vähentäisi polttoaineen kulutusta 2,3 milj. litraa vuodessa ja 104-tonninen 1,4 milj. litraa vuodessa (kuva 39). Laskennallisesti muodostettu 94-tonninen puolestaan lisäisi kulutusta. Hakeautojen osalta HCT-yhdistelmät vähentäisivät vuosittaista polttoaineen kulutusta 1,2–2,3 milj. litraa (kuva 40).



Kuva 38. Valtakunnallinen pyöreä puun kuljetusten polttoaineen kulutus kalustokoon mukaan (milj. l/v, suora kuljetus metsäautoilla tehtaalle, kuormain 4 t sisältyy omapainoon).



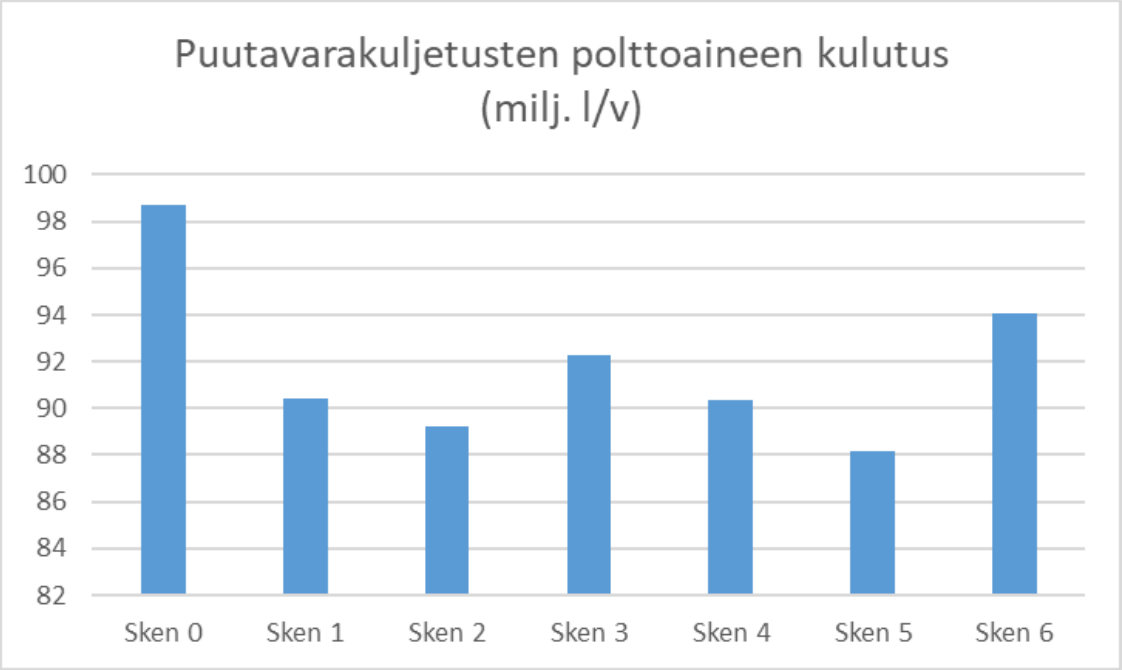
Kuva 39. Valtakunnallinen pyöreän puun kuljetusten polttoaineen kulutus kalustokoon mukaan (milj. l/v, terminaaliautot).



Kuva 40. Valtakunnallinen hakekuljetusten polttoaineen kulutus kalustokoon mukaan (milj. l/v).

Skenaarioita erilaisilla yhdistelmien kokojakaumilla

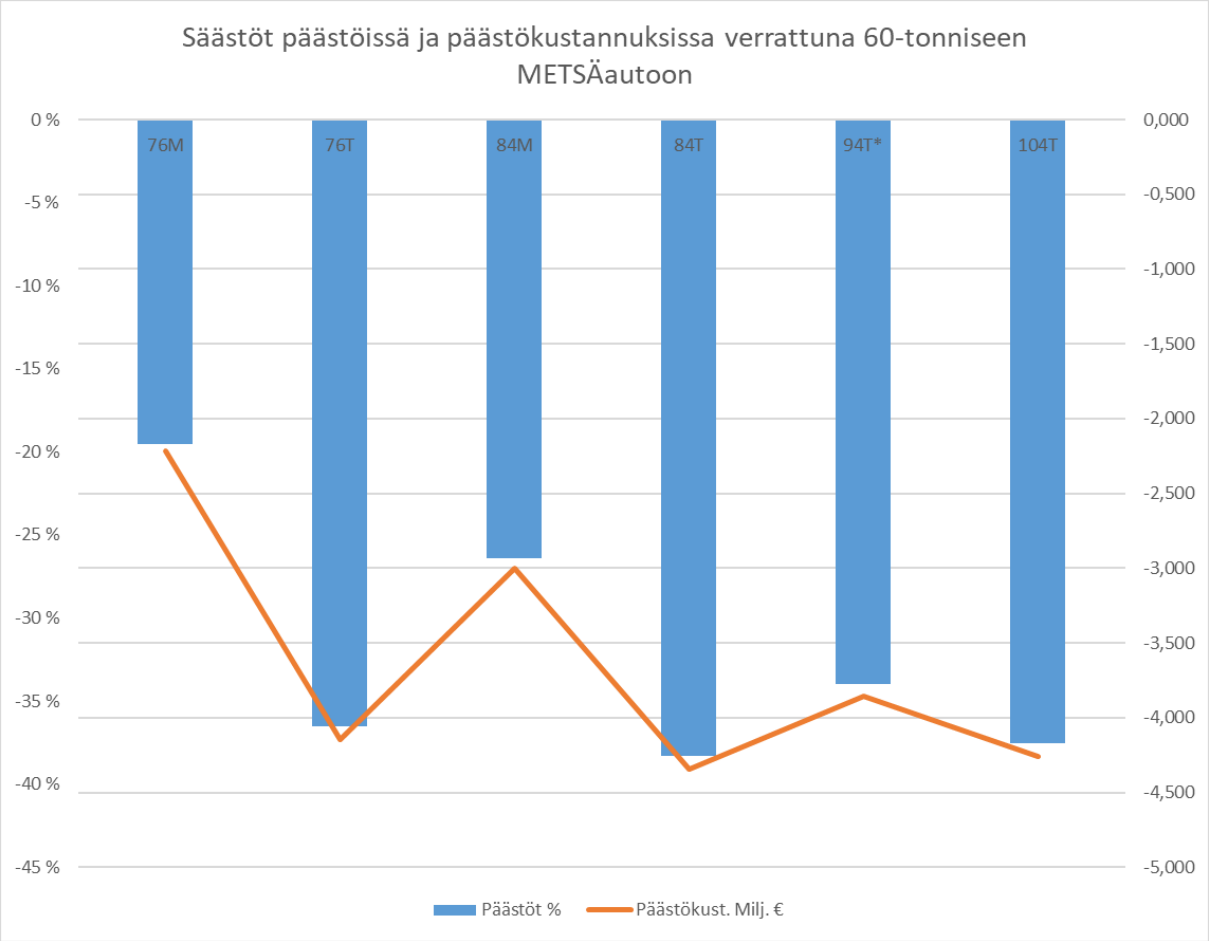
Nykytilanteeseen (skenaario 0) nähden puutavarakuljetusten polttoaineen kulutus vähentyisi skenaarion 5 mukaisella yhdistelmien kokojakaumalla, jossa maksimissaan 100 km:n kuljetukset ajettaisiin 84-tonnisella ja vähintään 100 km:n kuljetukset 94- ja 104-tonnisilla (kuva 41; skenaarioiden kuvaukset tarkemmin taulukossa 4). Pienin hyöty nykytilaan nähden saavutettaisiin skenaariolla 6, jossa maksimissaan 100 km:n kuljetuksissa käytettäisiin pääosin 76-tonnisia yhdistelmiä. Vähintään 100 km:n kuljetuksissa puolet ajettaisiin nykyisillä 76-tonnisilla yhdistelmillä ja puolet 84–104-tonnisilla yhdistelmillä. Hakeyhdistelmien osalta vastaavat skenaariot lasketaan seuraavaan raporttiversioon.



Kuva 41. Puutavarakuljetusten vuosittainen polttoaineen kulutus eri skenaarioissa. Eri kuljetusmatkaoletuksista johtuen skenaario 0:n vuosikulutus eroaa kuvissa 38–39 esitetyistä vuosikulutuksista.

HCT-kuljetusten vaikutukset päästöihin

Kuvassa 42 on esitetty, miten paljon HCT-tutkimuksissa mukana olleet yhdistelmät ja verrokit vähentäisivät puutavarakuljetusten päästöjä verrattuna vuonna 2004 tutkittuihin 60-tonnisiin metsäautoihin. Vertailulla voi karkeasti arvioida sitä, missä määrin edellä kuvattu päästövähennystavoite voitaisiin puutavarakuljetuksissa saavuttaa ajoneuvojen kokoluokkaa suurentamalla. Myös ajoneuvojen polttoainetehokkuus on kehittynyt vuodesta 2004. Vertailussa ei oteta huomioon kuljetettavan puun määrän, keskikuljetusmatkan tai biopolttoaineen osuuden muutoksia vuoden 2004 jälkeen.



Kuva 42. Säästöt vuosittaisissa hiilidioksidipäästöissä (%) ja päästökustannuksissa (milj. €/v), mikäli kaikki pyöreä puu kuljetetaan ko. yhdistelmillä 60-tonnisen metsäauton sijasta.

Ruotsissa on tutkittu aerodynaamisuuden kehittämisen vaikutuksia HCT-puutavara-yhdistelmien 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 Liikennevirasto-ton selvityksessä (Sauna-aho ym. 2018).

Liikennevirasto (2018a) arvioi tierasitusvaikutuksia HCT-reitistön mahdollisen laajuuden mukaan seuraavasti:

1. Paripyöräperävaunuja käytettäessä sallitaan 81,5–82 t (10 akselia), 87–88 t (11 akselia) ja 92,5–94 t (12 akselia) vain keskeisillä hyvin rakennetuilla pääteillä
    - Hyvin rakennetulla päätieverkolla AASHO-tierakenneteorian mukaan 94-tonniset, 12-akseliset yhdistelmät vähentävät tierasitusta verrattuna 76-tonnisiin ja 9-akselisiin yhdistelmiin, kun kuljetetaan sama tavaramäärä.

- Teillä, joiden pohjamaa on heikko ja päällysteet ovat ohuet, 14-akselinen 120-tonninen yhdistelmä aiheuttaa jopa 2 kertaa suuremman uran kuin kaksi 7-akselista 60 tonnin yhdistelmää, jotka ajavat vähintään 30 minuutin välein.

2. Em. yhdistelmät sallitaan myös muulla tieverkolla
   - Yli 9-akseliset lisäävät kuormattuna ajossa tierasitusta ainakin seuraavissa tilanteissa:
     - Turvemaiden alueet, joilla on heikko päällystetty tai päällystämätön tierakenne (urautuminen ja verkkohalkeilu jopa 1,5-kertainen sulan maan aikana)
     - Märän siltti- ja savialueen tiet, joilla on heikko päällystetty tai päällystämätön tierakenne (urautuminen ja verkkohalkeilu jopa 1,5-kertainen ainakin keväällä ja märkänä syksynä)
     - Hiekka- ja moreenialueiden tiet, joilla on ohut päällysrakenne ja ohut päällyste (urautuminen ja verkkohalkeilu voi nopeutua hiukan).
   - Yli 76-tonnisten salliminen muulla tieverkolla vaatisi arviolta noin 70 milj. euron vuosittaiset lisäkustannukset tierakenteiden vahvistamiseen tai tihentyneeseen urien korjaukseen.

AASHO-teorian mukaisissa laskelmissa on verrattu eri kokoisten yhdistelmien kuormaa yhdistelmien ekvivalenttiakseleita[7] kohden. Teoria soveltuu teille, jotka on rakennettu tiesuunnitteluohjeiden ja laatuvaatimusten mukaan. Laskelmassa on otettu myös huomioon se, että isompi ajoneuvo vaatii vähemmän ajokertoja saman kuormamäärän kuljettamiseen (tierasitus samalle kuormamäärälle on sitä pienempi, mitä suurempi kuorma per ekvivalenttiakseli on taulukossa 11). Laskennallisesti 3+4+5-akselisen ja 94-tonnisen puutavarayhdistelmän tierasitus on 74 % 77-tonnisen tierasituksesta (taulukko 11). 12-akselisella ja 100-tonnisella puutavarayhdistelmällä hyötykuormaan suhteutettu tierasitus kasvaa 76-tonniseen verrattuna, jos puun irtotilavuusmassa on alle 300 kg/m^3 (taulukko 12). Tätä painavammalla puulla tierasitus vähenee 76-tonniseen verrattuna. (Sauna-aho ym. 2018).

Taulukko 11. Tiekuormituksen määräytyminen puutavarayhdistelmien ominaisuuksien mukaan (Sauna-aho ym. 2018).

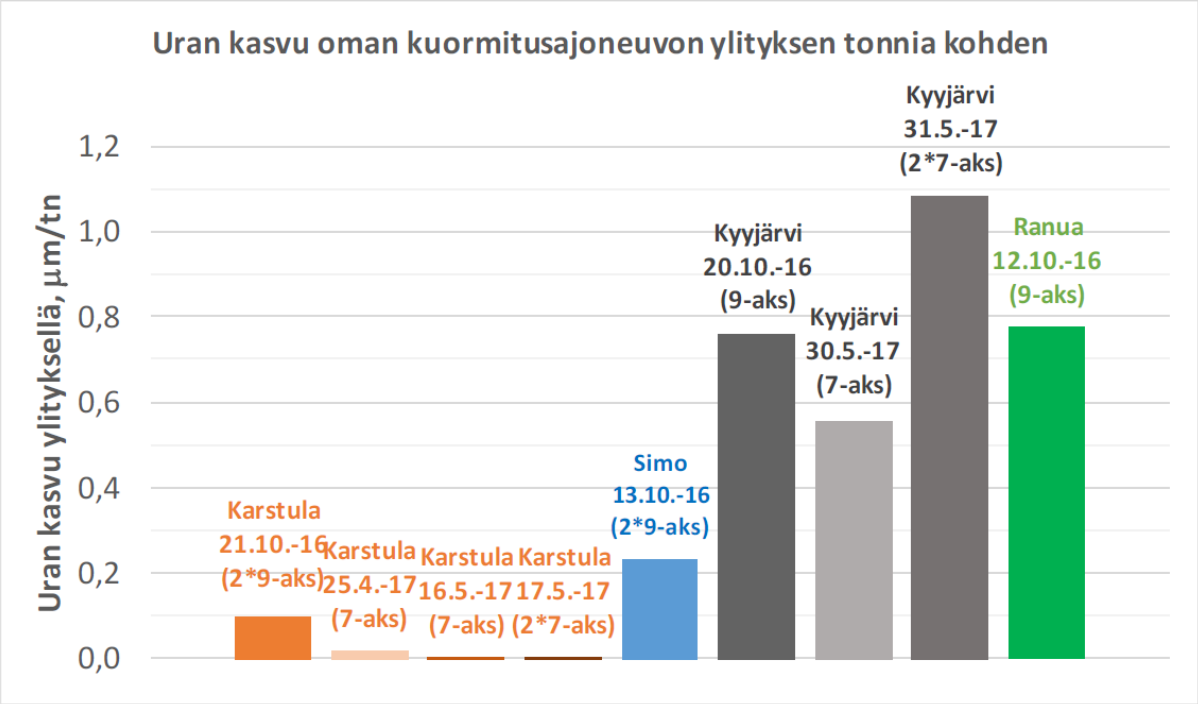
Ajo-neuvo	Kokonais-massa t	Akselit yht.	Pyörät	Ekvivalentti-akselit	Kuorma per ekvivalent-tiakseli t
Verrokki	77	9	32	4,61	11,23
HCT	94	12	42	4,35	15,09

[7] Yksi ekvivalenttiakseli tarkoittaa tiekuormitusta, jonka ns. yksikköakseli eli yksi paripyörin varustettu akseli, jonka massa on 10 t, aiheuttaa tiehen

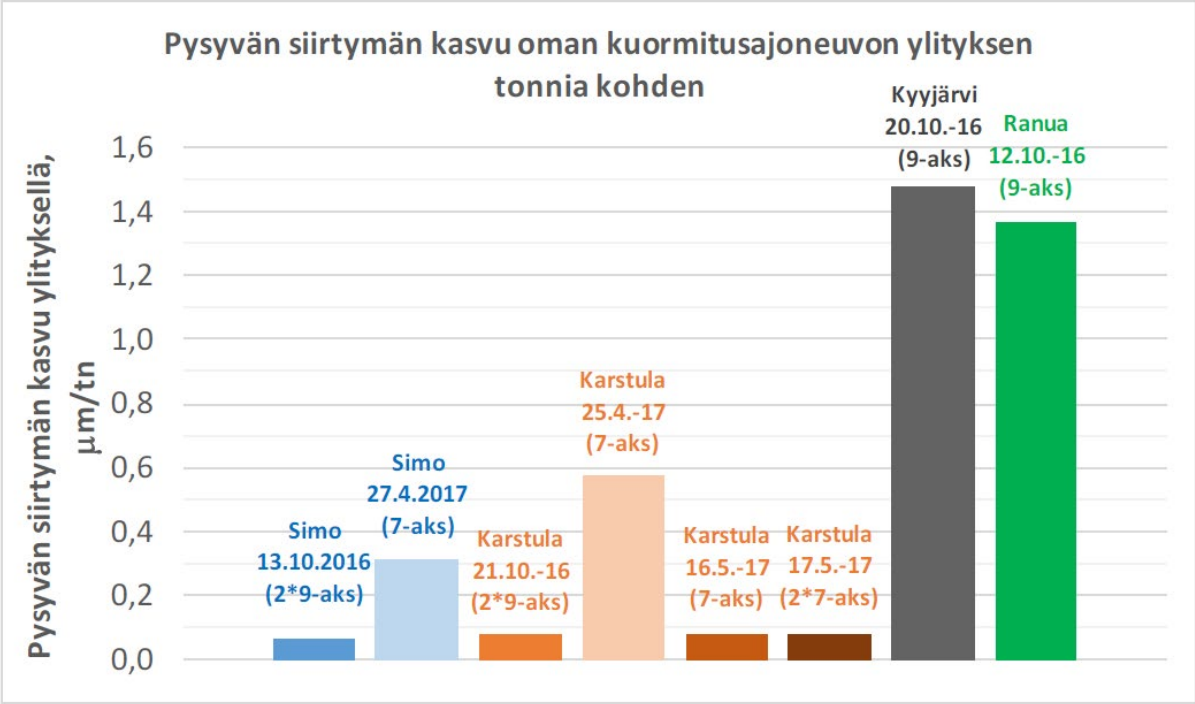
Taulukko 12. Puutavarayhdistelmien tiekuormitus raakapuun irtotilavuusmassan mukaan (Koskinen & Sauna-aho teoksessa Sauna-aho ym. 2018).

Raakapuun irtotila-vuusmassa kg/m³	Tiekuormitus / HCT-ajoneuvo	Tiekuormitus / Normaaliajoneuvo	Muutos %
200	23,584	28,925	+22,6
240	22,977	25,772	+12,2
290	21,086	21,407	+1,5
300	20,621	20,564	-0,3
310	20,139	19,741	-2,0
360	17,620	16,013	-9,1
380	16,614	14,715	-11,4
400	15,633	13,526	-13,5
440	13,786	11,454	-16,9
470	12,520	10,138	-19,0
500	11,363	8,998	-20,8

Kokeellisia tierasitustutkimuksia on tehty valtion päällystetyillä ja sorateillä sekä yksityisillä sorateillä (yhteenvetoraportti Vuorimies ym. 2019b). **Tampereen yliopiston** ensimmäisessä tutkimusraportissa (Vuorimies ym. 2018) esitettiin tulokset vuosien 2015–2017 tierasitustutkimuksista (kuvat 43–44). ”HCT-yhdistelmänä” käytettiin kahta peräkkäin ajavaa 7- tai 9-akselista yhdistelmää, joiden toisistaan poikkeavat ajolinjat vaikuttivat paljon urasyvyyksiin (takana tulleet renkaat siloittivat aiempien renkaiden synnyttämiä uria). Runsas liikenne tutkimustiellä aiheutti tien rakenteen tiivistymistä, mikä myös vaikutti mittaustuloksiin. Karstulan, tutkimuskohteista paksurakenteisimmilla (200 mm), tiellä eri kokoisten yhdistelmien vaikutukset ja niiden erot olivat pienet. Kyyjärven ohutrakenteisella (30–40 mm) tiellä 2*7-akselisen yhdistelmän vaikutukset olivat suuremmat kuin 9-akselisella (kuorman määrä, ylitysmäärät ja ylitysten väliset tauot huomioon ottaen). Simon tutkimuskohteen tuloksia häiritsi muu liikenne tiellä, joten sen mittaukset toistettiin Tampereen yliopiston toisessa tutkimuksessa.



Kuva 43. Urakasvut kuormitusajoneuvon massaan suhteutettuna (Vuorimies ym. 2018). Muun liikenteen aiheuttaman tien häiriintymisen takia Simon tutkimus toistettiin toisessa tutkimuksessa.



Kuva 44. Pysyvien siirtymien kasvu kuormitusajoneuvon massaan suhteutettuna (Vuorimies ym. 2018). Muun liikenteen aiheuttaman tien häiriintymisen takia Simon tutkimus toistettiin toisessa tutkimuksessa.

Tampereen yliopiston toisessa tutkimusraportissa (Vuorimies ym. 2019a) on esitetty vuoden 2018 mittaustulokset. Vertailukohteina oli yksi 7-akselinen ja kaksi peräkkäin ajavaa 7-akselista.

- Simon ohutpäällysteisellä (noin 110 mm), hiekkaisen pohjamaan tiellä yhdistelmien aiheuttamissa urasyvyyksissä ei havaittu eroja keväällä 2018. Simossa käytettiin yhdistelmien ajolinjojen hallittua muuttamista urien vähentämiseksi. Kosteusprofiilit pysyivät muuttumattomina, joten kosteuden pumppautumista kuormitusten aikana ei havaittu.
- Ohutrakenteisimmassa kohteessa (Kyyjärvi syksyllä 2018, päällysteen paksuus 30–40 mm) 2*7-akselinen yhdistelmä aiheutti urasyvyyden kasvua ja 7-akselinen yhdistelmä pienensi tai vähintään piti urasyvyyden samalla tasolla. Kevään 2018 tulokset eivät ole vertailukelpoisia tien puutteellisen tiivistymisen takia.
- Ranuan soratiekohteessa (pohjamaa turpeen sekaista silttimoreenia) syksyllä 2018 2*7-akselinen aiheutti enemmän urasyvyyden kasvua kuin yksittäinen 7-akselin yhdistelmä. Kosteusprofiilissa ei havaittu kosteuden pumppautumista tierakenteessa.

Tutkimustulosten pohjalta on todettu, että edellä kuvattu AASHO-teoria pitänee paikkansa kantavilla pohjamailla sijaitsevilla päällystetyillä teillä sekä paksupäällysteisillä teillä, joiden päällysteen paksuun on yli 200 mm. Tällöin 9–14-akseliset yhdistelmät eivät todennäköisesti aiheuta enempää urautumista kuin 7-akselisetkaan yhdistelmät.

Oulun yliopiston (Pekkala 2018) ensimmäisen tierasitustutkimuksen tuloksia on esitetty liitteessä 3. Päällystettyjen teiden tutkimuksiin osallistui 7-, 10- ja 13-akselisia yhdistelmiä ja sorateiden tutkimuksiin 7-, 9- ja 10-akselisia yhdistelmiä. Kaikissa tapauksissa vertailukohteena ei ollut 9-akselista yhdistelmää, joka on tällä hetkellä yleisin puutavarakuljetusten yhdistelmäkoko. Tierasitusta kuvaa keskeisimmin urasyvyys ja sen kasvu. Muut mittaukset lähinnä tuottavat lisätukea urasyvyyskehityksen tulkintaan.

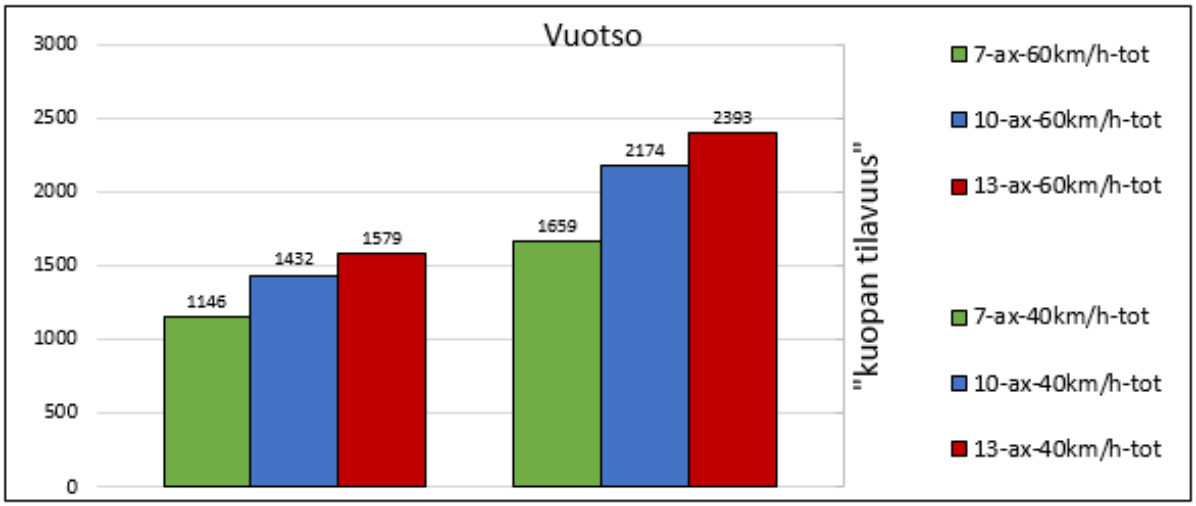
Urasyvyys ja urakasvu
Tutkimusmenetelmien epätarkkuudesta johtuen mittaustulosten perusteella erikokoisten yhdistelmien ja niiden aiheuttamien urasyvyyksien muutosten välille ei pystytty osoittamaan riippuvuutta. Useamman yhdistelmän letka-ajossa takana tulevat ajoneuvot jopa siloittavat ensimmäisten yhdistelmien aiheuttamia uria.

Kosteusprofiili
Paksurakenteisella päällystetyllä tiellä ei havaittu merkittävää kosteusprofiilien muutosta. Soratiellä havaittiin jonkin verran kosteusprofiilin kasvua rakenteen ohuimmissa kohdissa. Yksittäisten yhdistelmien ja niiden aiheuttamien kosteusprofiilin muutosten välille ei pystytty määrittämään riippuvuuksia.

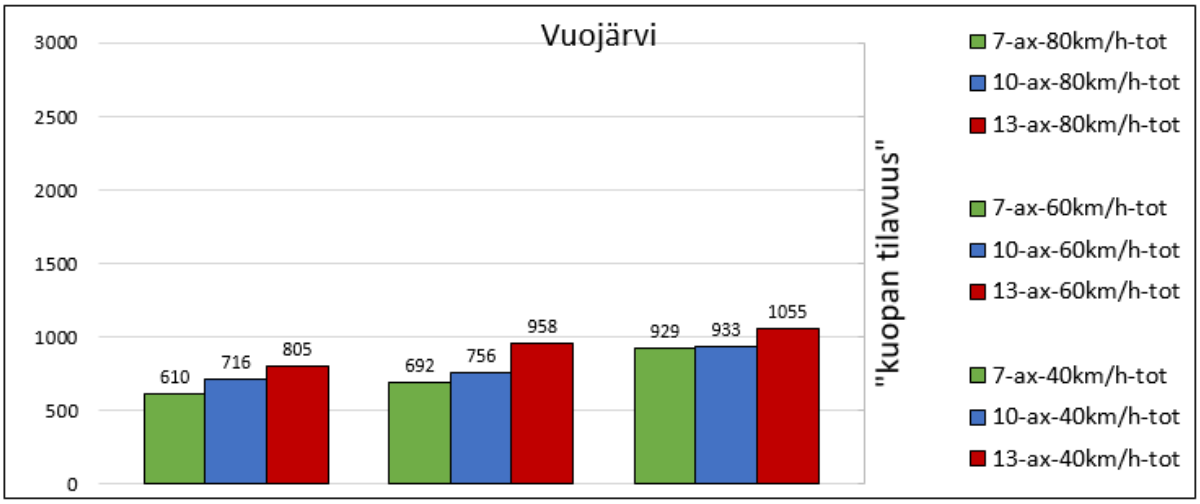
Huokospaine (koskee vain sorateitä)
Varsinkin erittäin hitaasti ajattaessa 9- ja 10-akselisilla yhdistelmillä tierakenteen vaurioitumisvaara alkaisi kasvaa (hitaasti ajattaessa rasituksen kesto pitenee). 9- ja 10-akselisten yhdistelmien vaikutuksessa huokospaineeseen ei ole merkittävää eroa.

Tien pinnan hetkelliset venymät/puristumat (”kuopan” tilavuus)
”Kuopan” tilavuus pääosin kasvoi yhdistelmien akseleiden lukumäärän kasvaessa. ”Kuopan” tilavuuteen vaikuttaa merkittävästi myös ajonopeus, koska hitaasti ajettaessa rasitusajan kesto pitenee. Päällystetyillä teillä 13-akselisen aiheuttama ”kuoppa” oli 1,1–1,9-kertainen verrattuna 7-akselisiin ja 10-akselisen aiheuttama ”kuoppa” 1,2–1,3-kertainen verrattuna 7-akselisiin. Vertailussa ei ollut mukana tänä päivänä yleisintä 9-akselista yhdistelmää. Sorateillä 10-akselisen yhdistelmän aiheuttama ”kuoppa” oli 0,9–1,2-kertainen 9-akseliseen verrattuna.

”Kuoppa” suhteessa hyötykuormaan
Laskettaessa ”kuopan” tilavuutta suhteessa hyötykuormaan otettiin huomioon kunkin tutkimusyhdistelmän kuorman paino tutkimushetkellä. Pääosin hyötykuormaan suhteutettu ”kuopan” tilavuus oli pienempi HCT-yhdistelmillä kuin verrokkiyhdistelmillä (kuvat 45–46).



Kuva 45. Eri kokoisten ja eri vauhdilla ajavien puutavarayhdistelmien aiheuttama tien pinnan hetkellinen venymä/puristuma (”kuoppa”) Vuotson ohutrakenteisella tiellä (Pekkala 2018).



Kuva 46. Eri kokoisten ja eri vauhdilla ajavien puutavarayhdistelmien aiheuttama tien pinnan hetkellinen venymä/puristuma ("kuoppa") Vuojärven paksurakenteisella tiellä (Pekkala 2018).

Taulukkoon 13 on koottu tuloksia **Oulun yliopiston toisesta tierasitustutkimuksesta** (Pekkala & Haataja 2019). Tutkimuksessa verrattiin 7-, 9- ja 2*7-akselisia puutavarayhdistelmiä (jälkimmäinen koostui kahdesta peräkkäin ajavasta 7-akselisesta). Kullakin yhdistelmällä tehtiin eri määrä ylityksiä, jotta yhdistelmien yhteenlaskettu hyötykuormien paino oli sama. Tutkimus tehtiin yhdellä soratiellä, jolla oli sekä moreeni- että turvepainotteiset osuudet. Tulosten tulkintaa vaikeuttivat tien rakenteiden tiivistyminen lanauksen jälkeen, tien epätasainen painuminen ylimääräisen liikenteen aiheuttamana sekä kuivuuden aiheuttama tien kovuus ja pölyisyys.

Yhdistelmät ajoivat ensin samaa ajouraa pitkin ja sitten jo syntyneiden urien vierestä. Ajattaessa aiempien urien vierestä, urat tasoittuivat, jolloin urautumisen kokonaisvaikutus pieneni. Peräkkäin ajavien yhdistelmien ajolinjat vaihtelivat, joten 2*7-akselisen tuloksissa oli laaja hajonta. Tutkimuksessa havaittiin, että urautuminen vaihtelee tien samoissa kohdissa yhdistelmän ajosuunnasta riippuen. Muun liikenteen aiheuttaman tien häiriintymisen takia eri yhdistelmiltä mitattuja urasyvyyksien kasvuja ei voida pitää vertailukelpoisina.

Taulukko 13. Yhteenveto Oulun yliopiston toisen tierasitustutkimuksen tuloksista Jaatilassa (tietyyppien perässä osuuden kantavuus (MN/m2) ja tutkimusajoneuvojen akseleiden lukumäärät ko. tutkimuskohteessa) (Pekkala & Haataja 2019).

	Jaatila, Kesäkuu 2018 Soratie (moreeni) (150; 7, 9, 2*7)	**Jaatila, Kesäkuu 2018 Soratie (turve) (100; 7, 9, 2*7)**
Urasyvyyden kasvu (samalla yhteenlasketulla nettokuormalla)*	7-akselisella 1,5 mm, 9-akselisella 2 mm ja 2*7-akselisella 0,8 mm*	7-akselisella 8 mm, 9-akselisella 13 mm ja 2*7-akselisella 1 mm*
Kosteusprofiilin muutokset	Mittausviikon mittausolosuhteissa ei havaittu merkittäviä muutoksia tien kosteusprofiiliin tien rakenteissa	
Muut tutkimukset	Tutkimuksessa testattiin tien pintamateriaalien siirtymää maahan upotettujen kuulien ja niiden maatutkauksen avulla sekä tiehen syntyvän harjanteen mittaamista. Näiden mittausten tuloksia ei kuitenkaan pidetty ko. menetelmillä toteutettuna tarpeeksi luotettavina.	

**Muun raskaan liikenteen aiheuttaman tien häiriintymisen takia havaitut erot urasyvyyksien kasvussa eivät ole vertailukelpoisia*

Taulukossa 14 on esitetty **yhteenveto** mittauksiin perustuneista tierasitustutkimuksista. HCT-yhdistelmien tierasitusvaikutuksia on verrattu nykyisiin yhdistelmiin eritasoisilla teillä. Vertailut

toteutettiin samalla yhteiskuormamäärällä. Paksupäällysteisillä teillä isojenkaan HCT-yhdistelmien ei havaittu merkittäviä urautumisia eri yhdistelmillä tai HCT-yhdistelmien aiheuttama urautuminen oli samaa tasoa nykyisiin yhdistelmiin verrattuna. Aivan ohuimmin päällystetyillä teillä HCT-yhdistelmät aiheuttivat enemmän urasyvyyksien kasvua kuin nykyiset yhdistelmät. Sorateillä eri tutkimusten tulokset poikkesivat jossain määrin toisistaan (johtuen myös yhdistelmien eri akselimääristä).

Taulukko 14. Yhteenveto urautumistutkimuksista. Tutkimusten toteutustavoissa oli eroja, joten tulokset eivät ole täysin keskenään vertailtavia.

<table>
<tr><th>Tutki-mus</th><th colspan="2">PAKSUPÄÄLLYSTEISET TIET</th><th colspan="2">OHUTPÄÄLLYSTEISET TIET</th><th colspan="2">SORATIET</th></tr>
<tr><td>TAU1</td><td colspan="2">Karstula (200 mm)</td><td colspan="2">Kyyjärvi* (30–40 mm)</td><td colspan="2" rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Ei merkittävää urautumista 7- eikä 2*7-akselisella</td><td colspan="2">2*7-akselisella suuremmat urasyvyydet kuin 9-akselisella</td></tr>
<tr><td>TAU2</td><td colspan="2" rowspan="2">-</td><td>Simo (110 mm)**</td><td>Kyyjärvi (30–40 mm)**</td><td colspan="2">Ranua***</td></tr>
<tr><td></td><td>Ei eroja urasyvyyksissä</td><td>2*7-akselisella urat kasvoivat, 7-akselisella ei vaikutusta</td><td colspan="2">2*7-akselisella suuremmat urasyvyydet kuin 7-akselisella</td></tr>
<tr><td>OY1</td><td>Vuojärvi (900 MPa)</td><td>Rovaniemi (290 MPa)</td><td colspan="2">Vuotso (190 MPa)</td><td>Ylikiiminki (100 Mpa)</td><td>Kuhmo (79 Mpa)</td></tr>
<tr><td></td><td>7-, 10- ja 13-akselisilla urasyvyyksissä ei voitu osoittaa eroja</td><td>Ei mitattu urasyvyyksiä</td><td colspan="2">7-, 10- ja 13-akselisilla urasyvyyksissä ei voitu osoittaa eroja</td><td>10-akselisen ”kuoppa”suhteessa hyötykuormaan 1,8-2,9-kertainen verrattuna 7-akseliseen</td><td>10-akselisen ”kuoppa”suhteessa hyötykuormaan 0,8-0,9-kertainen verrattuna 9-akseliseen</td></tr>
<tr><td>OY2</td><td colspan="2" rowspan="2">-</td><td colspan="2" rowspan="2">-</td><td>Jaatila, Rovaniemi (150 Mpa)</td><td>Jaatila, Rovaniemi (100 Mpa)</td></tr>
<tr><td></td><td>****</td><td>****</td></tr>
</table>

**Mittauksia myös Inarissa (70–90 mm) 10-akselisella yhdistelmällä eri kuormamäärillä*
***Mittauksia myös TAU1:ssä, mutta tuloksia jouduttiin hylkäämään*
****Kulutuskerros 100 mm, kantava kerros 100 mm ja vanha jakava/kantava kerros 250 mm*
*****Mittauksia häiritsi muu raskas liikenne tiellä, joten tuloksia ei esitetä taulukossa*

Liikenneviraston (2018b) ohjeessa luokitellaan **valtion** päällystetyt tiet taulukon 15 ja soratiet taulukon 16 mukaisesti. Valtion tieverkko (78 000 km) jakaantuu eri tieluokkiin seuraavasti: valtatiet 11 %, kantatiet 6 %, seututiet 17 % ja yhdystiet 65 % (Traficom 2019). Valtion päällystämättömiä teitä on 27 000 km. Kuntien katuverkko on 26 000 km, joka koostuu sekä päällystetyistä että sorateistä. (Väylävirasto 2019b). Toteutetut tierasitustutkimukset ovat kohdistuneet eri tasoisille teille.

Taulukko 15. Valtion päällystettyjen teiden kuormitusluokat, kantavuustavoitteet ja suoritetut tierasitustutkimukset (Liikennevirasto 2018b).

Kuormitusluokka (milj. akselia vuodessa)	Päällystekerrosten kokonaispaksuun (mm)	Kantavuustavoite (MPa)	Tierasitustutkimukset* (tieluokka)
60	160–240	540/545	OY1: Vuojärvi (valtatie, varalaskusuora)
25	120–200	470/520	TAU1: Karstula (kantatie)
10	90–170	415/495	TAU2: Simo (seututie)
5	60–140	360/470	-
2	60–100	285/420	OY1: Rovaniemi (katu)
0,8	40–80	145–400	OY1: Vuotso (entinen valtatie, nykyinen katu)
0,3	40	130–170	TAU1: Kyyjärvi (yhdystie)
SILLAT	80		-
PUTKISILLAT	ko. tien mukaan		-

**Kantavuuden mukaan*

Taulukko 16. Valtion sorateiden kantavuustavoitteet ja suoritetut tierasitustutkimukset (Liikennevirasto 2018b).

Kuormitusluokka	Ohjeellinen kantavuus kulutuskerroksen päältä (MPa)	Tierasitustutkimukset
Soratie 80 Sr, yleinen tie, paljon raskaita ajon., tärkeä asema tieverkossa	80	-
Soratie 70 Sr, yleinen tai yksityinen tie, paljon raskaita ajon., ei asemaa tieverkossa	70	TAU2: Ranua (yhdystie)
Soratie 60 Sr, yksityinen tie, vähän raskaita ajon., ei asemaa tieverkossa	60	-

Metsätieohjeiston lisäaineistossa (Strandström 2017b) kuvataan metsätieluokat ja niiden tavoitekantavuudet (taulukko 17). Yksityisen tieverkon kattavuus on 350 000 km. Verkko koostuu pääosin päällystämättömistä sorateistä. Tierasitustutkimukset ovat kohdistuneet korkeimpien luokkien metsäteihin.

Taulukko 17. Metsäteiden päällysrakenneluokat, tavoitekantavuudet ja suoritetut tierasitustutkimukset Jaatila poislukien (Strandström 2017b).

Päällysrakenneluokka	Tavoitekantavuus (MN/m^2)	Tierasitustutkimukset
1	Kevät: 80 (=>Kesällä 100)	OY1: Ylikiiminki
2	Kevät: 60 (=>Kesällä 75)	OY1: Kuhmo
3	Kesä: 60	-
4	Kesä: 50	-

Yksityisteiden nykyisistä kantavuuksista on vain rajoitetusti tietoa saatavilla. Maalaji tien alueella antaa karkean kuvan tien peruskantavuudesta (taulukko 18). GTK:n tarkempi maalajiaineisto on saatavissa vasta puolesta tarkastelun aineistosta.

Taulukko 18. Eri maalajien kantavuus ja osuus yksityisillä sorateillä (heikoin maalaji 100 metrin tieosuudella) (Strandström 2017a, Arbonaut Oy:n & Metsäteho Oy:n laskelma).

Maalaji	**Kantavuus (MN/m^2)**	**Osuus % (1:200 000 aineisto)**	**Osuus % (1:20 000 aineisto)**
Kallio	300	18	5
Sora	200 (150–280)	0	0
Soramoreeni	100 (70–150)	0	0
Hiekka	50 (35–70)	-	6
Hiekkamoreeni	20 (15–35)	0	24
Siltti/Silttimoreeni/ Savi	10 (5–15)	14	12
Lieju/Turve	5	10	3
Sekalajitteiset	Vaihtelee	58	0
Kartoittamaton	Ei tiedossa	0	50

3.7.2 Keinoja vaikuttaa tierasitukseen

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

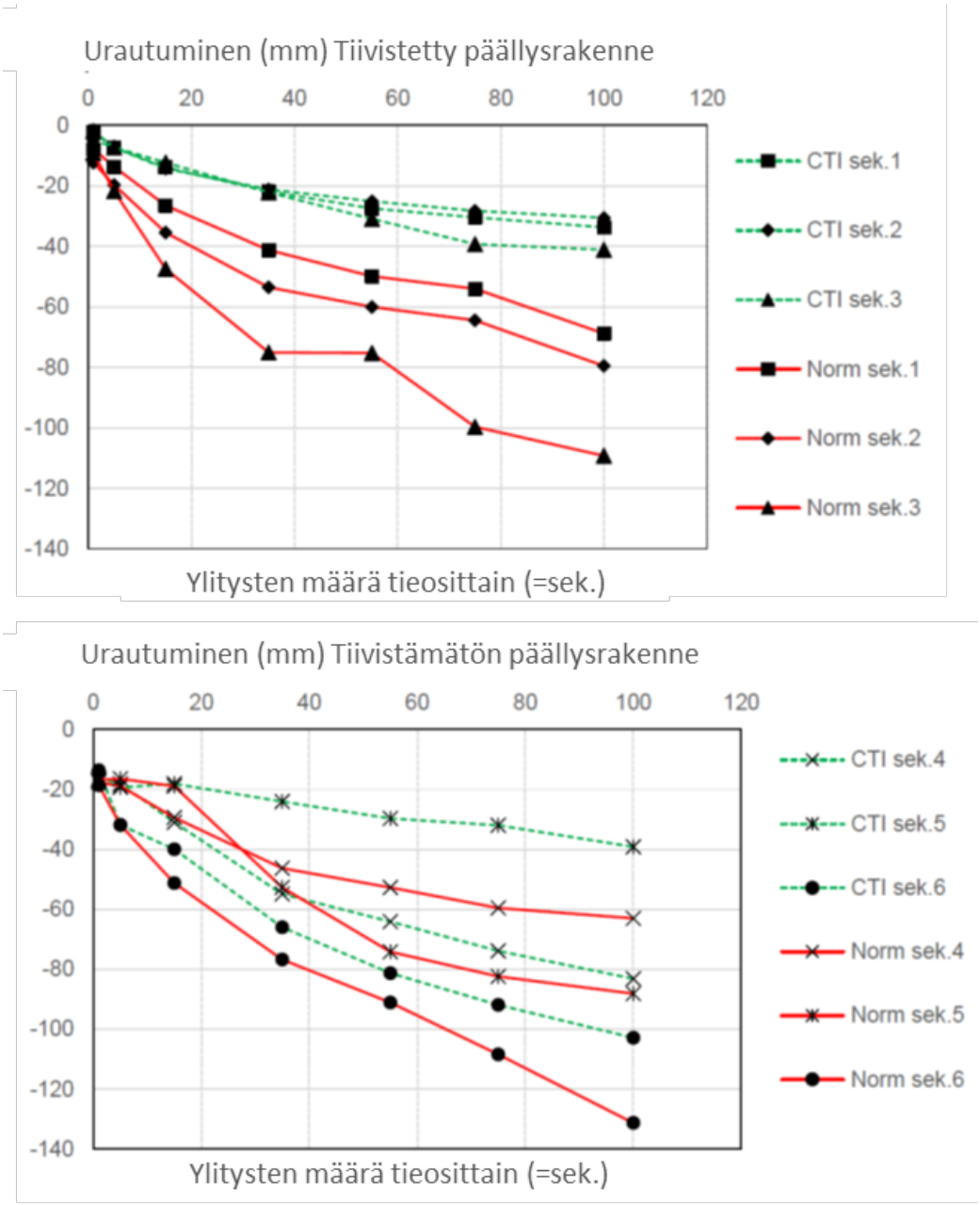
Olosuhteiden mukaan dynaamisesti vaihtuvat tien painorajoitukset
Oulun yliopistolla ja Ilmatieteen laitoksella on käynnistynyt kesällä 2020 Winter Premium -hanke, jossa selvitetään ajoneuvojen painojen noston mahdollisuuksia teiden ollessa roudassa. Liikenneviraston BIFI-pilotissa (Toivonen 2016) testattiin 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 kantavampien tieyhteyksien varrella sijaitseviin 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.

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

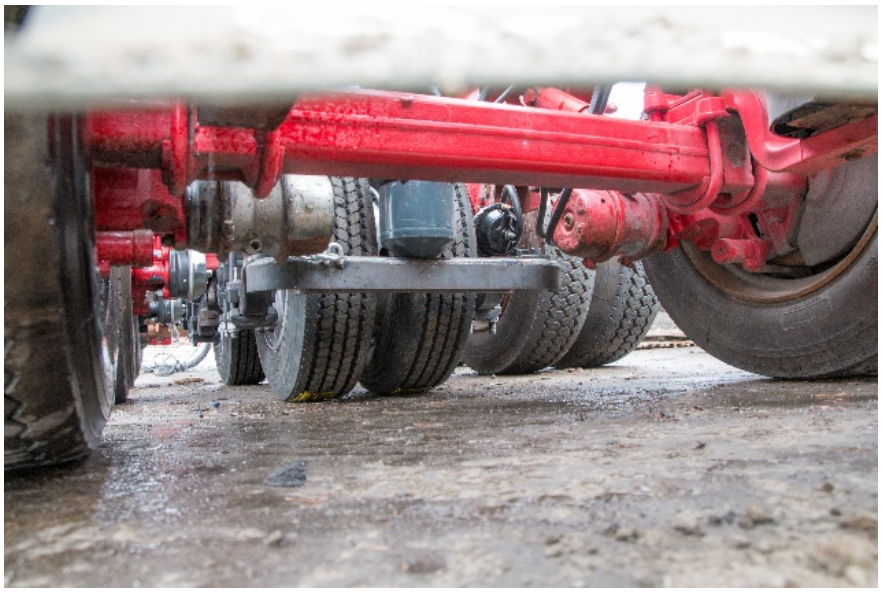
urautumia (kuva 47). CTI-varustelluilla yhdistelmillä voi ajaa valtion teillä myös kelirikosta johtuvien painorajoitusten aikana (Väylävirasto 2019a). CTI:n vaikutuksia HCT-yhdistelmien aiheuttamiin uriin tulisi tutkia.



Kuva 47. Tavallisen ja CTI-järjestelmällä varustellun puutavarayhdistelmän urautumisvaikutus (Bergqvist ym. 2016).

Puutavarayhdistelmien uusi akselistoratkaisu
AT Wheelsin akselistoratkaisussa puutavarayhdistelmän perävaunun kahden lisäakselin pyörät on sijoitettu akseliston keskelle (8(+2)-akselinen yhdistelmä) (kuva 48). 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. Tampereen yliopiston vetämässä tutkimuksessa (Vuorimies ym. 2019a) tutkittiin yhdistelmän vaikutusta ohutpäällysteisellä tiellä. Yhdistelmä aiheutti kymmenen ylityksen jälkeen 0,2 mm:n urasyvyyden kasvun. Tien mittausolosuhteiden muuttumisen takia yhdistelmän tulokset eivät ole vertailtavissa kahden muun tutkitun yhdistelmän tuloksiin.

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 19). Moreenipohjaisella tiellä 8(+2)-akselisen yhdistelmä urautumisvaikutus oli 9-akselista suurempi. 8(+2)-yhdistelmän vaikutusten luotettava arviointi vaatii vielä lisätutkimusta.



Kuva 48. AT Wheelsin akselistoratkaisu perävaunuun (Kuva: AT Wheels Oy).

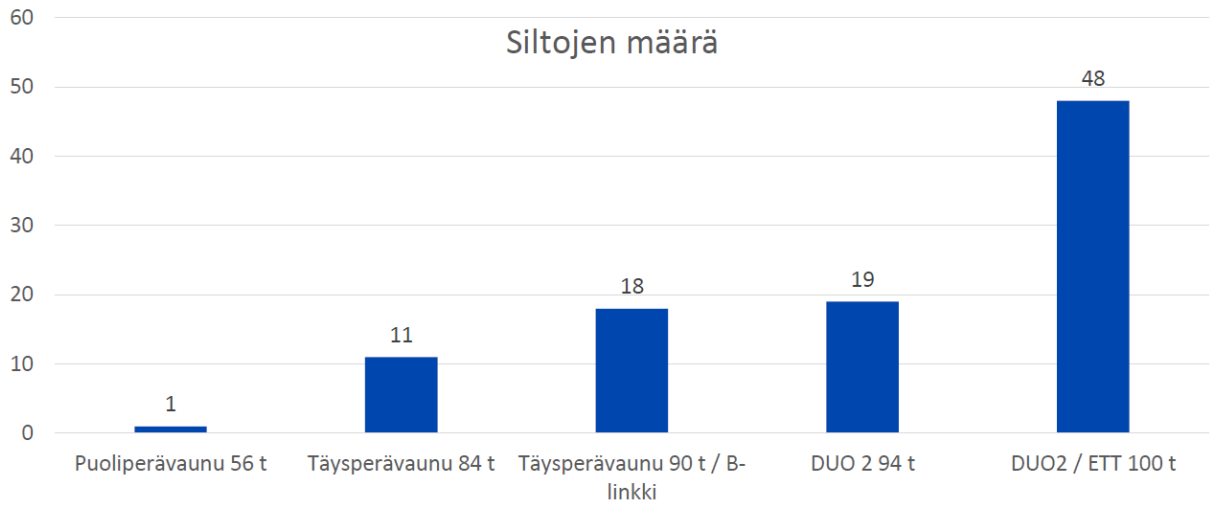
Taulukko 19. Urakehityksen keskimääräinen kasvu (mm), kun soratietä oli ajettu ensin 9-akselisella yhdistelmällä ja sitten 8(+2)-akselisella perävaunulla (kahdessa akselissa AT Wheelsin ratkaisu) (Pekkala & Haataja 2019).

Tietyyppi	9-aks.	8(+2)-aks.	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 2018a) tutki ongelmallisten siltojen määrää HCT-yhdistelmien eri kokoluokilla (84–100 tonnia) (kuva 49). 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 49. Ongelmasiltojen määrä eri yhdistelmillä pääväylillä ja nykyisellä HCT-lupien verkolla (Liikennevirasto 2018a).

Suomen Tieyhdistyksen (Rahja 2018) arvion mukaan yksityisteillä on yli 10 000 siltaa, joista asutuilla teillä on noin kolmannes. Kattavaa tietoa siltojen kantavuuksista ei ole, mutta tieto painorajoituksista tulee lisääntymään Digiroadissa ja Suomen metsäkeskuksen siltahankkeen yhteydessä. Metsähallitus Metsätalous Oy:llä on käynnissä yrityksen omien teiden siltoja koskevia tutkimuksia. Esimerkiksi 85-tonnisen ja 28-metrisen HCT-yhdistelmän rasitus tyyppisillalla Ble II jää kantavuuslaskelman mukaan pienemmäksi kuin 76-tonnisen yhdistelmän (Sweco 2020).

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. HCT-kokeiluiden ajan on ollut myös käytössä väliaikaisia liikennevaloja, joilla estetään silloilla muu liikenne samaan aikaan HCT-yhdistelmän kanssa (kuva 50).

Toimintamalleja, joilla voidaan vähentää painorajoitetuista silloista johtuvia rajoitteita HCT-kuljetuksille, on kuvattu seuraavassa luvussa.

Kuva 50. Jeesiöjoen sillan liikennevalot estävät muun liikennöinnin sillalla saman aikaan HCT-yhdistelmän kanssa (Kuva: Ari Siekkinen).

3.7.4 HCT-käytävät ja -terminaalit

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 20). HCT-kokeiluissa onkin jo mukana yhdistelmiä, jotka hyödyntäisivät erilaisia HCT-käytäviä:

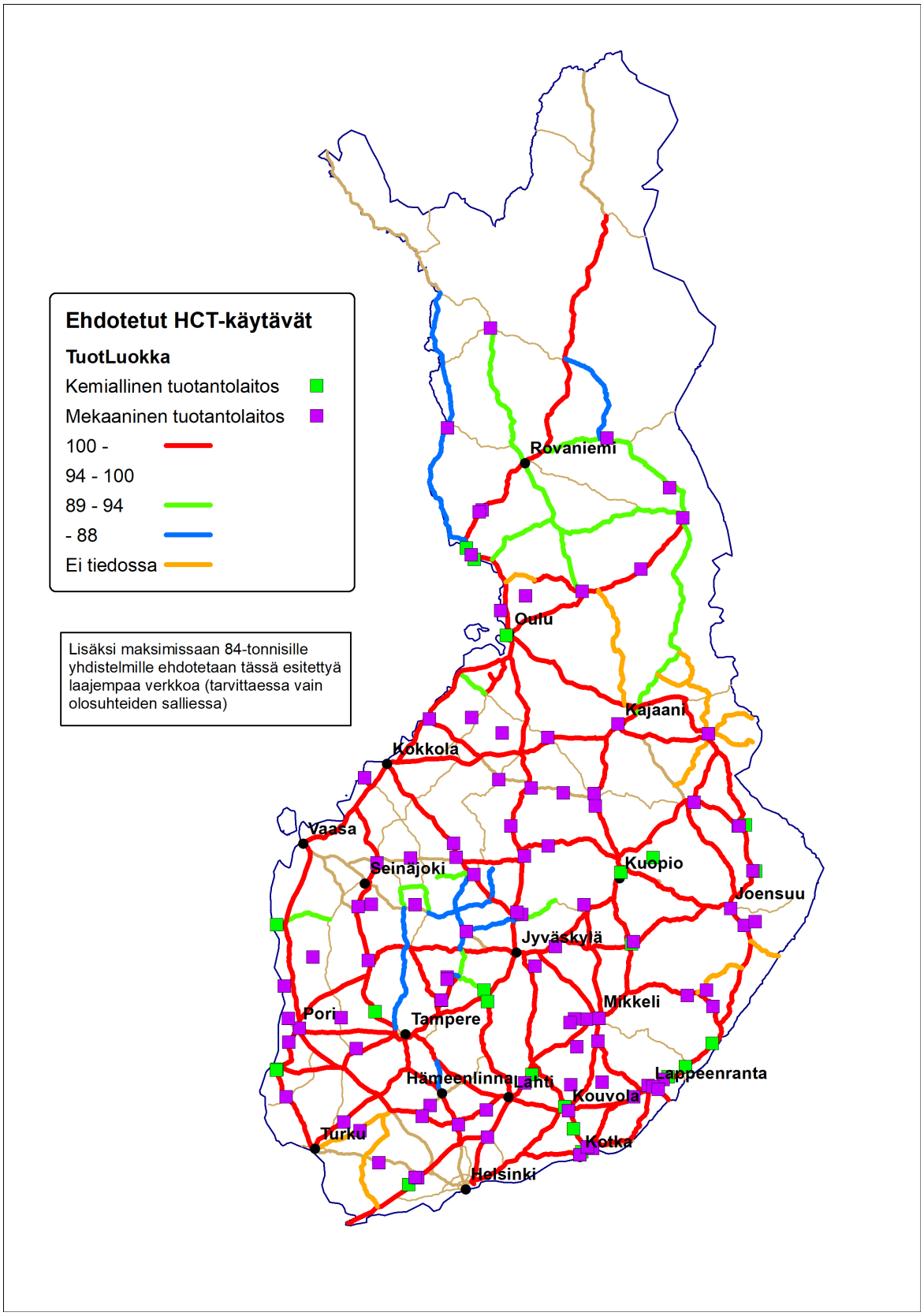
1. Metsästä lähtevät 84-tonniset yhdistelmät (Malinen, P&A Trans)
2. Rautatieterminaaleihin puuta syöttävät yhdistelmät (Ketonen)
3. Autoterminaalissa metsäautosta HCT-yhdistelmään siirrettävien puiden kuljetukset (Hannonen, Moilaspojat)
4. Sivutuotehaketta kuljettavat yhdistelmät (Huhtala, Konnekuljetus,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

Taulukko 20. Alustavia ehdotuksia puu- ja hakekuljetusten HCT-käytävien kriteereiksi (Venäläinen 2017).

HCT-käytävien osat

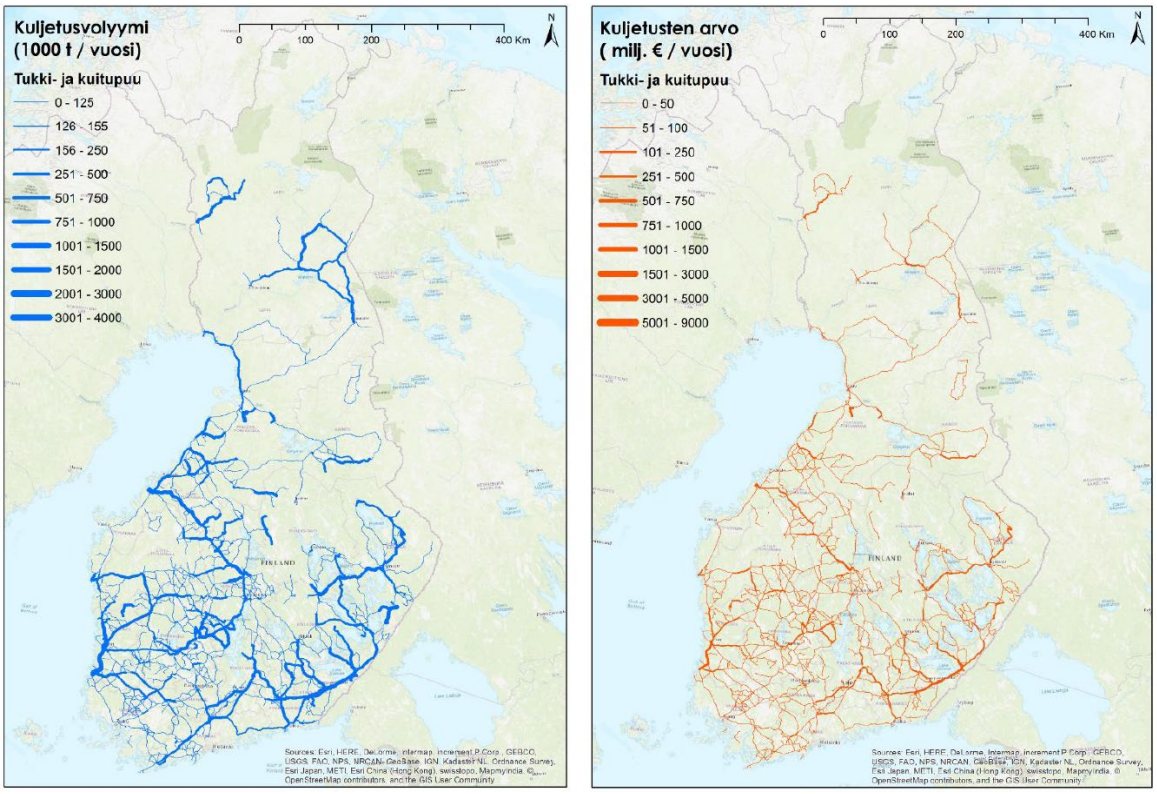
1. **Merkittävät aines- tai energiapuun käyttökohteet**
2. **Merkittävät aines- ja energiapuun käyttökohteiden ulkopuoliset terminaalit**
   - Rautatie-, vesi- ja tiekuljetusterminaalit
3. **Kotimaisen puun hankinta-alueiden keskeiset kuljetusyhteydet käyttökohteisiin**
4. **Osakäytävät**
   - Kuitupuukuljetukset 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 ovat alustavasti tunnistaneet tarpeita eri kokoisten HCT-yhdistelmien kuljetusreiteille (kuva 51; 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.

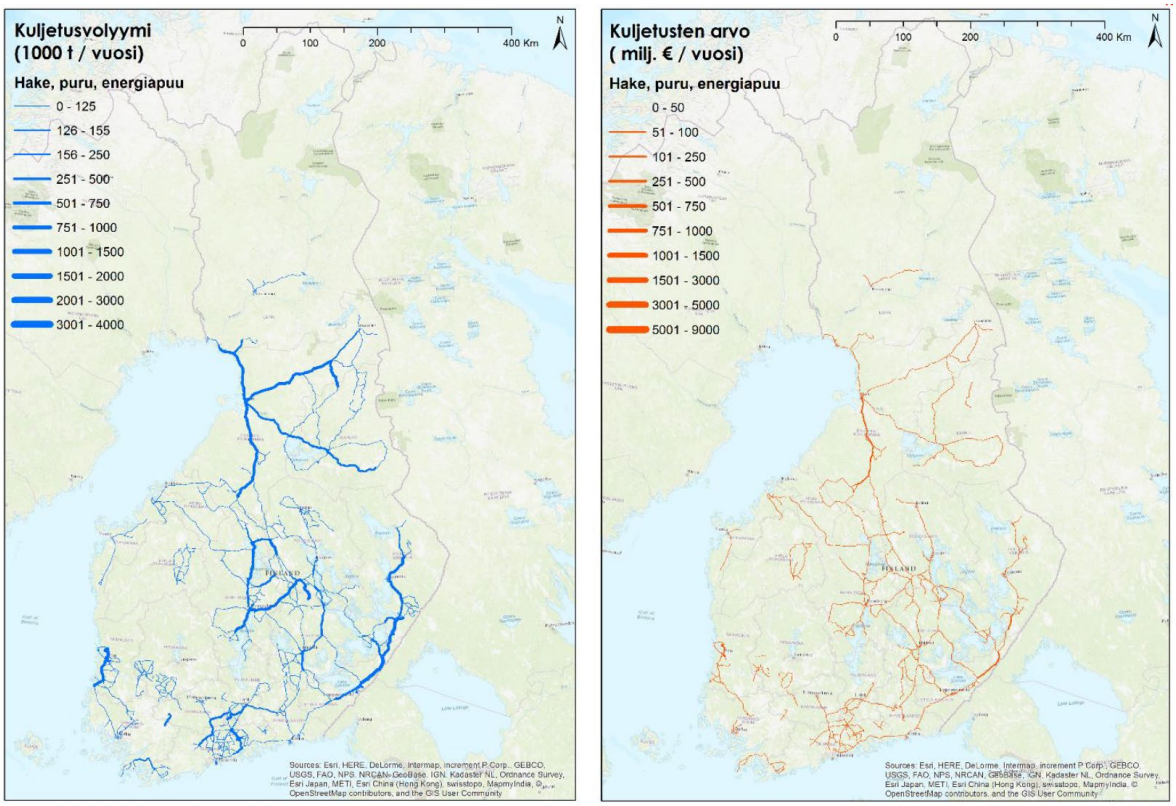


Kuva 51. Alustavasti ehdotettuja HCT-reittejä raakapuun, sivutuotehakkeen ja sahatavaran kuljetuksiin (Metsäteollisuus ry:n ja Metsäteho Oy:n kyselyt metsäyhtiöille).
Lisäksi maksimissaan 84-tonnisille ehdotetaan tässä esitettyä laajempaa verkkoa (tarvittaessa vain olosuhteiden salliessa). Karttaa tullaan päivittämään käynnissä olevien selvitysten pohjalta.

Ainespuun, hakkeen ja energiapuun kuljetusvirrat tieverkolla on esitetty kuvissa 52–53 (kuvat perustuvat tilastoaineistoihin, jotka ovat osin puutteelliset). Merkittäviä kuljetusvirtoja kohdistuu sekä tuotantolaitoksiin että rautateiden kuormauspaikoille.



Kuva 52. Ainespuun kuljetusvirrat tieverkolla (Tilastokeskus lähteessä WSP Finland Oy 2017).



Kuva 53. Hakkeen, purun ja energiapuun kuljetusvirrat tieverkolla (Tilastokeskus lähteessä WSP Finland Oy 2017).

Painorajoitetut sillat HCT-käytävillä

Yksittäiset painorajoitetut sillat eivät välttämättä estä HCT-käytävien tehokasta hyödyntämistä. Tienvarsivarastojen, terminaalien ja toimituskohteiden sijainneista riippuen 76-tonninen yhdistelmä voidaan täydentää HCT-painoiseksi painorajoitetun sillan jälkeen tai osa lastista voidaan purkaa ennen siltaa. Täydentäminen tai painon vähentäminen voidaan hoitaa siirtokuormauksilla tai erikokoisten vetoautojen ja perävaunujen vaihdoilla yhdistelmien välillä:

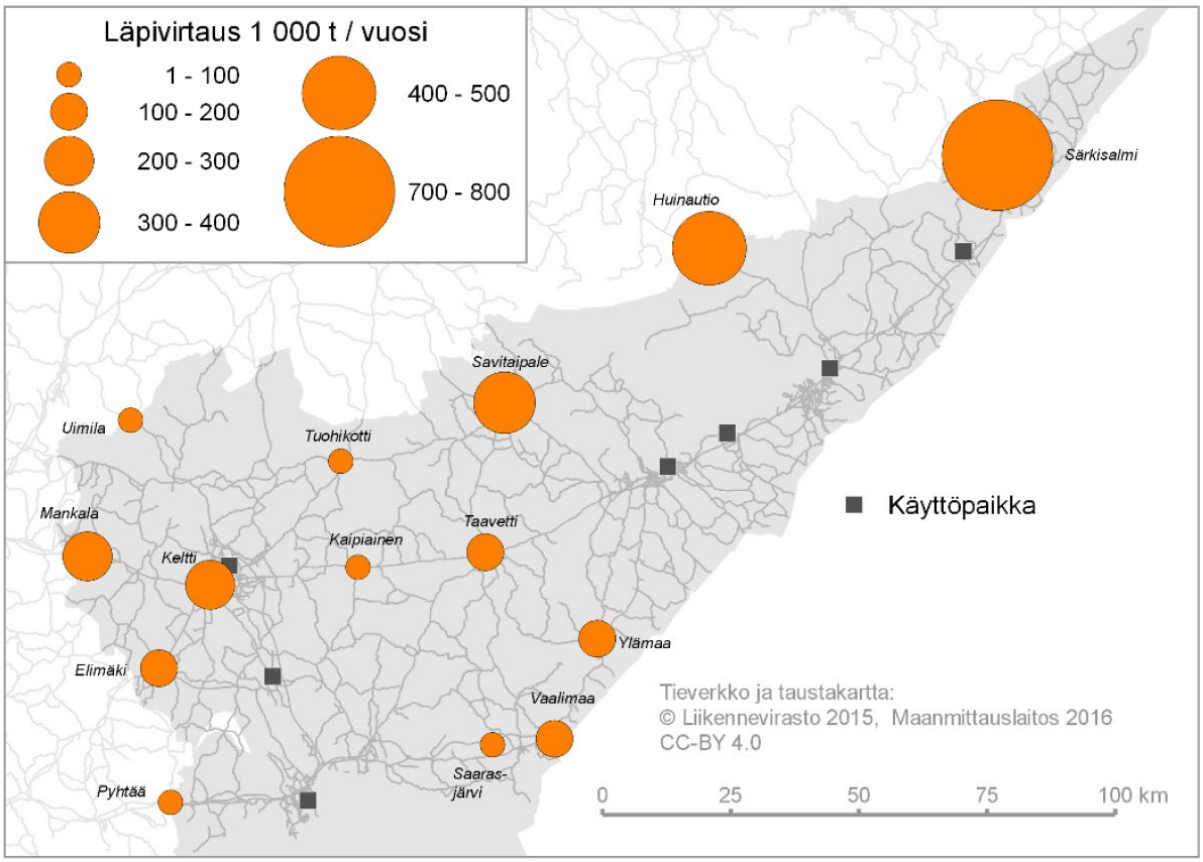
- 76-tonnisen yhdistelmän 4-akselinen perävaunu voidaan vaihtaa 5-akseliseen perävaunuun, jolloin kokonaispaino nousee esimerkiksi 84 tonniin.
- 6-akselisen perävaunun vetoauto voidaan vaihtaa 3-akselisesta 4-akseliseksi, jolloin kokonaispaino nousee 76-tonnisesta esimerkiksi 84 tonniin.

Useamman moduulin yhdistelmän osalta perävaunut voidaan kuljettaa sillan ylitse erikseen ja yhdistelmä kootaan kokomittaan sillan jälkeen. Painorajoitettujen siltojen välttämiseksi voi löytyä toimiva kiertoreitti. HCT-käytävillä, joiden varrella on useampia puun käyttökohteita, on tarjolla kuljetusvirtoja, joiden ei tarvitse ylittää painorajoitettua siltaa. Painorajoitetut sillat ja lossit joudutaan jo tällä hetkellä ottamaan huomioon puukuljetusten suunnittelussa. (Siekkinen 2020).

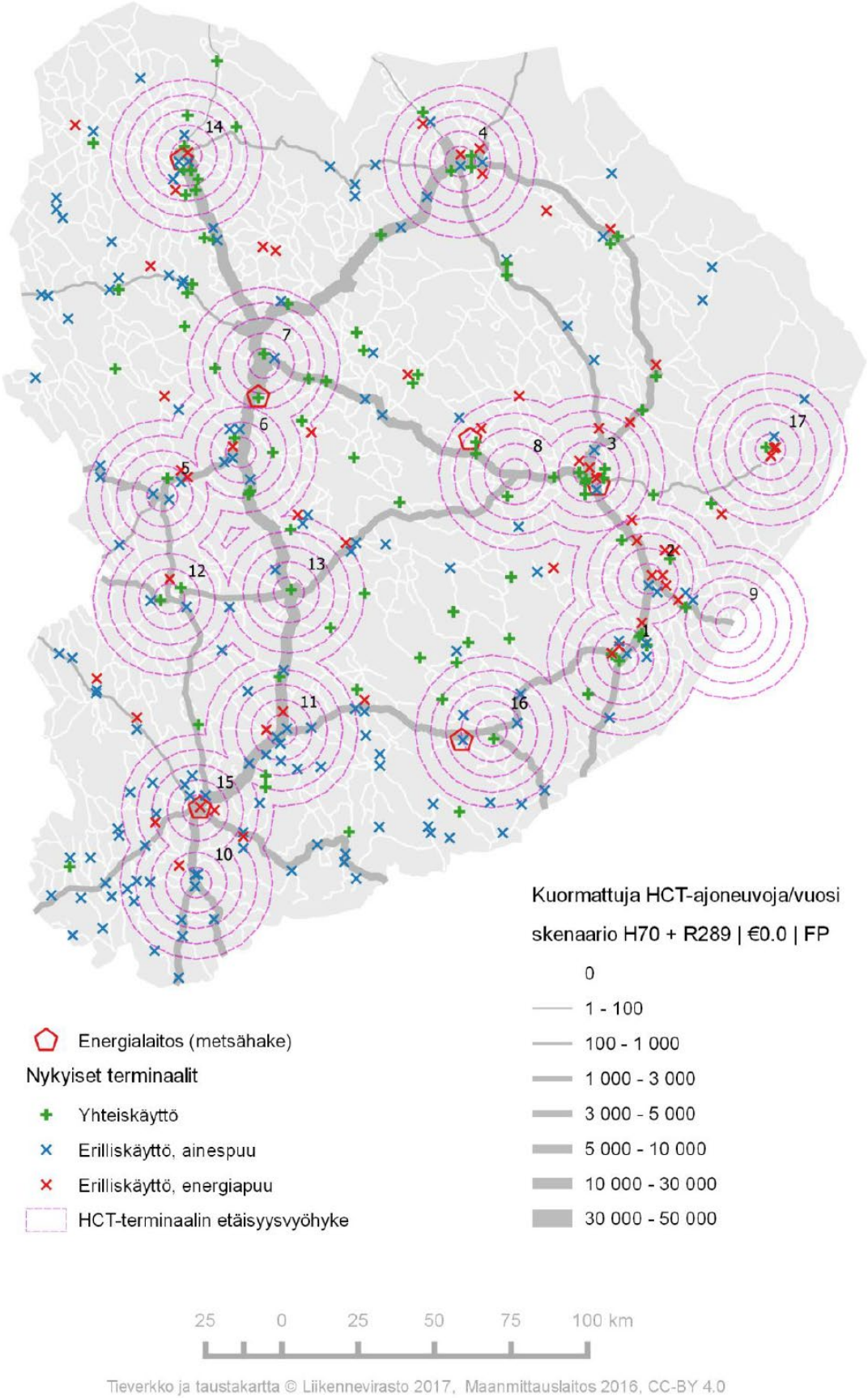
HCT-terminaalit

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.

LUT-yliopiston simulointitutkimuksissa (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2017 ja Korpinen & Aalto 2017) on tunnistettu tiekuljetusketjuihin sopivien HCT-terminaalien potentiaalisimpia sijoittumispaikkoja Kaakkois- ja Itä-Suomessa (kuvat 54-55). Tarkastelut indikoivat samalla potentiaalisten HCT-käytävien sijoittumista ko. alueilla. Tarkasteluita onkin tarpeen laajentaa muillekin alueille Suomessa.



Kuva 54. 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 55. 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). Painojen omavalvonnan mahdollista toteutustapaa tutkitaan aiemmin kuvatun Winter Premium -hankkeen yhteydessä.

Väylävirasto on yhdessä Tampereen yliopiston kanssa kehittämässä uudenlaista tapaa mitata tiellä liikkuvien ajoneuvoyhdistelmien akselimassoja akseleiden rengastukset ja akselivälit huomioon ottaen. Tierakenteen jäykkyysvasteeseen perustuva mittausteknologiaa on asennettu valtatielle 9. (Tampereen yliopisto 2020)

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). Ajettujen kuormien lukumäärä laskee ajoneuvoyhdistelmän hyötykuorman kasvaessa (ks. luku 3.1). Tämä vähentää onnettomuuden syntymisen riskiä.

Oulun yliopiston tutkimuksessa (Pirnes ym. 2018) verrattiin 84- ja 104-tonnisten HCT-yhdistelmien luistoa, kiihtyvyyttä ja jarrutusmatkoja 76-tonniseen yhdistelmään (taulukot 21–23). 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 21. 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 22. 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 23. 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) arvioitiin 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 on-

gelmana. 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 saavutetaan puukuljetuksissa vain rajattuja hyötyjä.

Seuraaviin taulukoihin on koottu erikokoisten HCT-yhdistelmien vaikutuksia puutavara- ja hakekuljetuksissa. Vaikutusarvioita tarkistetaan varsinkin hakeyhdistelmien osalta vuonna 2021 tämän raportin päivittämisen yhteydessä.

Suuremmat ajoneuvoyhdistelmät vähentävät puutavarakuormien määrää 102 000–224 000:lla ja hakekuormien määrää 12 000–42 000:lla vuodessa. Kuljetuskustannukset vähentyisivät 17,8–82,7 milj. eurolla vuodessa. Kuljetusmatkasta ja puun siirtokuormausmenetelmästä riippuen puutavarakuljetuksissa kustannussäästö olisi 0,8–11,4 % per m^3 (100–300 km:n kuljetusmatka, joissakin tapauksissa matka oltava yli 100 km säästön saavuttamiseksi). Sivutuotehakekuljetuksissa kustannussäästö olisi 4,9–14,5 % (per m^3, 50–300 km:n kuljetusmatka). Polttoaineen kulutus laskisi puutavarakuljetuksissa 5,6–20,1 % (per tuoretonni, 100–300 km:n kuljetusmatka). Hakekuljetusten alustavien laskelmien mukaan polttoaineen kulutus laskisi 6,5–16,4 % (per tuoretonni, 50–300 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.

Paksupäällysteisillä teillä HCT-yhdistelmät eivät aiheuta tien urautumista tai ero nykyisiin yhdistelmiin on hyvin pieni. Aivan ohuimmin päällystetyillä teillä HCT-yhdistelmät aiheuttavat enemmän urasyvyyksien kasvua kuin nykyiset yhdistelmät. HCT-yhdistelmille sopivien ohuesti päällystettyjen teiden määrittäminen vaatii vielä tarkentamista. Sorateillä eri tutkimusten tulokset poikkesivat jossain määrin toisistaan (johtuen myös yhdistelmien eri akselimääristä). Sorateiden osalta lopullisten johtopäätösten tueksi olisi tarpeen saada lisätutkimusaineistoa, koska osaa tutkimustuloksista ei voida hyödyntää muun raskaan liikenteen aiheuttaman tien häiriintymisen takia.

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 24. 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	-117	-102	-128	-117	-165	-196	-224
Kuljetuskustannukset milj. €/v (105 km)	−26,0	−13,2…−52,0	**	**	−11,5…−51,1	**	−25,1…−64,8
Kuljetuskustannukset per m^3 (100–300 km)	−7,5…−8,2 %	+3,9…−9,9 %	**	**	+10,9…−7,2 %	**	+7,7…−11,4 %
Polttoaineen kulutus milj. l/v (105 km)	−9,2	−2,3	**	**	+3,4	**	−1,4
Polttoaineen kulutus per tuoretonni (100–300 km)	−13,5…−14,8 %	−12,8…−20,1 %	**	**	−5,6…−14,0 %	**	−8,5…−17,5 %
Tierasitus	*Paksupäällysteiset tiet:* Tierasitus ei kasva suurillakaan HCT-yhdistelmillä *Ohutpäällysteiset tiet:* Paksuimmilla teillä tierasitus ei kasvane, mutta eri kokoisille HCT-yhdistelmille sopivien teiden määrittäminen vaatii tarkentamista Soratiet: HCT-kuljetukset koskisivat todennäköisesti korkeintaan 84-tonnisia ja 10-akselisia yhdistelmiä. Johtopäätösten tekemistä varten lisätutkimukset ovat tarpeen.						
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.						

***Ei lasketa ko. kokoluokalle erikseen*

Taulukko 25. Yhteenveto HCT-yhdistelmien vaikutuksista hakekuljetuksissa (verrattuna 76-tonniseen yhdistelmään). Vaikutusarviot perustuvat raportin laatimishetkellä käytössä olleisiin tutkimusaineistoihin ja -tuloksiin, joten niitä tullaan tarkistamaan myöhemmin.

Vaikutus	84H	85H	90H	91H	100H
Ajot 1 000 kpl/v	−19	−12	−30	−33	−42
Kuljetuskustannukset milj. €/v (75 km)	−6,3		−12,1	LP	−17,9
Kuljetuskustannukset per m^3 (50–300 km)	−4,9…−5,6 %		−9,5…−10,7 %	LP	−14,2…−14,5 %
Polttoaineen kulutus milj. l/v (75 km)	−1,2		−2,0	LP	−2,3
Polttoaineen kulutus per tuoretonni (50–300 km)	−6,5 %		−13,9…−14,3 %	LP	−16,1…−16,4 %
Tierasitus	Ei tutkittu erikseen, ks. puutavarayhdistelmiä koskeva taulukko				
Liikenneturvallisuus					
Ajoneuvon kestävyys					
Työllisyys					

**LP = Laskelma puuttuu*

84-tonnisia metsäautoja on ollut ajossa Pohjois-Suomessa ja käynnissä on Oulun yliopiston ja Ilmatieteen laitoksen hanke, jossa tutkitaan HCT-yhdistelmien hyödyntämistä tieverkolla tien kantavuuden muutokset huomioon ottaen (varsinkin talvisin jäätyneet tiet). Päällystettyjen teiden osalta HCT-kuljetukset on ajateltu rajoitettavan vain tietyille HCT-käytäville. Näin taataan käytävien 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).
- Selvitys yhdistelmien kokonaismassan vaikutuksista ajoneuvojen huolto- ja korjauskustannuksiin.
- Täydentävät tierasitustutkimukset (esim. mallia soratien palautumisajasta ei ole).
- Massojen nostoa rajoittavien siltojen tunnistaminen, siltarasitustutkimukset 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-käytäväverkkoehdotus 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 erityyppisille 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].

Palander, T., Haavikko, H., Kortelainen, E., Kärhä K. & Borz, S. A. &. 2020. Improving Environmental and Energy Efficiency in Wood Transportation for a Carbon-Neutral Forest Industry. Forests 2020 (11, 1194). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/344726450_Improving_Environmental_Efficiency_and_Energy_Efficiency_in_Wood_Transportation_for_a_Carbon-Neutral_Forest_Industry. [Viitattu 18.11.2020].

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.vayla.fi/pdf8/lts_2017-57_hct-ajoneuvojen_web.pdf. [Viitattu 19.10.2020].

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.vayla.fi/pdf3/lts_2012-23_liikenteen_paastokustannukset_web.pdf. [Viitattu 19.10.2020].

Liikennevirasto. 2018a. 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].

Liikennevirasto. 2018b. Tierakenteen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 38/2018. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf. [Viitattu 17.12.2019].

Luonnonvarakeskus. 2020a. Lämpö- ja voimalaitosten kiinteiden puupolttoaineiden käyttö maakunnittain. Tilasto. Saatavissa: http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__04%20Talous__10%20Puun%20energiakaytto/01a_Laitos_ekaytto_maak.px/?rxid=dc711a9e-de6d-454b-82c2-74ff79a3a5e0. [Viitattu 1.9.2020].

Luonnonvarakeskus. 2020b. Metsäteollisuuden puunkäyttö 1860- muuttujina vuosi, alkuperä ja puutavaralaji. Tilasto. Saatavissa: https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__04%20Talous__08%20Metsateollisuuden%20puunkaytto/04_metsateol_puunk_tavaralajeittain_1860.px/table/tableViewLayout1/. [Viitattu 1.9.2020].

Luonnonvarakeskus. 2020c. Teollisuuspuun kaukokuljetustavat ja keskikuljetusmatkat. 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=001bc7da-70f4-47c4-a6c2-c9100d8b50db. [Viitattu 24.6.2020].

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].

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].

Metsäteollisuus ry. 2020. Puunkäyttö Metsäteollisuus ry:n jäsenet – Kotimainen puu. Excel-taulukko.

Mulju, T. 2017. Puutavara-autojen tienkäyttötiedot – loppuraportti. Saatavissa: https://vayla.fi/documents/25230764/0/Puutavara_autojen_tienk%c3%a4ytt%c3%b6tiedot_trimble/157eaf49-5ad0-42ae-9778-a7b64d1e02bc. [Viitattu 19.10.2020].

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. 2019. HCT-yhdistelmien vaikutus soratien urautumiseen. Raportti n:o 10, Oulun yliopisto Konetekniikka. Saatavissa: http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526224817.pdf. [Viitattu 9.12.2019].

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.vayla.fi/pdf8/lts_2018-51_hct_normaaliajoneuvojen_web.pdf. [Viitattu 19.10.2020].

Siekkinen, A. 2020. Ovatko heikot sillat este HCT kuljetuksille? Julkaisematon kalvoesitys.

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. Pohjamaan kantavuusluokitus – Metsätieohjeiston uudistettu materiaali. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Pohjamaan-kantavuusluokitus.pdf. [Viitattu 18.12.2019].

Strandström, M. 2017b. Päällysrakenneluokat - Metsätieohjeiston uudistettu materiaali. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/P%C3%A4%C3%A4llysrakenneluokat.pdf. [Viitattu 17.12.2019].

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. 2019a. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2018. Metsätehon tuloskalvosarja 16/2019. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2019_16_Mets%C3%A4hakkeen_tuotantoketjut_2018.pdf. [Viitattu 3.1.2020].

Strandström, M. 2019b. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2018. Metsätehon tuloskalvosarja 17a/2019. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2019_17a_Puunkorjuu_ja_kaukokuljetus_vuonna_2018.pdf. [Viitattu 1.9.2020].

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

Sweco. 2020. Tyyppisillan Bel II kantavuusselvitys 85 tonnin yhdistelmälle. Julkaisematon raportti 29.9.2020.

Tampereen yliopisto. 2020. Uutta teknologiaa ajoneuvomassojen monitorointiin. Tiedote. Saatavissa: https://www.tuni.fi/fi/ajankohtaista/uutta-teknologiaa-ajoneuvomassojen-monitorointiin?s=04&fbclid=IwAR0dQosfrkrMr1FcGITNPche3Rnb7t5ZE4K-XEM17SqGcNmLJ90B-2fucL4. [Viitattu 23.9.2020].

Tilastokeskus. 2020. Kotimaan kuorma-autoliikenteen suoritteet tavaralajeittain, 2011-2019. Tilastosivu. Saatavissa: http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__lii__kttav/statfin_kttav_pxt_119b.px/. [Viitattu 24.6.2020].

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

Traficom. 2019. Tietilasto 2018. Traficomin tilastojulkaisuja 19/2019. Saatavissa: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Tietilasto%202018.pdf. [Viitattu 18.12.2019].

Traficom. 2020. Pidemmät ja raskaammat HCT-rekat. Internetsivusto. Saatavissa: https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/pidemmat-ja-raskaammat-hct-rekat. [Viitattu 24.6.2020].

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 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. Metsätehon tuloskalvosarja 12/2019. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2019_12_Puun_korjuun_ja_kuljetusten_paastojen.pdf. [Viitattu 24.6.2020].

Virtala, P., Pirnes, V. & Pitkänen, P. 2018. Perävaunun aiheuttaman tierasituksen pienentäminen uudella akselistoratkaisulla. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 55/2018. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-55_peravaunun_aiheuttaman_web.pdf. [Viitattu 19.10.2020].

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.vayla.fi/pdf8/lts_2018-63_tierakenteen_rasittuminen_web.pdf. [Viitattu 19.10.2020].

Vuorimies, N., Kurki, A., Kolisoja, P., Varin, P. & Saarenketo, T. 2019a. Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuonna 2018. Väyläviraston tutkimuksia 17/2019. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt_2019-17_tierakenteen_rasittuminen_web.pdf. [Viitattu 9.12.2019].

Vuorimies, N., Kurki, A., Kolisoja, P., Varin, P., Saarenketo, T., Pekkala, V. & Haataja, M. 2019b. Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015–2018 – Yhteenvetoraportti. Väyläviraston tutkimuksia 21/2019. Saatavissa: https://www.doria.fi/handle/10024/173541. [Viitattu 1.6.2020].

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

Väylävirasto. 2019b. Tieverkko. Verkkosivusto. Saatavissa: https://vayla.fi/tieverkko#.XfoM-kGQzZaQ. [Viitattu 18.12.2019].

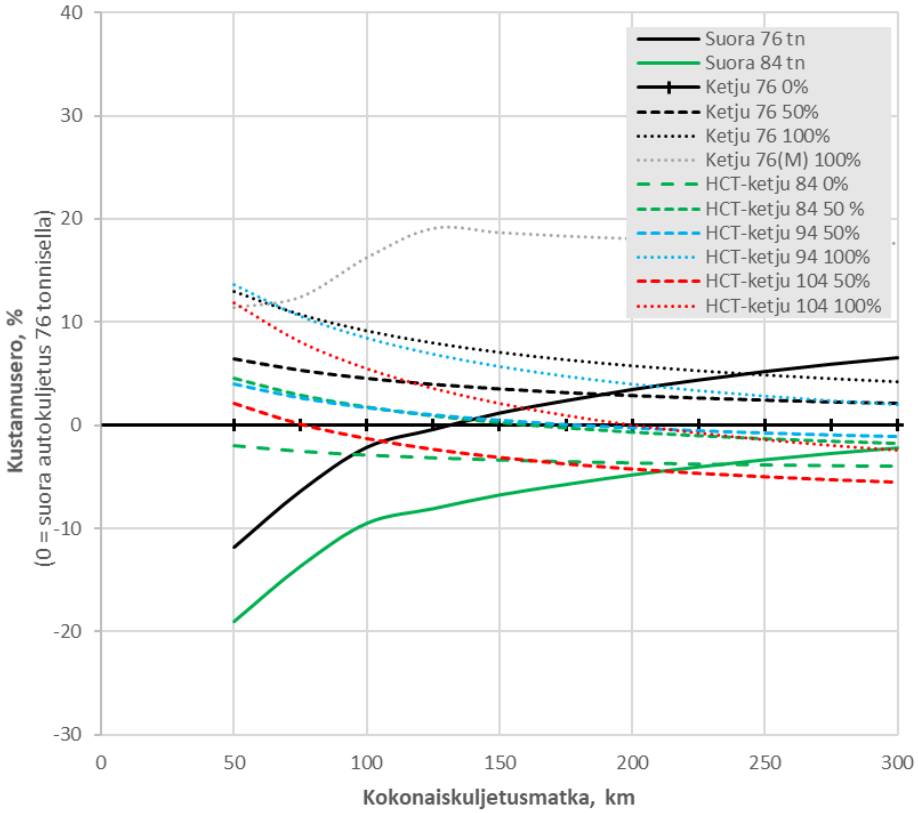
Väätäinen, K., Laitila, J., Anttila, P., Kilpeläinen A. & Asikainen, A. 2020. The influence of gross vehicle weight (GVW) and transport distance on timber trucking performance indicators – Discrete event simulation case study in Central Finland. International Journal of Forest Engineering 31:2: 156-170. Saatavissa: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14942119.2020.1757324. [Viitattu 4.8.2020].

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].

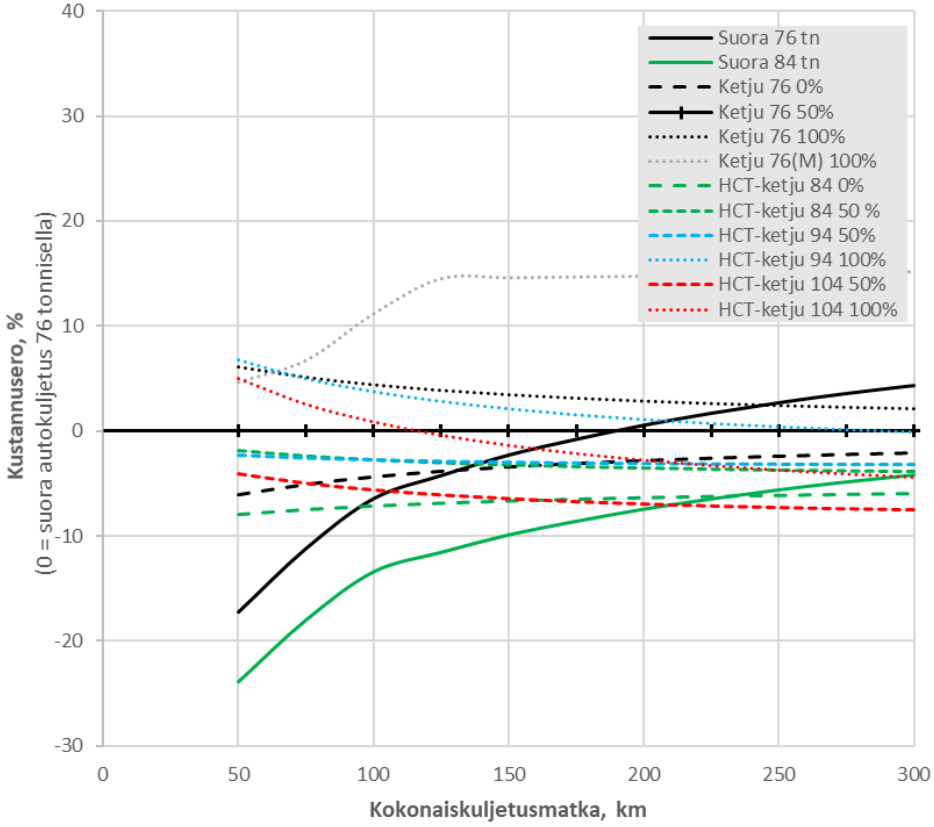
Ylitalo, E. 2017. Tuontipuu energiantuotannossa. Kalvoesitys Koneyrittäjien Energiapäivät 2017. Saatavissa: https://www.koneyrittajat.fi/media/Julkinen/Liitteet/Tapahtumat/Energiapaiva2017/Ylitalo.pdf. [Viitattu 1.9.2020].

Liite 1. Kuljetuskustannusten vertailu 1

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

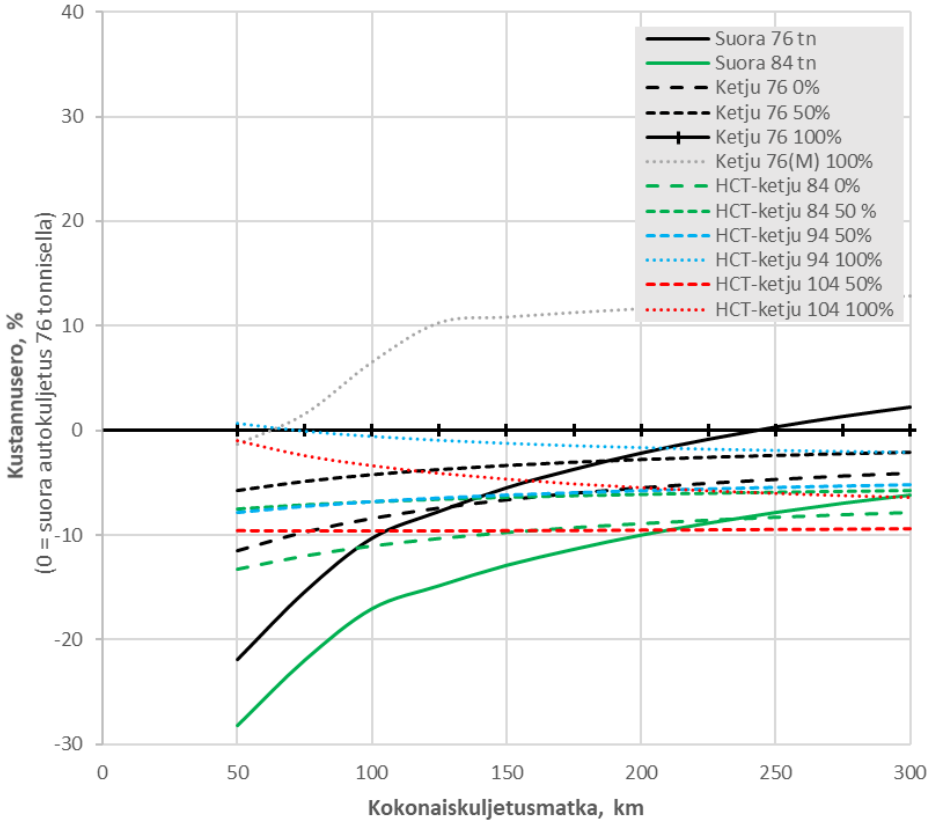


Vertailukohteena Ketju 76 50 % (puolet kuormasta valmiiksi lastattuna perävaunuun)

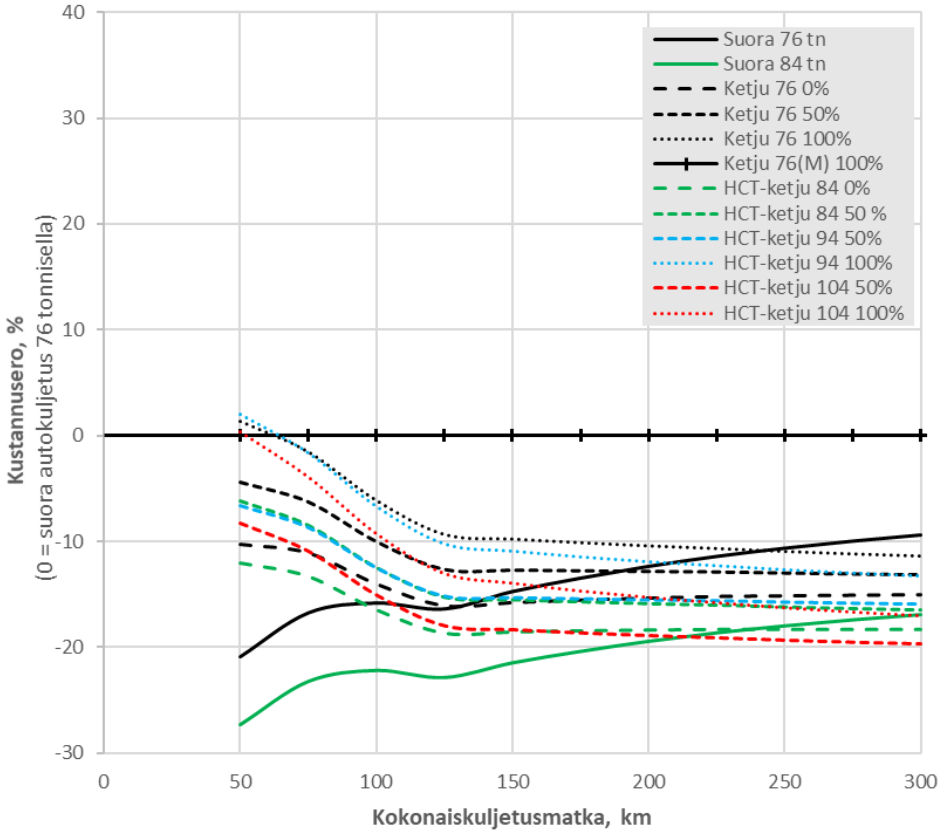


Liite 1. Kuljetuskustannusten vertailu 2

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	4.5.2018-31.3.2019	**	
Huhtala[H]	**Verrokki[HA]**	**Verrokki[HB]**	**Wickström[H]**	
1.5.2017-10.4.2018	19.6.2017-28.11.2017	1.3.2018-28.2.2019	1.7.2017-4.6.2018	
Sammalisto[HA]	**Sammalisto[HB]**		**Verrokki[HB]**	**Konnekuljetus[H]**
12.1-30.9.2018*	19.12.2017-30.9.2018		15.12.2017-31.3.2018	3.9.2018-30.3.2019*

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

Liite 3. Yhteenveto Oulun yliopiston ensimmäisen tierasitustutkimuksen tuloksista (kohteiden nimien perässä tien kantavuus (MN/m2) mittauspisteen kohdalla ja tutkimusajoneuvojen akseleiden lukumäärät ko. tutkimuskohteessa (Pekkala 2018).

	Päällystetty, paksurakenteinen **A. Vuojärvi (900; 7, 10, 13)** **B. Rovaniemi (290; 7, 10, 13)**	**Päällystetty, ohutrakenteinen (Vuotso) (190; 7, 10, 13)**	**Soratie** **A. Ylikiiminki (100; 7, 9, 10)** **B. Kuhmo (79; 7, 9, 10)**
Urasyvyys & urakasvu	**A.** Urakasvun keskiarvo koko mittausmatkalla -0,36 mm eli keskimäärin urat pienenivät hieman Yksittäisien ajoneuvoyhdistelmien ja niiden aiheuttamien urasyvyyksien muutoksien välille ei pystytty määrittämään riippuvuuksia. Letka-ajossa seuraava rengas tasoitti edellisen renkaan painuman tasaisemmaksi. **B.** Ei mitattu	21 ylityksen jälkeen urakasvun keskiarvo koko mittausmatkalla oli 0,65 mm. Yksittäisten ajoneuvoyhdistelmien ja niiden aiheuttamien urasyvyyksien muutosten välille ei pystytty määrittämään riippuvuuksia.	**A.** 24 ylityksen jälkeen mittausanturien alueella (paaluvälillä 144–150) urakasvun keskiarvo oli 4,56 mm. **B.** Urakasvun keskiarvo koko mittausmatkalla oli 0,52 mm ja mittauspisteessä anturien kohdalla (keskiarvo paaluväli 142-146) 1,73 mm. **A&B**. Yksittäisten ajoneuvoyhdistelmien ja niiden aiheuttamien urasyvyyksien muutosten välille ei pystytty määrittämään riippuvuuksia.
Kosteusprofiili	**A.** Tien pintakerroksissa havaittujen kosteusprofiilin muutosten vaikutukset eivät olleet merkittäviä. Alemmissa tiekerroksissa ei havaittu kosteusprofiilin muutoksia. **B.** Ei mitattu	Kosteusprofiileissa havaittiin rakenteen alaosassa / alusrakenteen yläosassa paikallisesti parissa kohdassa merkkejä kosteuden kasvusta kuormitusajojen alkuvaiheessa. Nämä muutokset eivät kuitenkaan enää tämän jälkeen kasvaneet.	**A.** Maatutkamittauksista lasketuissa kosteusprofiileissa havaittiin rakenteen alaosassa / alusrakenteen yläosassa merkkejä kosteuden kasvusta viimeisen rekan ylityksen (9/24) jälkeisessä profiilissa. Kosteuden kasvua havaitaan niissä kohdissa, missä rakenteen kokonaispaksuus on ohuimmillaan. **B.** Kosteuden kasvusta ja pumppausilmiöstä ei tehty havaintoa. Yksittäisten yhdistelmien ja niiden aiheuttamien kosteusprofiilin muutoksille välille ei pystytty määrittämään riippuvuuksia.
Huokospaine	Ei koske päällystettyjä teitä	Ei koske päällystettyjä teitä	**A.** Ajettaessa yli 30 km/h:n nopeudella huokosvedenpaineen kasvun aiheuttamasta tierakenteen heikentymisestä ei olisi vaaraa mittauspäivän olosuhteissa. 9- ja 10-akselisilla erittäin hitaasti ajettaessa tierakenteen vaurioitumisvaara alkaisi kasvaa. **B.** 9- ja 10 akseliset **k**asvattivat hieman huokosveden

	Päällystetty, paksurakenteinen **A. Vuojärvi (900; 7, 10, 13)** **B. Rovaniemi (290; 7, 10, 13)**	**Päällystetty, ohutrakenteinen (Vuotso) (190; 7, 10, 13)**	**Soratie** **A. Ylikiiminki (100; 7, 9, 10)** **B. Kuhmo (79; 7, 9, 10)**
			painetta, mutta yhdistelmien välinen ero ei ole merkittävä.
Tien pinnan hetkelliset venymät/puristumat (”kuopan ” tilavuus)*	**A.** 13-akselisen ajoneuvoyhdistelmän tien pintakerrokseen aiheuttama venymä/puristuma oli 1,1–1,4-kertainen verrattuna 7- ja 10-akselisiin. **B.** 13-akselisen ajoneuvoyhdistelmän tien pintakerrokseen aiheuttama venymä/puristuma oli 1,1–1,9-kertainen verrattuna 7- ja 10-akselisiin. 10-akselisen venymä/puristuma oli 1,8-kertainen 7-akseliseen verrattuna.	13-akselisen ajoneuvoyhdistelmän tien pintakerrokseen aiheuttama venymä/puristuma oli 1,1–1,4-kertainen verrattuna 7- ja 10-akselisiin. Ero näytti suurenevan ajonopeuden laskiessa eli rasitusajan kasvaessa. 10-akselien yhdistelmän aiheuttama kuopan tilavuus oli 1,2–1,3-kertainen 7-akseliseen verrattuna.	**A.** 10-akselisen ajoneuvoyhdistelmän tien pintakerrokseen aiheuttama venymä/puristuma oli 0,9–1,1-kertainen verrattuna 9-akseliseen. Huom! 9-akselisen mittaus epäonnistui, joten tulos vain suuntaa-antava. **B.** 10-akselisen ajoneuvoyhdistelmän tien pintakerrokseen aiheuttama venymä/puristuma oli 1,1–1,2-kertainen verrattuna 9-akseliseen
”Kuoppa” suhteessa hyötykuormaan**	**A.** Suhdeluku (13-ax vs. 7-ax) välillä 0,7–0,8, suhdeluku (10-ax vs. 7-ax) välillä 0,7–0,8. **B.** Ei voitu laskea, koska 7-akselisen kuormatieto puuttui	Suhdeluku (13-ax vs. 7-ax) välillä 0,8–0,9, suhdeluku (10-ax vs. 7-ax) 0,9	**A.** Suhdeluku (10-ax vs. 7-ax) välillä 1,8–2,9. 9-akselisen osalta suhdelukua ei laskettu mittausongelmien takia. **B.** Suhdeluku (10-ax vs. 9-ax) välillä 0,8–0,9

**”Kuoppa” on laskettu eri tavoin päällystetyille ja sorateille, joten niiden tuloksia ei voi verrata keskenään.*

***Suhdelukua ei voi käyttää sellaisenaan osoittamaan yhdistelmien kuormitusvaikutuksia, koska ”kuopan syvyydelle” ei ole määriteltyä vauriokerrointa.*