

Metsätehon raportti 270
(aiheen 4. väliraportti)
30.10.2024

Puutavara- ja hakeajoneuvojen massojen noston vaikutukset

Pirjo Venäläinen
Asko Poikela

ISSN 1796-2374 (Verkkajulkaisu)

METSÄTEHO OY
Vernissakatu 1
01300 Vantaa

www.metsateho.fi

Puutavara- ja hakeajoneuvojen massojen noston vaikutukset

Pirjo Venäläinen
Asko Poikela

Metsätehon raportti 270 (aiheen 4. väliraportti)
30.10.2024

ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu)

© Metsäteho Oy

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
1 JOHDANTO	4
2 TUTKITUT KULJETUSVIRRRAT JA AJONEUVOYHDISTELMÄT	4
2.1 Kotimaisen puutavaran ja hakkeen autokuljetukset	4
2.2 Tutkitut HCT- ja verrokkiyhdistelmät	5
2.3 Yritysten näkemykset HCT-yhdistelmistä.....	12
3 YHDISTELMIEN MASSOJEN NOSTON VAIKUTUKSIA	13
3.1 Kuormien määrä	13
3.2 Kuljetustehokkuus	15
3.3 Vaikutus rautatiekuljetusten käyttöön.....	16
3.4 Kuljetuskustannukset.....	17
3.4.1 Kuljetusten kustannustekijät ja tietojen keruu	17
3.4.2 Yksittäisten yhdistelmien kustannusvertailut	21
3.4.3 Valtakunnalliset kustannuslaskelmat	24
3.5 Ajoneuvojen kestävyys	27
3.5.1 Vetolaitteet	27
3.5.2 Renkaat	29
3.6 Polttoaineen kulutus ja päästöt	31
3.6.1 Polttoainekulutukseen vaikuttavat tekijät ja tietojen keruu...	31
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 ja simulointiin perustuvat kulutus- ja päästölaskelmat	38
3.6.6 Valtakunnalliset kulutus- ja päästölaskelmat	40
3.7 Tie- ja siltarasitus	45
3.7.1 Tiet	45
3.7.2 Keinoja vaikuttaa tierasitukseen	58
3.7.3 Sillat	61
3.8 HCT-käytävät ja -terminaalit	63
3.8.1 HCT-käytävien määrittäminen	63
3.8.2 Yhdistelmien joustava käyttö HCT-käytäväverkolla	68
3.8.3 HCT-terminaalit	68
3.8.4 HCT-kuljetusten seuranta- ja rajoitusjärjestelmät	71
3.9 Liikenneturvallisuus	71
3.10 Kuljettajatarve	73
4 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	74
LÄHTEET	79
LIITTEET	

TIIVISTELMÄ

Suomessa on ollut käynnissä metsäsektorin HCT-yhdistelmien kokeiluja vuodesta 2014 lähtien. Tässä Metsäteho Oy:n neljännessä väliraportissa on kuvattu yli 76-tonnisten yhdistelmien vaikutuksia puutavara- ja hakekuljetuksissa. Selvitys pohjautuu sen laatimisvaiheessa käytettävissä oleviin tutkimustuloksiin ja -aineistoihin. Tämä raportti täydentää ja päivittää 28.12.2022 valmistuneen kolmannen väliraportin tuloksia. Massojen noston vaikutuksia on tarkasteltu 1) tarvittavien puukuormien lukumäärän, 2) kuljetuskustannusten, 3) polttoaineen kulutuksen ja päästöjen, 4) tie- ja siltarasituksen, 5) liikenneturvallisuuden, 6) ajoneuvojen kestävyys ja 7) kuljettajatarpeen näkökulmasta.

HCT-kokeiluissa on ollut mukana 84–104-tonnisia puutavara- ja hakeyhdistelmiä. Haastattelututkimuksen mukaan yritykset haluavatkin mahdollisuutta erilaisiin yli 76-tonnisiin yhdistelmiin, jotta ne vastaavat kuljetusyriytysten erilaisiin tarpeisiin ja toiminta-alueisiin. Tavoitteena on määritellä jatkossa metsäsektorin HCT-kuljetusten tyyppiyhdistelmät, jotka täyttäisivät muut nykyisen sääntelyn vaatimukset kokonaisuudessaan lukuun ottamatta.

Metsäteho Oy:n laskelmien mukaan HCT-yhdistelmät vähentäisivät vuosittain jopa 84 000–206 000 puutavara- ja 36 000–130 000 hakekuormaa 76-tonnisiin yhdistelmiin verrattuna. Puutavaran osalta kuljetuskustannukset vähentyisivät 2–44 milj. € vuodessa (parhaimmillaan 7,5–11,9 % per m³ 100–300 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 3–8 milj. litralla vuodessa (3,5–10,5 % per tuoretonni 100–300 km:n kuljetusmatkalla). Hakeyhdistelmien osalta laskelmat valmistuvat myöhemmin.

Tierasitustutkimusten mukaan suurelta HCT-yhdistelmät eivät lisää paksupäällysteisten teiden uraantumista. Ohutpäällysteisistä teistä paksuimmilla tierasitus ei kasvane varsinkaan kantavalla pohjamaalla, mutta erikokoisille HCT-yhdistelmille soveltuvien teiden määrittäminen vaatii tarkentamista. Tierasitusten vertailemiseksi on valmistunut myös laskentamalli, jota jatkokehitetään käynnissä olevan hankkeen aikana. Tierasituksen vähentämiseksi on raportissa kuvattu erilaisia keinoja (CTI, teleihin sijoitetut lisäpyörät, sorateiden ajantasainen kuljetuskelpoisuusluokitus).

Siltarasitusmallinnuksen mukaan HCT-yhdistelmät lisäsivät rasitusta suurimmillaan 10 % (varsinkin pitkällä silloilla). Useimmilla 84-tonnisilla ja lyhyillä silloilla rasitusero jää selvästi pienemmäksi. Keväällä 2025 valmistuu käynnissä oleva Väyläviraston siltojen koekuormitustutkimus, jolla tarkennetaan mallinnuksen tuloksia.

Yli 76-tonniset HCT-kuljetukset on ajateltu rajoitettavan vain tietyille HCT-käytävälle. Näin taataan reittien sopivuus HCT-yhdistelmille ja toisaalta priorisoidaan tarvittavat infrastruktuuri-investoinnit yhteysväleille, joilla hyödyt HCT-yhdistelmille ovat suurimmat. Puutavara- ja hakekuljetusten osalta HCT-käytäviä olisi tarpeen HCT-terminaaleista tuotantolaitoksille sekä tuotantolaitosten välille (vaihtopuu- ja sivutuotekuljetukset). Noin 84-tonnisia HCT-yhdistelmiä on hyödynnetty myös metsästä lähteviin kuljetuksiin. HCT-käytäviin ehdotetaan sisällytettävän myös metsäyhtiöiden omat, suoraan yleisiin teihin yhteydessä olevat yksityistiet.

HCT-yhdistelmien ei ole havaittu tuovan merkittäviä eroja liikenneturvallisuuteen.

1 JOHDANTO

HCT-yhdistelmillä (High Capacity Transport) tarkoitetaan normaaliajossa olevia, nykyiset mitta- ja massasäännökset ylittäviä yhdistelmiä, joille on myönnetty Traficom (2020) kokeilulupa. Tässä raportissa kaikki HCT-yhdistelmät ovat yli 76 tonnia painavia ja suurin osa yli 25,25 metriä pitkiä. Ajoneuvojen pidentämisen salliva asetusmuutos tuli voimaan 21.1.2019¹. Ajoneuvojen massojen nostosta Suomessa ei ole käynnissä lainsäädäntövalmistelua, mutta pääministeri Petteri Orpon hallitusohjelmassa (Valtioneuvosto 2023) on mainittu tarve selvittää erikoiskuljetuksiin soveltuvan tieverkon kehittämistä tukemaan nykyistä suurempien kuljetusten toteuttamista. EU:ssa on käynnissä mitta- ja massadirektiivin uudistaminen.

Tämän raportin tavoitteena on koota yhteen tutkimustuloksia ajoneuvojen massojen noston vaikutuksista 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 massojen nostoa koskevassa raportissa esitettyjä laskelmia. Tämä neljäs väliraportti kuvaa tuloksia sen aineiston pohjalta, joka oli käytettävissä kesään 2024 mennessä². Aineistona on käytetty lähinnä Suomessa tehtyjä ja eräitä Ruotsissa tehtyjä HCT-tutkimuksia. Raportti korvaa edellisen, 28.12.2022 julkaistun kolmannen väliraportin (Venäläinen ja Poikela 2022). Haakeyhdistelmien päästö- ja kustannuslaskelmat julkaistaan myöhemmin tämän vuoden aikana. Seuraava tutkimusyhteenveto julkaistaan arviolta loppuvuodesta 2025.

Tekijät kiittävät taustatietojen toimittamiseen osallistuneita kuljetusyrityksiä (Kari Malmstedt Oy, Ketosen Kuljetus Oy, Koneurakointi Aki Sammalisto Oy, Konnekuljetus Oy, Kuljetusliike Jouko Peltoniemi 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, Stora Enso Oyj, 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 eri vaiheissa Ville Saksi, Antti Raatevaara, Mika Vahtila, Pyry Seppälä, Kirsi Riekkä ja Lauri Karvonen.

2 TUTKITUT KULJETUSVIRRAT JA AJONEUVOYHDISTELMÄT

2.1 Kotimaisen puutavaran ja hakkeen autokuljetukset

HCT-yhdistelmien valtakunnallisten vaikutusten arvioinnissa on käytetty vuoden 2021 suorien autokuljetusten volyymeja ja keskikuljetusmatkoja (taulukko 1). Metsäteollisuus käytti vuonna 2021 noin 60 milj. m³ (noin 50 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 13 milj. m³ (Strandström 2022). Lämpö- ja voimalaitokset käyttivät 20 milj. m³ kiinteitä puupolttoaineita (ml. pelletit ja kierrätyspuu) (Luonnonvarakeskus 2024d).

¹ Ko. muutokset vietiin uuteen 1.6.2020 voimaan astuneeseen tieliikennelakiin (729/2018).

² Ajantasaisempi kuvaus tutkimustilanteesta on saatavissa sivulla www.metsateho.fi/hct.

Taulukko 1. Kotimaisen puun autokuljetusten määrät ja keskilähtömatkat vuonna 2021 (Korpijärvi ym 2021, Lapp ja Ikkonen 2017, Luonnonvarakeskus 2024a–d, Strandström 2021 ja 2022, Tilastokeskus 2024a).

2021	Metsäteollisuus		Lämpö- ja voimalaitokset (ml. metsäsektorin tuotantolaitoksilla)			
	Ainespuu	Sivutuote	Metsähake	Kuori	Puru	Puutähdehake
autokuljetus, 1 000 t/v	40 968	7 811	7 174	6 302	2 669	1 172
autokuljetus, 1 000 m ³ /v	49 170	9 467	7 532	7 667	3 336	1 502
ka. kuljetusmatka autolla, km	101	131	86	86	86	86

Metsäteollisuuden osalta vain kotimaisen puun kuljetusmäärät (pl. rautatie- ja vesikuljetusten alkukuljetukset). Sivutuotevolyyymi sisältää myös tuotantointegraattien sisäisen sivutuotteen käytön.

Energiapuuhakkeen autokuljetusmäärä = kokonaiskäyttömäärä – käyttöpaikassa haketetun puun määrä – tuontihakkeen laskennallinen käyttö.

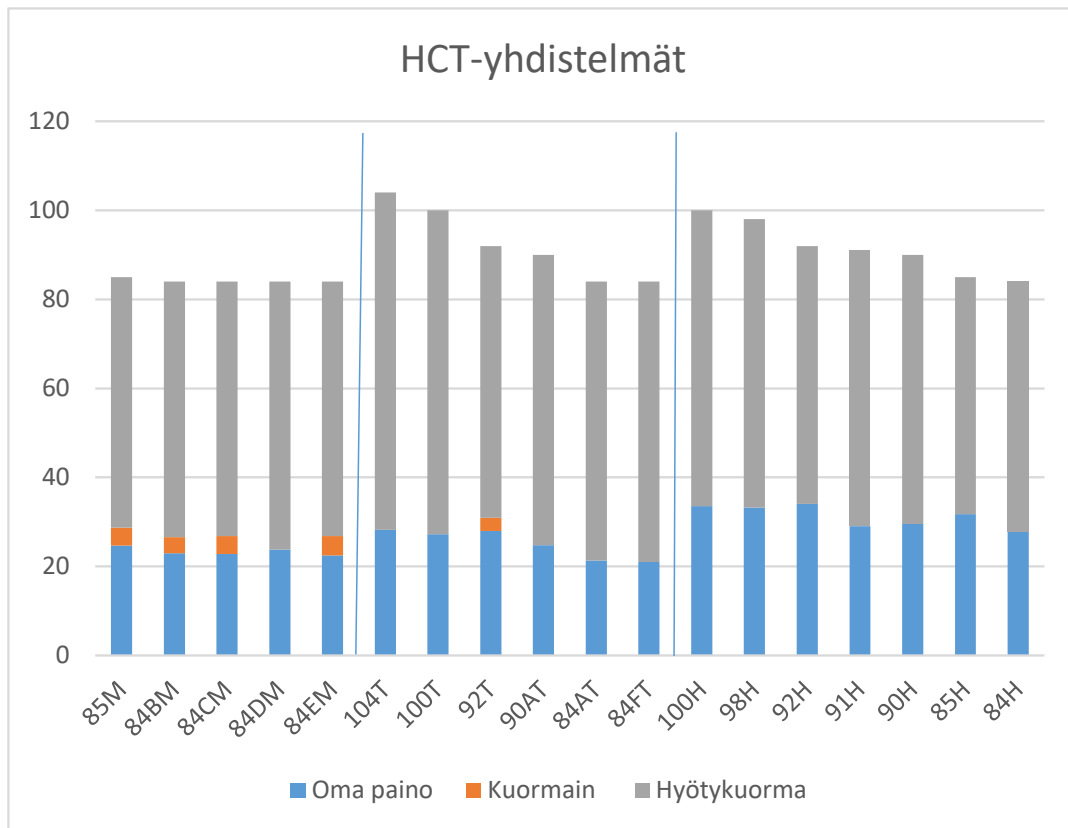
Puukuljetusten lisäksi merkittäviä metsäsektorin autokuljetusvolyymeja muodostavat tuotekuljetukset³ (ks. Infra ry ym. 2022) ja muut raaka-ainekuljetukset (esim. erilaiset kemikaalit). Tässä raportissa ei käsitellä metsäteollisuuden tuotekuljetusten HCT-kokeiluja, mutta esi-merkki näistä on Pohjaset Oy:n 98-tonninen sahatavaran ja sellun kuljetukseen käytetty yhdistelmä⁴. Konnekuljetus Oy:n haakeyhdistelmää käytettiin myös sellun kuljettamiseen.

2.2 Tutkitut HCT- ja verrokkiyhdistelmät

Selvityksessä on tarkasteltu pääosin niitä yhdistelmäratkaisuita, joita HCT-kokeiluissa on ollut mukana. Suuri osa kokeiluista on päättynyt tämän raportin julkaisemisvaiheessa. Raportissa esitettyihin tutkimuksiin osallistuneiden puutavaran ja hakkeen HCT- ja verrokkiyhdistelmien painot on esitetty kuvissa 1 ja 2 sekä muut ominaisuudet liitteessä 1. Osa HCT-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 sivutuotehaakeyhdistelmät H-merkinnällä. Energiapuu-yhdistelmillä ei ole ollut HCT-kokeilulupia.

³ Paperin, kartongin ja sellun tuotanto vuonna 2021 oli 17 milj. tonnia sekä havusahatavaran ja vanerin tuotanto 13 milj. m³ (Metsäteollisuus ry 2022). Tuotteiden kotimaan kuljetusosuuksiin hyödynnetään autokuljetusten lisäksi merkittävästi junakuljetuksia.

⁴ <https://www.kaleva.fi/lahe-satatonninen-massarekka-ajaa-kemin-ja-oulun/1886118>

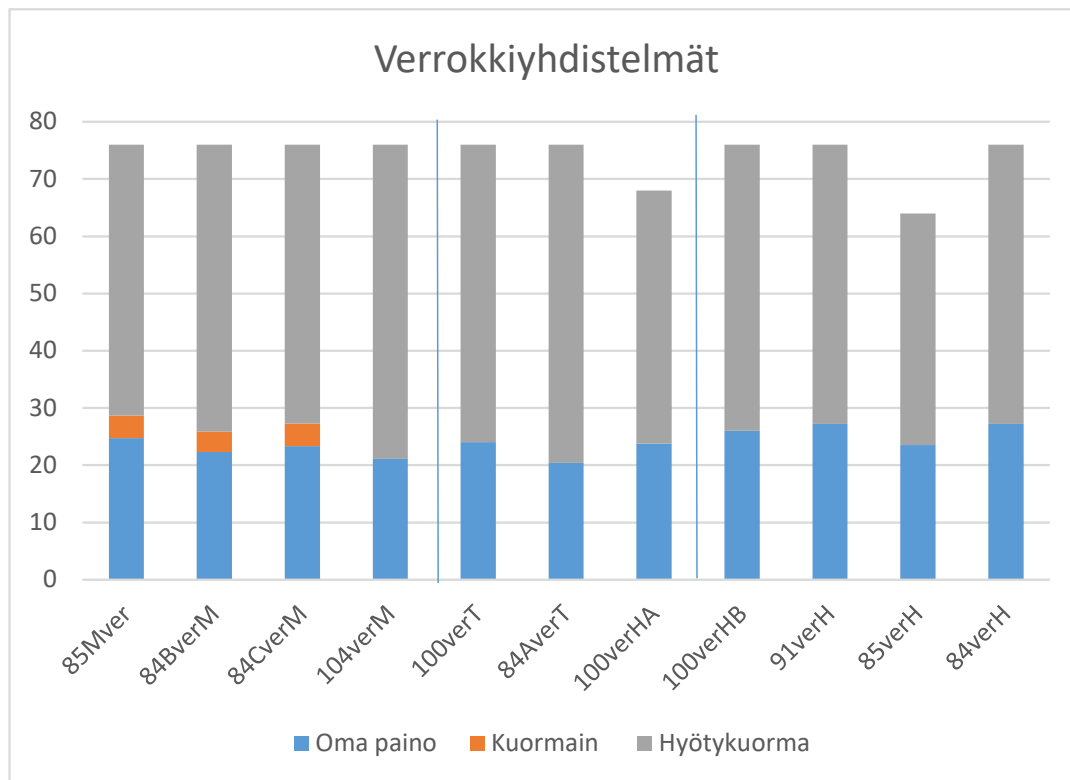


Kuva 1. Tutkittujen HCT-yhdistelmien omat ja kokonaispainot.

**Suunniteltu kokonaispaino 100 tonnia

M = metsäauto, T = terminaaliauto, H = hakeauto, ver = verrokiauto

Metsäautot, joille ei ole merkitty kuormaimen painoa, ajavat pääosin ilman kuormainta



Kuva 2. Tutkittujen verrokkiyhdistelmien omat ja kokonaispainot.

10- ja 11-akseliset kokeiluyhdistelmät ovat kuorma-autoista ja varsinaisista perävaunuista muodostettuja yhdistelmiä (taulukko 2). 12- ja 13-akseliset yhdistelmät koostuvat vetoautosta ja kahdesta perävaunusta.

Taulukko 2. HCT-kokeiluyhdistelmät akselimäärän mukaan.

Akselien lukumäärä	HCT-kokeiluyhdistelmät (akselien lkm ajoneuvoittain, kokonaispaino)
10	5 KA + 5 VPV (84 t) 4 KA + 6 VPV (85 t)
11	5 KA + 6 VPV (90 t, 91 t)
12	4 KA + 5 VPV + 3 PPV (92 t) 3 V + 4 PPV + 5 VPV (85 t, 92 t, 98 t, 100 t)
13	4 V + 4 PPV + 5 VPV (104 t)

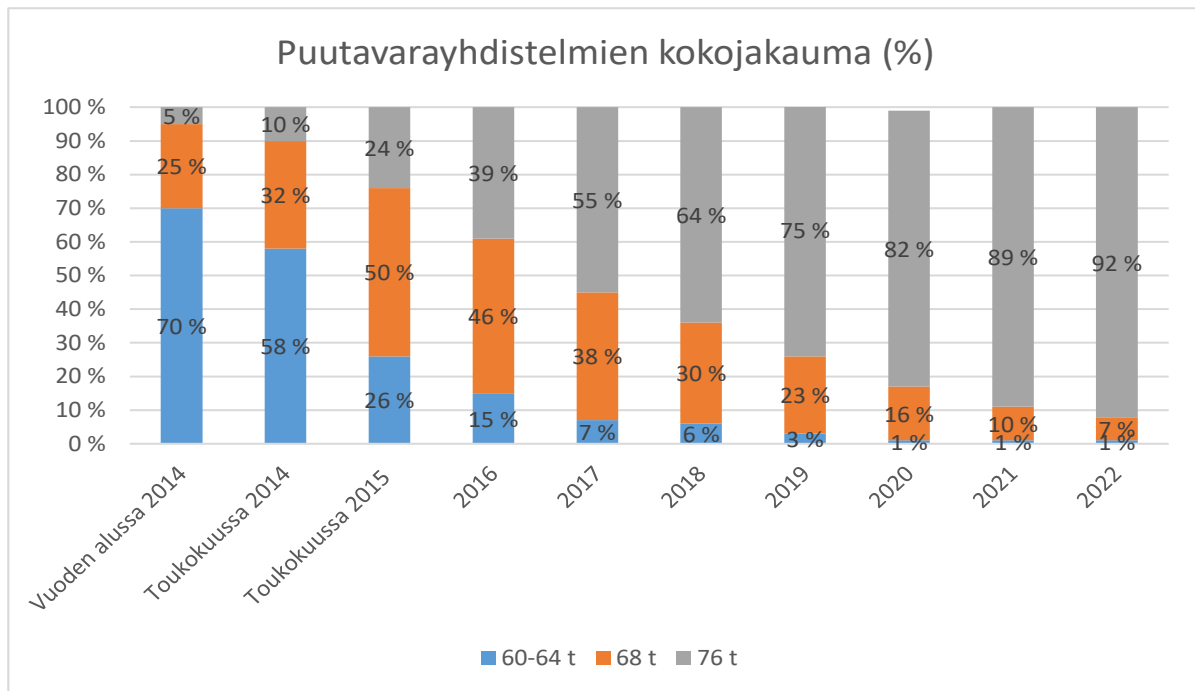
KA = kuorma-auto, V = puoliperävaunun vetoauto

VPV = varsinainen perävaunu, PPV = puoliperävaunu

Metsätehon kulutus- ja kustannusfunktioissa ja niiden pohjalta tehdyissä laskelmissa käytettiin seuraavia vertailuyhdistelmiä, joiden oletuksia on osin yhdistetty useamman yhdistelmän tiedoista (painottaen uusimpien yhdistelmien tietoja):

- 76-tonniset metsäautot (omapaino 22,5 t ja kuormain 4 t)
- 76-tonniset terminaaliautot (omapaino 21 t)
- 76-tonniset hakeautot (omapaino 26,5 t)
- 84-tonniset metsäautot (omapaino 23 t ja kuormain 4 t).
- 84,5-tonnisten hakeautojen luvut muodostettiin keskiarvotuloksina 84-tonnisen ja 85-tonnisen yhdistelmän lukemista
- 94-tonniset terminaaliautot (omapaino 25 t)
- 104-tonniset terminaaliautot (omapainot 28 t).

Verrokkeina kokeiluissa käytettiin HCT-yhdistelmien kanssa samoilla reiteillä tai vähintään samoilla alueilla ajavia yhdistelmiä. Puutavarayhdistelmien kaikki verrokkit ovat olleet 76-tonnisia, jotka kattavatkin nykyisin suurimman osan kotimaisen puutavarayhdistelmien autokannasta (kuva 3). Hakeyhdistelmien verrokkit ovat olleet 68- ja 76-tonnisia.



Kuva 3. Puutavarayhdistelmien kokorakenteen kehitys Metsäteho Oy:n valituille metsäyhtiöille lähettämän kyselyn mukaan. Esitetty jakauma on suuntaa antava kuljetusyritysten moniasiakkuuden takia.

HCT-kokeiluyhdistelmien erot nykyiseen sääntelyyn

Ajoneuvojen massoja ja mittoja koskevat säädökset sisältyvät tieliikennelakiin (729/2018) ja Traficomin määräyksiin (Traficom 2023 ja 2021). Kaikki puutavaran ja hakkeen HCT-kokeiluyhdistelmät ylittävät nykyisen lainsäädännön mukaisen 76 tonnin yhdistelmän kokonaispainorajan. Lisäksi massat poikkeavat eräissä yhdistelmissä telien ja perävaunujen massojen osalta (taulukko 3). Jatkossa metsäsektorin kokeiluissa ja tutkimuksissa on tavoitteena painottaa ns. tyyppiyhdistelmiä eli yhdistelmiä, jotka poikkeavat massoja ja mittoja koskevasta sääntelystä vain kokonaismassan osalta.

Osa HCT-kokeiluyhdistelmistä poikkeaa nykyllä lainsäädännöllä myös mitta- ja kääntövyysmääräysten osalta, mutta näitä eroja ei tarkastella tässä raportissa. Pääosin erot johtuvat siitä, että ensimmäisiä HCT-kokeiluja käynnistyi ennen viimeisimpiä muutoksia lainsäädännössä.

Kokeiluyhdistelmien kytkentälaitteet eivät ole tyyppihyväksytyjä kyseisille yhdistelmien painoille. Kokeilulupapäätöksen myöntämistä varten Traficom on vaatinut laitevalmistajan erillisen vakuutuksen laitteen kestävydestä ja/tai velvoitteen laitteen kunnon seurannasta ja vaihtamisesta normaalia aikaisemmin. Kokeiluiden aikana on markkinoille tullut uusia kytkentälaitteita, jotka soveltuvat korkeillekin massoille.

Taulukko 3. Puun ja hakkeen HCT-kokeiluyhdistelmien keskeiset erot lainsäädäntöön ja määräyksiin massojen tai massoihin liittyvien muiden tekijöiden osalta.

Lain tai määräysten mukaiset ominaisuudet		Laista tai määräyksistä poikkeavat ominaisuudet
YHDISTELMÄÄ TAI VÄHINTÄÄN KAHTA SEN AJONEUVOA KOSKEVAT LAIT JA MÄÄRÄYKSET		
Auton ja perävaunun yhdistelmän massa (74 tai 76 t akselimäärän mukaan)	-	Kaikki yhdistelmät (84–104 t)
KYTKENNÄN SILTÄSÄÄNTÖ Vetävän auton takatelin ja perävaunun etutelin yhteismassa*	84DM, 85M, 84FT, 90T, 85H, 92H, 98H, 100H	84BM, 84EM, 92T, 100T, 84H, 90H, 91H
Yli 44-t yhdistelmän massa ääriakselivälin mukaan	84CM, 84DM, 84EM, 85M, 84FT, 90T, 92T, 100T, 84H, 85H, 90H, 91H, 92H, 98H, 100H	84BM
PV-akselivälin 3 metrin sääntö	Kaikki yhdistelmät	-
Autoon kytkettävän hinnattavan ajoneuvon massa (pienin) 4) Muu kuin puolipv	84BM, 84CM, 84DM, 84EM, 85M, 84AT, 84FT, 90T, 84H, 90H, 91H	100T**, 98H, 100H**
5a) Useampi perävaunu 5b) PPV:n telimassa	85H, 92H 100T, 85H, 92H, 98H, 100H	
Akselimassat	Kaikki yhdistelmät	-
Kytkeämlaitteet	-	Kaikki yhdistelmät
AUTOA KOSKEVAT LAIT JA MÄÄRÄYKSET		
Teho (vähintään 5 kw jokaista yhdistelmämassan tonnia kohden)	Kaikki yhdistelmät	-
Auton massa -3-akselinen 25/26/28 t -4-akselinen 31/35 t -5-akselinen 42 t	100T, 85H, 92H, 98H, 100H 85M, 92T 84AT**, 84BM, 84CM, 84EM, 84FT, 90T, 90H**	-
AUTOJEN SILTÄSÄÄNTÖ Auton massa ääriakselivälin mukaan -Ei koske 3-akselisia -4-akselinen -5-akselinen	- 84BM, 84CM, 84DM, 84EM, 84FT, 90T	92T -
Auto: 2-akselisen telin massa	85H, 90H, 92H, 98H, 100H	100T

	Lain tai määräysten mukaiset ominaisuudet	Laista tai määräyksistä poikkeavat ominaisuudet
Auto: Peräkkäiset etuakselit, jotka ei muodosta teliä	84BM, 84DM/90T, 84EM, 84FT, 84H, 91H	-
Auto: 3-akselisen telin massa	84BM, 84EM, 84DM/90T, 85M, 84FT, 92T, 84H, 90H, 91H	-
YKSITTÄISTÄ PERÄVAUNUA KOSKEVAT LAIT JA MÄÄRÄYKSET		
Autoon kytkettävä hinattava ajoneuvo	Kaikki yhdistelmät	-
PERÄVAUNUN SILTÄSÄÄNTÖ Varsinaisen perävaunun massa	Kaikki yhdistelmät	-
PV: 2-akselisen telin massa Akselivälin mukaan 11,5–20	Kaikki yhdistelmät	-
PV: 3-akselisen telin massa Akselien etäisyyden mukaan 21/24	84BM, 84DM, 84EM, 84AT**, 84FT, 92T (VPV), 100T (osa PV), 84H, 85H, 92H, 98H, 100H	92T (PPV), 100T (osa PV)
PV: 4- tai useampiakselisen telin massa Akselien etäisyyden mukaan 24/27/30/36	85M	90T, 100T, 85H, 90H, 91H, 92H, 98H, 100H
PV: 5- tai useampiakselinen teli 36	Ei mukana kokeilussa	

Vertailuissa ei ole otettu huomioon vetäviä tai ohjaavia akseleita, ilmajousitusta tai perävaunujen maahan kohdistuvaa massaa koskevia vaatimuksia.

Vertailusta puuttuvat kokonaan yhdistelmät 84AT, 94T, 104T (joitakin yksittäisiä tietoja puuttuu muistakin yhdistelmistä).

**Erot lakiin pääosin alle yhden tonnin*

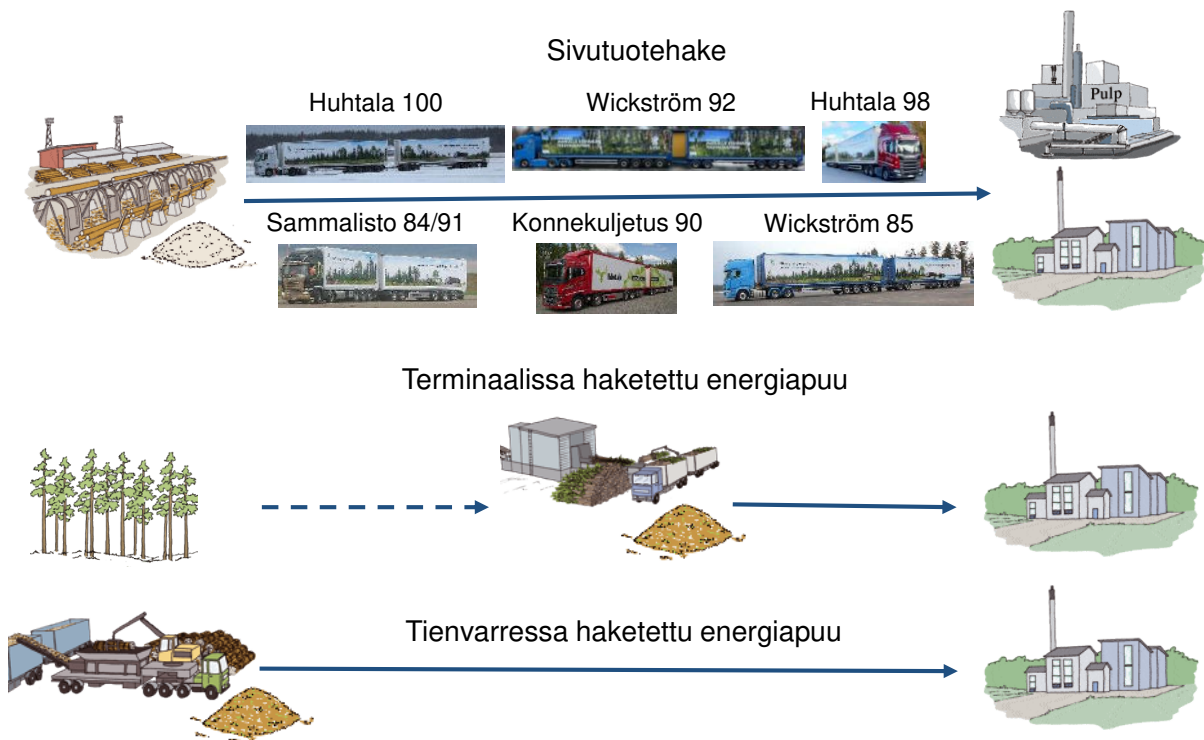
***Yhdistelmälle tai sen osalle haettiin suurempaa massaa, mutta sitä ei myönnetty*

Yhdistelmien kuljetusketjut

Osassa kuljetuskustannus- ja polttoaineen kulutustarkasteluja on vertailtu yksittäisten yhdistelmien sijasta kokonaisia kuljetusketjuja. Puutavarakuljetuksissa suurimmat HCT-yhdistelmät vaativat alkukuljetuksen metsäautolla, joten niiden vertailuissa koko ketju on otettava huomioon. HCT-kokeiluluvan saaneiden puutavara- ja hakeyhdistelmien kuljetusketjuja on esitetty kuvissa 4 ja 5. Orpen, Sammaliston, Konnekuljetuksen ja Malmstedtin HCT- ja verrokkiyhdistelmät ajoivat paljon meno-paluukuljetuksia. Muiden kuljetusyritysten HCT-yhdistelmät ja verrokkit ajavat ns. perinteisiä kuljetuksia (kuormattuna meno ja pääosin tyhjä paluu). Konnekuljetuksen yhdistelmä ajoi hakkeen lisäksi myös sellupaaleja. Metsäenergiapuun kuljetuksissa ei ole ollut HCT-yhdistelmiä, mutta Konnekuljetus toimittaa sivutuotteena syntyvää kuorta ja purua energialaitoksille.



Kuva 4. HCT-puutavarayhdistelmien kuljetusketjuja. (Kuvat: Jouko Peltoniemi Oy, Kari Malmstedt Oy, Metsähallitus Metsätalous Oy, Metsä Group, Metsäteho Oy, Orpe Kuljetus Oy).



Kuva 5. HCT-hakeyhdistelmien kuljetusketjuja. (Kuvat: Koneurakointi Aki Sammalisto Oy, Kuljetusliike Kalevi Huhtala Oy, Kuljetusliike Wickström Oy, Metsä Group, Metsäteho Oy).

2.3 Yritysten näkemykset HCT-yhdistelmistä

Metsäteho Oy haastattelututkimuksessa (Venäläinen ja Poikela 2021) koottiin HCT-kokeiluihin osallistuneiden puun ja hakkeen kuljetusyritysten, metsäyhtiöiden sekä kuorma-auto-, perävaunu- ja vetolaitevalmistajien kokemuksia HCT-yhdistelmistä ja näkemyksiä parhaiksi koetuista ratkaisuksista. Haastatteluissa korostuivat seuraavat näkemykset:

- HCT-yhdistelmissä tulee olla valinnanvaraa mm. painoluokkien osalta, jolloin kuljetusyritykset voivat valita oman toimintansa ja toiminta-alueensa kannalta toimivimman ratkaisun. Vastauksissa olikin eroa sen suhteen, minkä kokoisia HCT-yhdistelmiä pidettiin toimivimpina.
- Yritykset olivat pääosin tyytyväisiä niihin HCT-yhdistelmiin, joista niillä oli omaa kokemusta. Lisäksi ehdotettiin joitakin ajoneuvojen ja yhdistelmien kokoluokkia, joita ei ole ollut kokeiluissa mukana.
- HCT-yhdistelmien tehokasta hyödyntämistä tukisi uudenlaisten toimintamallien käyttöönotto (meno-paluukuljetusten ja erillisterminaalien nykyistä laajempi hyödyntäminen).

Selvityksen yhtenä jatkotutkimustarpeena tunnistettiin ajoneuvojen soveltuvuuden tarkastelu kuljetettavan puun eri pituuksille.

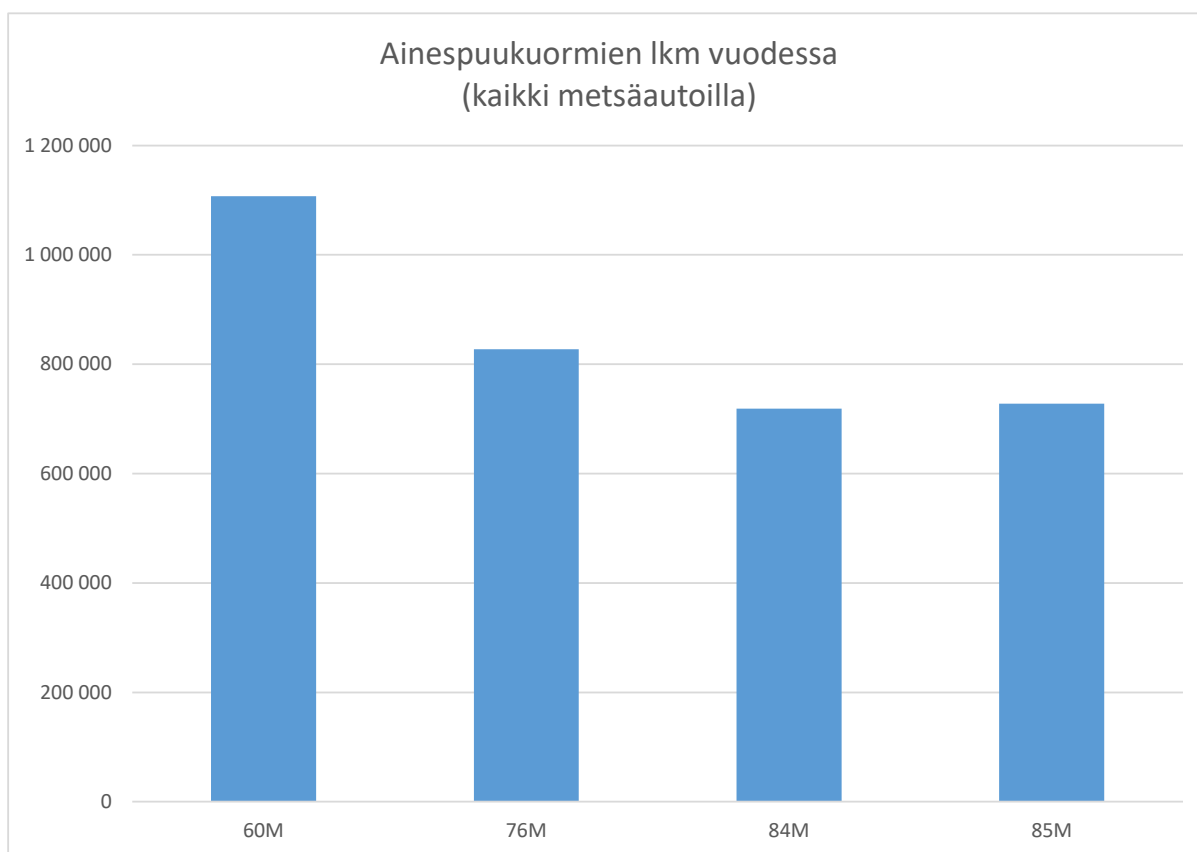
Puukuljetusyrittäjille suunnatussa kyselytutkimuksessa (Palander ym. 2023) selvitettiin mm. yrittäjien näkemyksiä parhaista yhdistelmistä puukuljetuksissa. Metsästä lähteviin tukki- ja kuitupuukuljetuksiin vastaajista selvästi suurin osa näki 76-tonnisen yhdistelmän olevan paras ja vain muutama prosentti uskoi 84-tonnisen olevan paras ja kustannustehokkain kuljetettua kuutiota kohden. Terminaaleista lähtevän kuitu- ja tukkipuun kuljetuksiin vastaajista puolestaan neljännes näki 84-tonnisten tai tätä suurempi yhdistelmien olevan parhaita ja kustannustehokkaimpia. HCT-yhdistelmien ei nähty juurikaan olevaan paras ratkaisu energiapuun kuljetuksiin. Kyselytuloksen tulkinnassa on hyvä ottaa huomioon, että vain pienellä osalla yrittäjistä on omakohtaista kokemusta HCT-yhdistelmistä.

Samassa kyselyssä selvitettiin yrittäjien näkemyksiä tieverkon eri osien soveltuvuudesta eri kokoisille yhdistelmille. Paikallisten ja metsäteiden sekä siltojen nähtiin olevan huonosti soveltuvia maksimissaan 76-tonnisillekin yhdistelmille (puolet tai yli puolet vastaajista oli eri mieltä soveltuvuudesta). Yli 76-tonnisten yhdistelmien osalta soveltuvuus nähtiin selvästi heikommaksi.

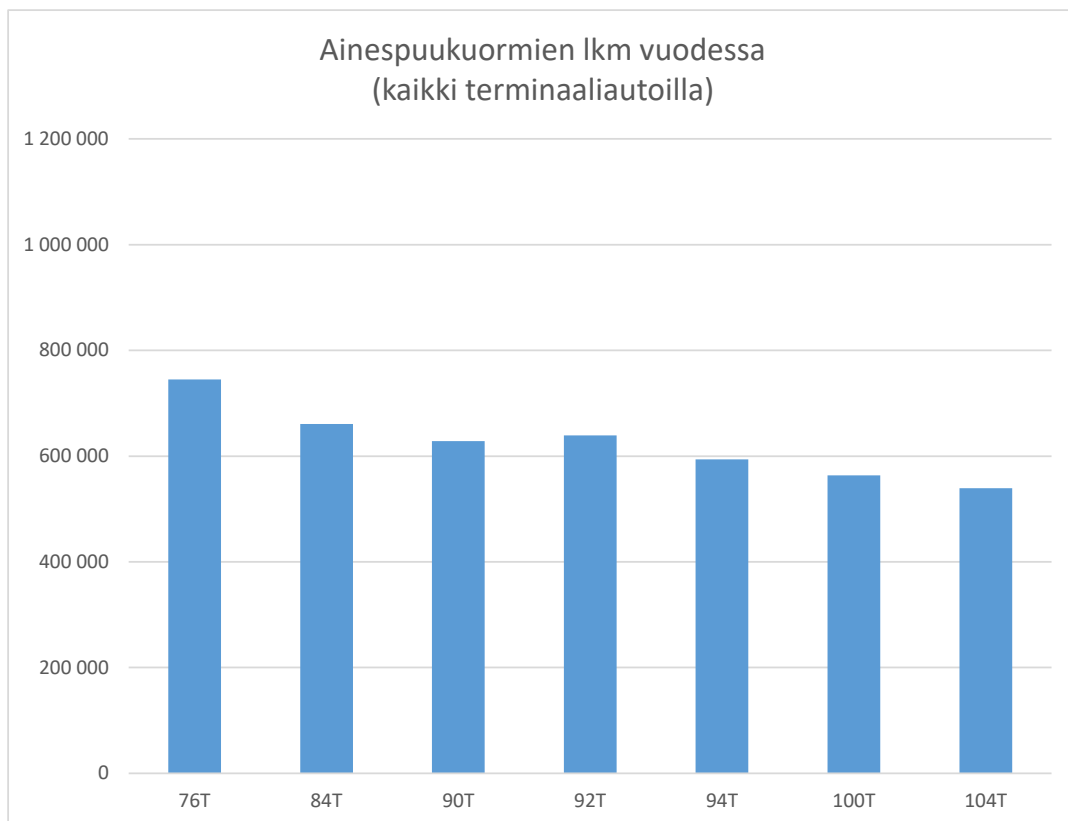
3 YHDISTELMIEN MASSOJEN NOSTON VAIKUTUKSIA

3.1 Kuormien määrä

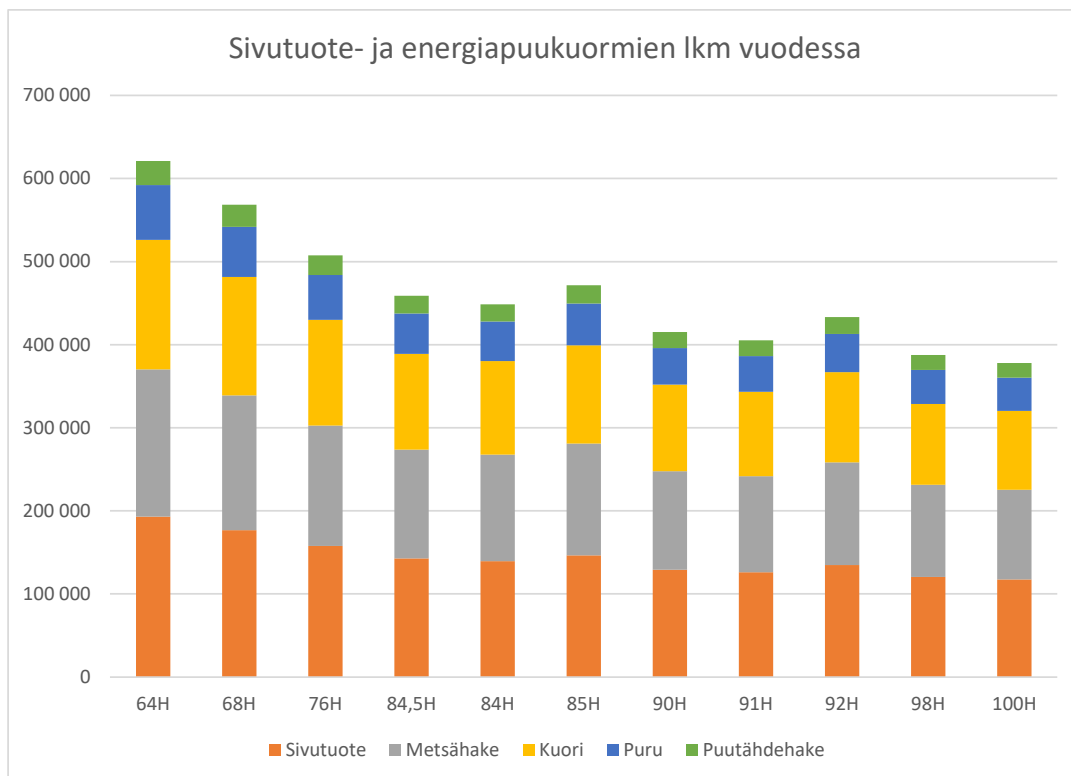
Valtakunnallisissa vertailuissa oletettiin taulukon 1 mukaiset vuoden 2021 kuljetusvolyymit, ja että menokuljetus on aina täynnä ja paluukuljetus on tyhjä. Lisäksi oletettiin, että kaikki kotimainen puu kuljetettaisiin ko. kokoluokan yhdistelmillä. Ajoneuvoyhdistelmien kokoluokan kasvaessa tarvittavien kuormien määrä vähenee, mikä vähentää kuljetuskustannuksia, polttoaineen kulutusta kuljetettua tuoretonnia kohden, ruuhkia varsinkin toimituskohteiden lähellä sekä liikenneonnettomuuksien riskiä. 84-tonnisilla metsäautoilla vähennettäisiin vuosittaisten ajojen määrää lähes 110 000:lla 76-tonnisiin verrattuna (kuva 6). HCT-kokeiluissa mukana olleet terminaaliautot vähentäisivät puolestaan vuosittaisten ajojen määrää 85 000–210 000:lla (kuva 7). HCT-hakeyhdistelmät vähentäisivät kuormien määrää 76-tonnisiin nähden 35 000–130 000:lla vuodessa (kuva 8). Puutavarakuljetuksissa HCT-yhdistelmillä voidaan kuljettaa neljä puunippua kerralla, kun 76-tonnisilla nippuja on kolme.



Kuva 6. Vuosittaisten ainespuukuormien lukumäärä, kun kaikki kotimainen autolla kuljetettava ainespuu kuljetettaisiin ko. kokoluokkien metsäautoilla (omapainoihin sisältyy 4 tonnin kuormain).



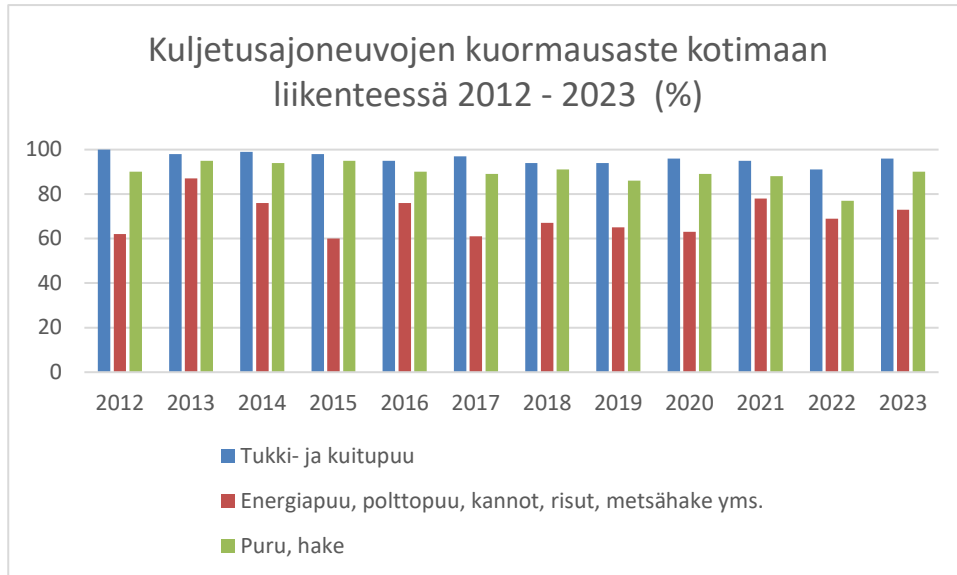
Kuva 7. Vuosittaisten ainespuukuormien lukumäärä, kun kaikki kotimainen autopuu kuljetettiin ko. kokoluokkien terminaaliautoilla.



Kuva 8. Vuosittaisten kuormien lukumäärä, kun kaikki kotimainen sivutuote- ja energiapuu-hake kuljetettaisiin ko. kokoluokkien hakeautoilla.

3.2 Kuljetustehokkuus

Kuljetustehokkuudella tarkoitetaan tässä puutavara- ja hakeyhdistelmien kuormatilan hyödyn-
tämisen tehokkuutta. Kuljetuskustannuksia ja tarvittavia ajojen määrää on tarkasteltu erikseen
omissa luvuissaan. Ainespuu- ja hakekuljetuksissa ajoneuvojen kuormausasteet ovat korkeita
(kuva 9), joten kokonaispainoltaan isompien yhdistelmien kapasiteettia voidaan käyttää tehok-
kaasti.

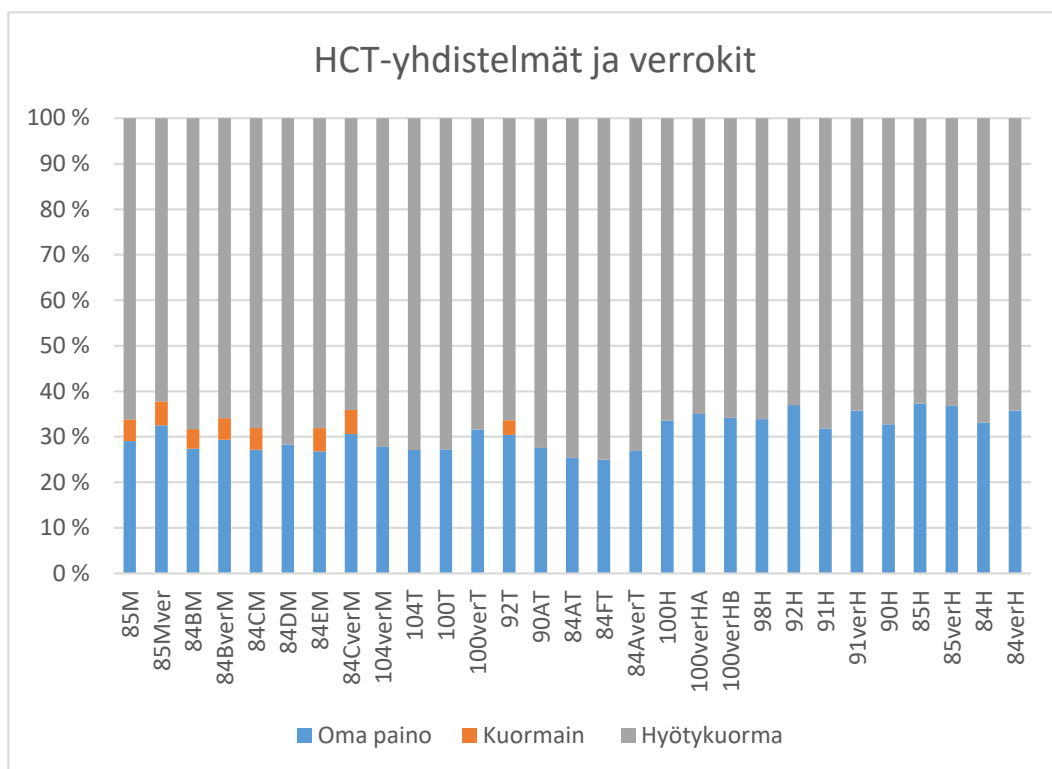


Kuva 9. Puun autokuljetusten kuormausasteet (Tilastokeskus 2024a).

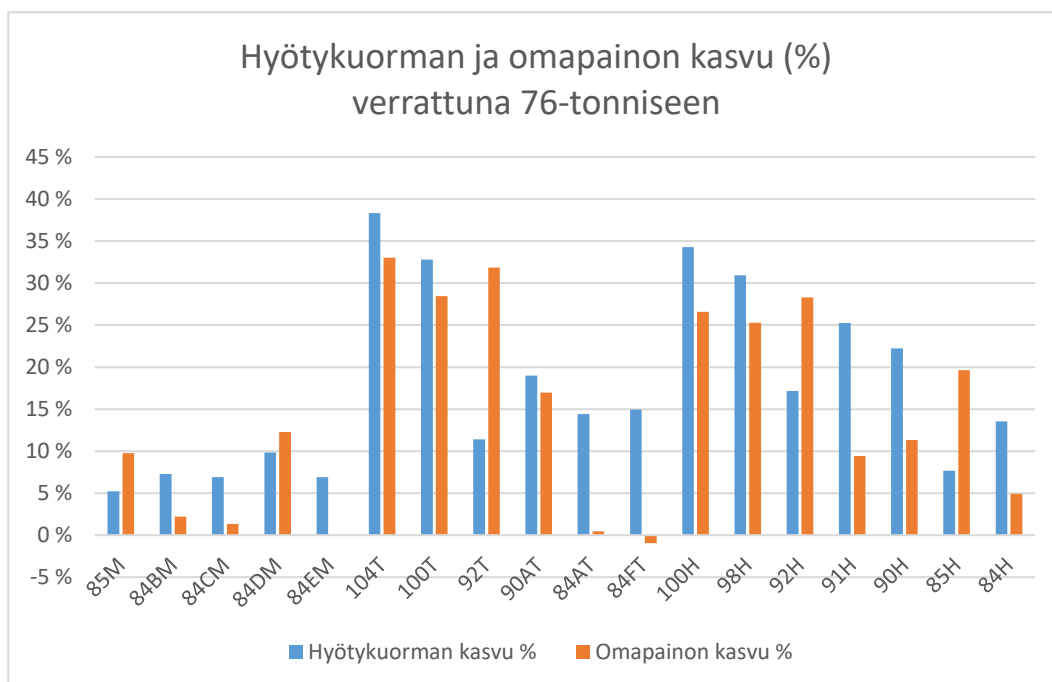
Ajoneuvoyhdistelmien kuormausasteeseen vaikuttavat puun tuoretiheyden vaihtelut vuoden-
aikojen mukaan sekä pyöreän puun eri katkontapituudet. Ajoneuvojen pituuksien vaikutuksia
koskeneessa selvityksessä (Venäläinen 2019) tuotiin esille, että pelkkä pituuksien nosto ei
monissa puutavaran ja hakkeen kuljetuksissa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

HCT-yhdistelmillä hyötykuorman osuus kokonaispainosta on pääosin suurempi kuin niiden
verrokeilla (kuva 10). Tutkituista yhdistelmistä suurin hyötykuorman osuus on 84-tonnisella
terminaaliautolla (75 % kokonaispainosta). Hakeyhdistelmillä on hakkeen purkulaitteiden takia
suhteessa korkeampi omapaino kuin puutavarayhdistelmillä.

Noin puolella HCT-yhdistelmistä hyötykuorman kasvuprosentti on suurempi kuin omapainon
kasvuprosentti 76-tonnisiin tyyppiverrokkisiin nähden (kuva 11). Suhteellisesti suurin hyöty-
kuorman kasvu oli 91-tonnisella Sammaliston hakeyhdistelmällä ja Hannosen 84-tonnisella
terminaaliyhdistelmällä. Metsäautoista suurin hyötykuorman kasvu verrattuna omapainon
kasvuun oli P&A Transin uudella 84-tonnisella yhdistelmällä. Eri kokoisten yhdistelmien te-
hokkuutta ei voi suoraan päätellä näiden laskelmien perusteella, koska kokoluokittain kokei-
luissa on vain yksittäisiä yhdistelmiä. Yhdistelmille ei ole välttämättä myönnetty niitä massoja,
joille yhdistelmä on suunniteltu. Tehokkaimmissa yhdistelmissä käytettyjä ratkaisuja kannat-
taa kuitenkin ottaa huomioon HCT-yhdistelmien jatkokehityksessä.



Kuva 10. Omapainojen osuus tutkimusyhdistelmien kokonaispainosta (%).



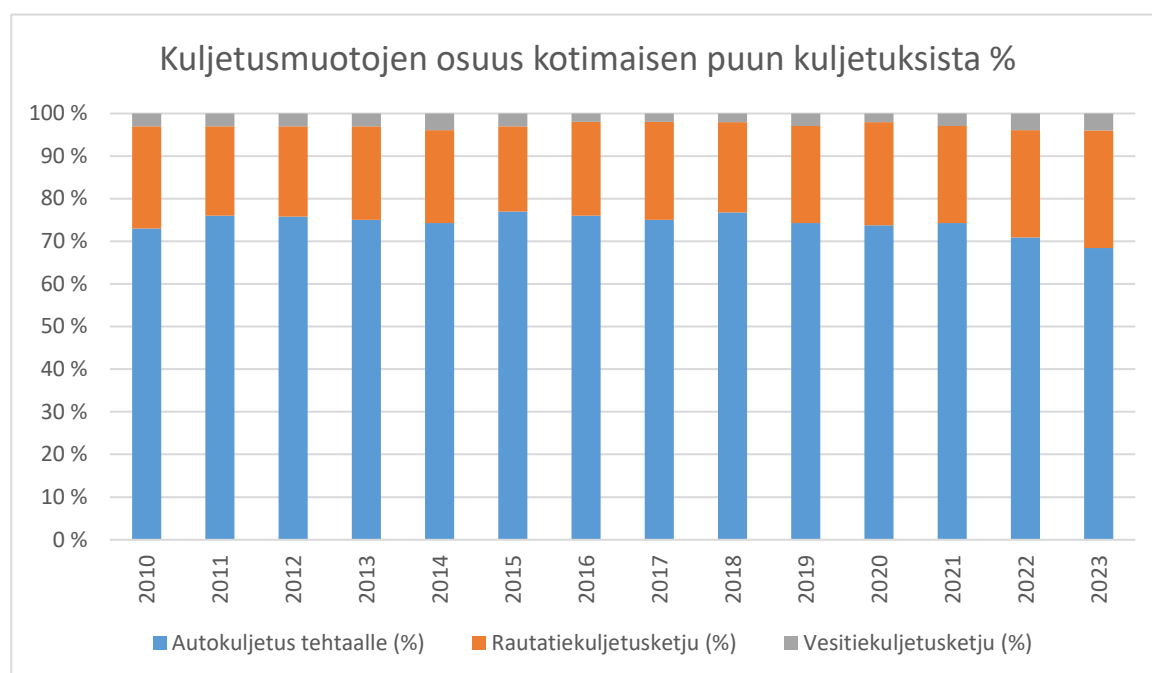
Kuva 11. Hyötykuorman ja omapainon kasvu verrattuna 76-tonniseen vertailuyhdistelmiin (kuormainten painoja ei ole otettu huomioon).

3.3 Vaikutus rautatiekuljetusten käyttöön

Väyläviraston tutkimuksissa (Lapp ja likkanen 2017, Lapp ym. 2022) selvitettiin HCT-kuljetusten potentiaalia eri tavaralajien kuljetuksissa sekä HCT-kuljetusten vaikutuksia rautatiekuljetusten käyttöön. Raakapuun osalta tarkastelussa oli mukana vain 84-tonniset yhdistelmät.

Niiden arvioitiin vähentävän rautatiekuljetuksia varsinkin yhteysväleillä, joilla suoraa ratayhteyttä ei ole (esimerkiksi Parkanon alueelta Raumalle, Pohjois-Savosta Äänekoskelle sekä Pohjois-Savon pohjoisosista ja Pohjois-Savon eteläosista Lappeenrantaan, Joutsenoon ja Imatralle). Raakapuun rautatiekuljetusten arvioitiin vähentyvän 5–7 % HCT-yhdistelmien käyttöalueen laajuudesta riippuen. Uusimman tarkastelun mukaan tämä tarkoittaisi 1,4 tai 3,7 miljoonaa tonnia skenaariosta riippuen. Siirtymäpotentiaalia pienentäneen kuitenkin rautatiekuljetusten oman kilpailukyvyyn parantuminen. Haketta kuljetetaan junalla vain 0,2–0,3 milj. tonnia vuodessa. Aiemman selvityksen mukaan HCT-ajoneuvoilla arvioitiin olevan suuri käyttöpotentiaali hakekuljetuksissa. Selvityksissä ei tuotu esille HCT-yhdistelmien roolia raakapuun juna- ja rautatiekuljetusten alkukuljetuksissa. Myöskään puutuonnin loppumista Venäjältä ei ole tarkasteltu.

Edellinen ajoneuvomassojen korotus vuonna 2013 ei aiheuttanut muutosta rautatiekuljetusten osuuteen puukuljetuksissa (kuva 12).



Kuva 12. Kuljetusmuotojen osuus kotimaisen puun kuljetuksista 2010–2023 (% kuljetetuista kuutioista vuodessa) (Metsäteho Oy lähteessä Luonnonvarakeskus 2024c, Strandström 2023 ja 2024).

3.4 Kuljetuskustannukset

Kuljetuskustannuksia verrattiin ensin yksittäisten yhdistelmäkokojen ja kuljetusketjujen välillä. Lisäksi arvioitiin HCT-yhdistelmien vaikutusta valtakunnallisiin puu- ja hakekuljetusten kustannuksiin. Tässä raportissa käytetään edellisen raportin eli vuoden 2021 kustannustasoa. Kustannustaso on tarpeen päivittää seuraavaan yhteenvetoraporttiin.

3.4.1 Kuljetusten kustannustekijät ja tietojen keruu

Kustannuslaskelmien laatimista varten tutkituista HCT- ja verrokkiyhdistelmistä kerättiin:

- ajokohtaiset kuorma- ja reittitiedot (joko kuljetuksen antajalta tai kuljetusyrytykseltä)
- 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 4 ja keskeiset oletukset taulukkoon 5. Eri yhdistelmien vertailtavuuden parantamiseksi laskelmissa käytettiin osin yhteisiä kustannusoletuksia (esimerkiksi korkotaso, työkustannukset per tunti, kuormattuna ajon osuus tai ajanmenekit per m³). 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 ollut kokeiluissa käytössä. Laskelmissa 76-tonnisina vertailukohteina on käytetty vain yhden omapainoluokan yhdistelmiä (ks. luku 2.2). Tutkimusyhdistelmien verrokkeina on ollut osin omapainoltaan näitä suurempia yhdistelmiä, joihin verrattuna kustannussäästö olisi tässä esitettyä suurempi. Polttoaineen kulutus perustuu nyt arvioon, joka on kuvattu tarkemmin luvussa 3.6.1.

Taulukko 4. 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 5. Keskeiset kustannuslaskelmien oletukset.

Kuormat: Ei vajaakuormia, ei keräilyajoa Ainespuu: havupuu 70 %, lehtipuu 30 % Tyhjänä ajoa tasan 50 % (täysi meno ja tyhjä paluukuljetus, paitsi erillisissä meno-paluulaskelmissa)	Yhdistelmien käyttöaika: autot täystyöllistettyjä (47 vk/v, 5 pv/vk, 24 h/pv); kuljettajien ajoaikamääräysten vaikutuksia eri kuljetusmatkoilla ei ole otettu huomioon
Alkukuljetusmatka: HCT-ketjulaskeissa on oletettu alkukuljetusmatkaksi metsästä terminaaliin 25 km	Korjaus- ja huoltokustannukset: Vetoauton km-kohtainen huoltokustannus sama HCT- ja 76-tonnisella yhdistelmällä. Terminaaliautoilla kuormaimen puuttumisen takia noin 10 % alempi k&h-kustannus kuin metsäautolla. Perävaunun pitoaika (km) on kolmanneksen pidempi ja rengaskerron kesto (km) n. 20 % pidempi, kun verrataan terminaaliautoa metsäautoon.
Ajonopeudet: kokonaispaino ei vaikuta ajonopeuteen, ajonopeus = $F(\text{ajomatka, ajovaihe})^*$	
Kuormaus ja purku: Metsäautot kuormataan ja puretaan omalla kuormaimella Käyttöpaikassa autot puretaan käyttöpaikan kalustolla yli 70 km:n ajomatkalla Terminaalissa puutavara-auto joko kuormataan kokonaan maasta (100 %:n siirtokuormaus), kuormataan puoliksi ja loput kuormasta tulee valmiiksi lastattuna perävaunun (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 suoritettujen kuormauksen ja purkamisen kustannus 0,30 €/m³/käsittelykertaa + auton odotuskustannus (ks. tarkemmin Poikela ja Venäläinen 2017).

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

Ajoneuvoyhdistelmien pääomakustannuksiin vaikuttaa korkotason lisäksi kaluston vaihtoarvon ja/tai ajettujen kilometrien suhteen. Metsäteho selvitti 4-akselisten puutavarayhdistelmien sekä 3- ja 4-akselisten hakeyhdistelmien vetoautojen vaihtoarvon kehitystä Mascus- ja Nettikone-alustoilla julkaistujen myynti-ilmoitusten pohjalta. Tiedot poimittiin 28.–29.10.2020; Nettikoneen osalta otettiin mukaan myös äskettäin poistuneita ilmoituksia (tarkka haku: myydyt).

Myynti-ilmoituksessa esitetyt pyyntihinnat voivat poiketa selvästikin toteutuneesta hintatasosta. Autoon on voitu tehdä välittäjäliikkeen toimesta myös laajoja huolto- ja korjaustoimenpiteitä, jotka ovat nostaneet auton arvoa edelliselle omistajalle maksettuaan hyvityshintaan nähden. Mm. näistä syistä johtuen tarkastelutapa saattaa antaa hieman optimistisen kuvan kaluston hintakehityksestä.

Tehdyn tarkastelun perusteella puuautojen hyvityshinta laskee ajettuihin kilometreihin nähden hitaammin kuin hakeautoilla (20 vs. 23 %/vuosi). Tämä selittyy pääosin sillä, että hakeautojen keskimääräiset vuosittaiset ajokilometrit eivät laske auton ikääntyessä yhtä nopeasti kuin puuautoilla. Kun arvonalenemaa tarkastellaan pelkästään ajokilometrien suhteen, erot puu- ja hakeautojen hintakehityksessä tasoittuvat ja arvonalenema on keskimäärin samaa tasoa (16 % / 100 tkm).

Tämän tarkastelun perusteella vetoauton pääomakustannuslaskelmassa sovellettu arvonalenemaoletus (25 %/v) soveltuu hyvin kustannuslaskennan perusteeksi. Tarkastelun tulokset on koottu liitteeseen 2.

Edellisessä taulukossa (5) on mainittu tilanne, jossa kuorma on lastattu terminaalissa valmiiksi perävaunuun ja jalkalavalle. Tämä onnistuu vain 76- ja 84-tonnisilla yhdistelmillä. Hannosella jalkalava-asema sijaitsi yhtiön omassa terminaalissa (kuva 13). Moilaspojilla oli puolestaan käytössä siirrettävä jalkalava-asema (kuva 14).



Kuva 13. Jalkalavaa kyytiin ottava HCT-auto Hannosen terminaalissa (Metsä Group).



Kuva 14. Moilaspoikien HCT-auto on jättänyt tyhjän jalkalavan terminaaliin ja ottaa kyytiin valmiiksi lastatun (Metsähallitus Metsätalous Oy).

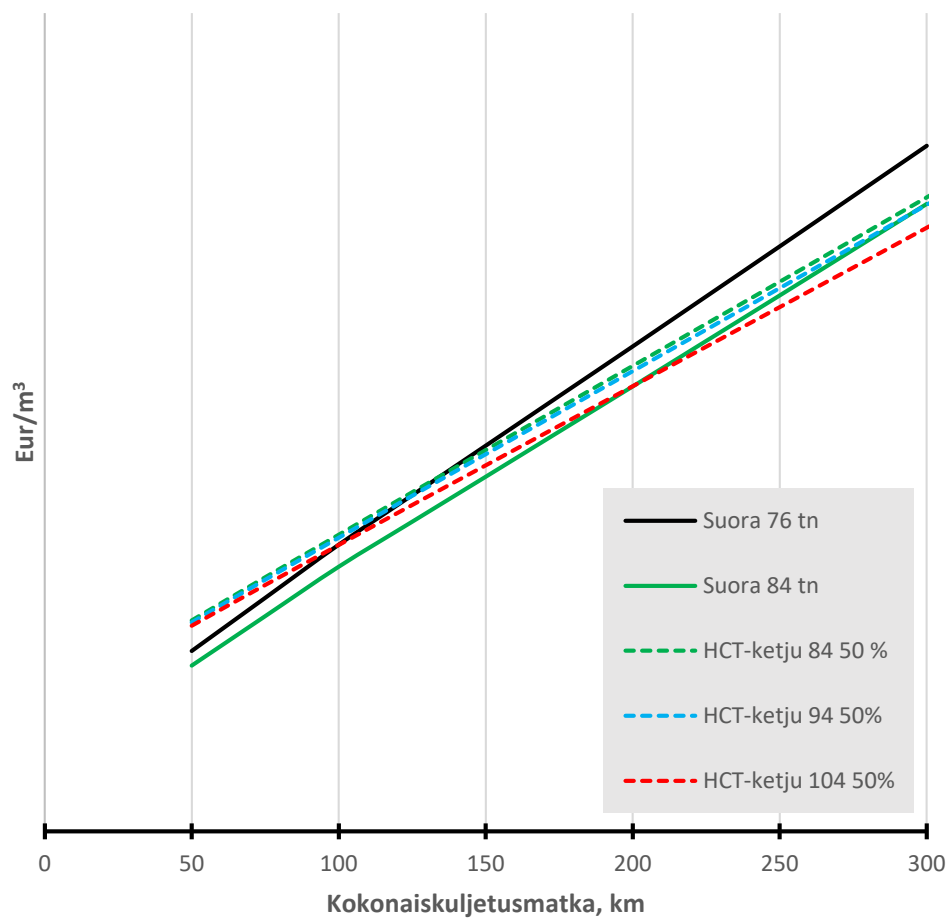
3.4.2 Yksittäisten yhdistelmien kustannusvertailut

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

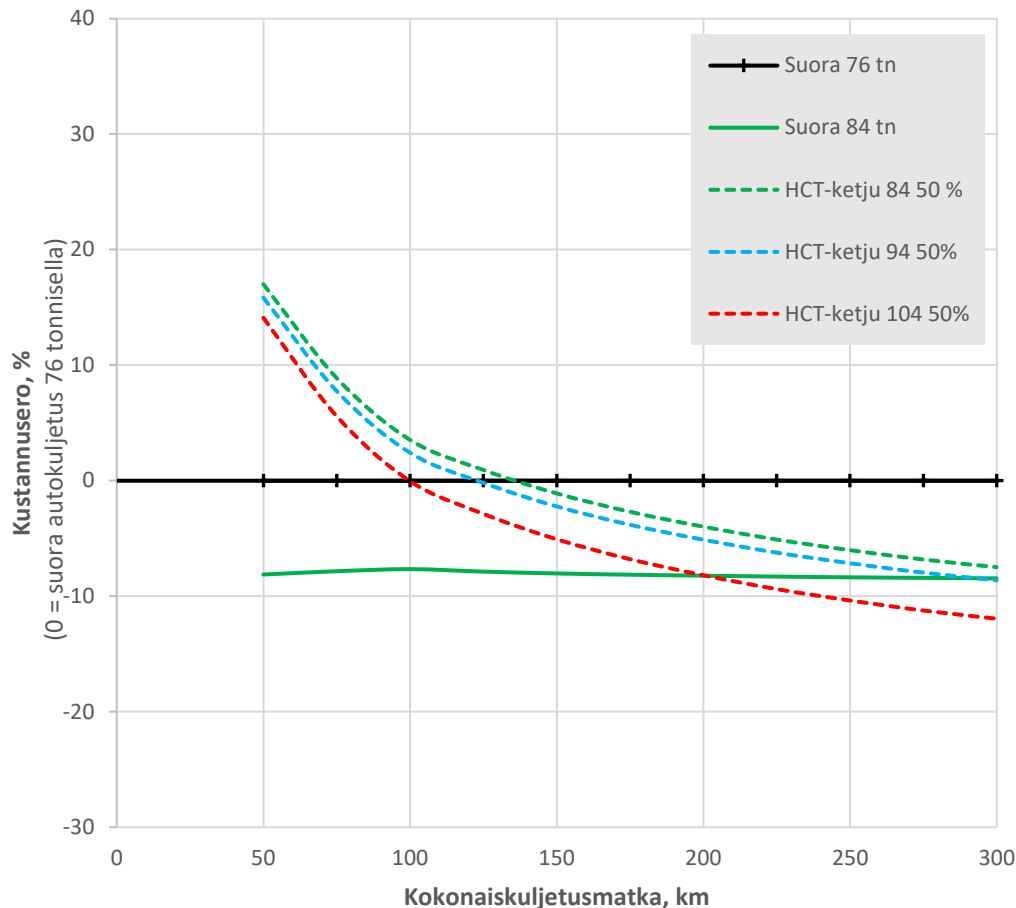
Verrattaessa kustannuksia **suoriin kuljetuksiin 76-tonnisilla metsäautoilla** 84-tonninen metsäauto tuo 8 %:n kuljetuskustannussäästön (kuvat 15 ja 16).⁵ **HCT-terminaaliautojen kuljetusketjuissa**⁶ 84-tonninen yhdistelmä tuo säästöjä lähes 150 km:n ja sitä pidemmillä matkoilla (1,1–7,5 % matkan pituudesta riippuen). 94-tonninen on kustannustehokkaampi vähintään 125 km:n kuljetusmatkalla (säästö 0,2–8,6 %). 104-tonninen on kustannustehokkaampi jo 100 km:n matkalla (säästö 0,04–11,9 % kuljetusmatkasta riippuen).

⁵ 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.

⁶ Kuljetusketjuihin sisältyy aina myös alkukuljetus. Ks. eri siirtokuormaustapojen kuvaus (0 %, 50 % ja 100 %) taulukossa 5 luvussa 3.4.1



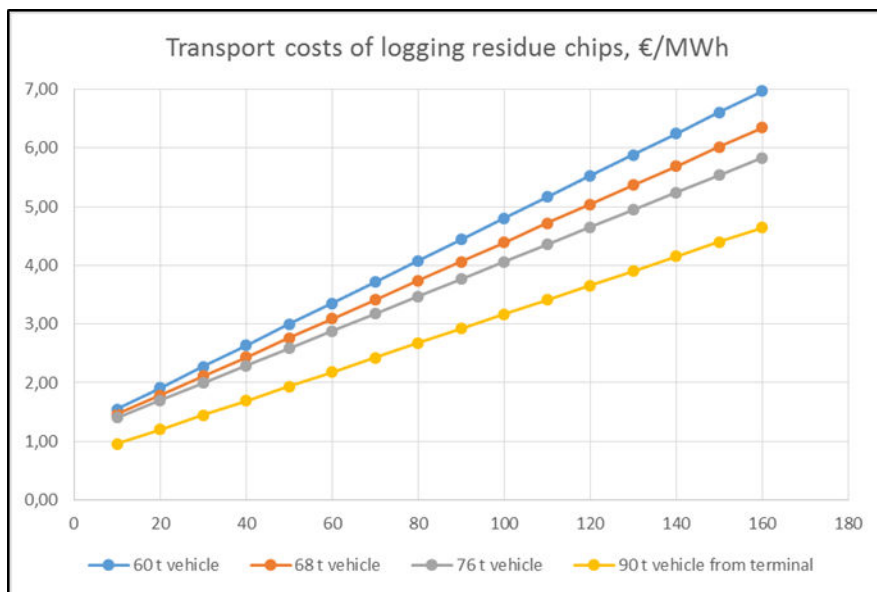
Kuva 15. Puun kuljetusketjujen kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla (€/m³).



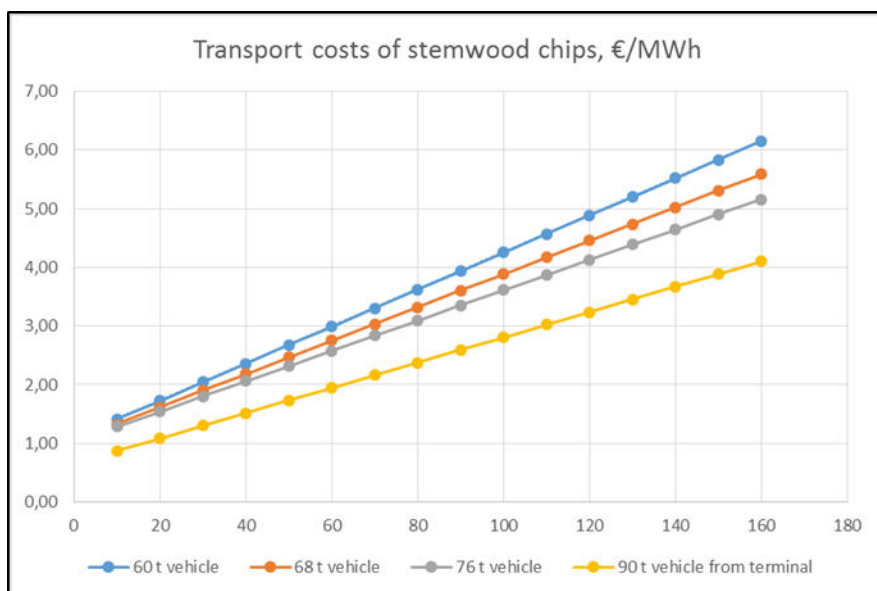
Kuva 16. Puun kuljetusketjujen kustannusvertailut eri kuljetusmatkoilla kuljetettua kuutiota kohden (erotus suoraan kuljetukseen 76-tonnisella yhdistelmällä, %).

Siirtokuormauksia yhdistelmien välillä tehdään osin jo nyt eri syistä (esim. kelirikkovarastointi tai kuljetusyrityksen oma halu käyttää terminaalia resurssien käytön tasaajana). Terminaali-vaiheesta voi olla puun kuljetusketjulle kustannus- tai toimintavarmuusetuja, joiden rahallista merkitystä on vaikea arvioida. Terminaalien erilaisia käyttötilanteita tunnistettiin Metsäteho Oy:n ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston (2017) terminaalityöskirjan yhteydessä.

Energiapuukuljetusten kustannusvertailuita laadittiin BEST-hankkeen yhteydessä (Korpi-lahti 2015) (kuvat 17 ja 18). Energiapuun matalan tiheyden takia HCT-yhdistelmät sopivat parhaiten hakkeen ja rankapuun kuljetuksiin. Vuonna 2020 metsähakkeesta 36 % haketettiin terminaaleissa. Terminaalihaketuksen osuus on selvästi kasvanut kymmenen vuoden aikana. (Strandström 2021). 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 17. Hakkuutähdehakkeen kuljetuskustannukset eri kuljetusmatkoilla (90-tonnisen osalta terminaalista kuljetettuna) (Korpilahti 2015).



Kuva 18. Rankapuuhakkeen kuljetuskustannukset eri kuljetusmatkoilla (90-tonnisen osalta terminaalista kuljetettuna) (Korpilahti 2015).

HCT-yhdistelmistä Orpella oli 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.

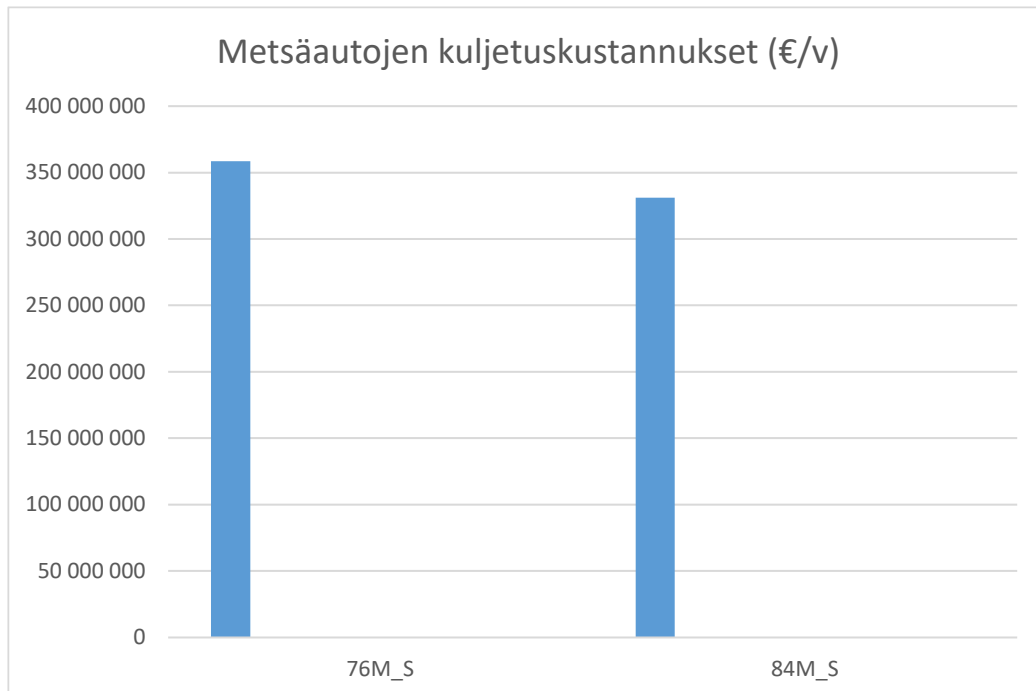
3.4.3 Valtakunnalliset kustannuslaskelmat

Valtakunnalliset kustannuslaskelmat perustuvat luvun 2.1 kuljetusvolyymeihin. Kuljetusmatkana on käytetty sekä luvun 2.1 keskimääräistä kuljetusmatkaa että skenaariota kuljetusmatkojen jakaumasta.

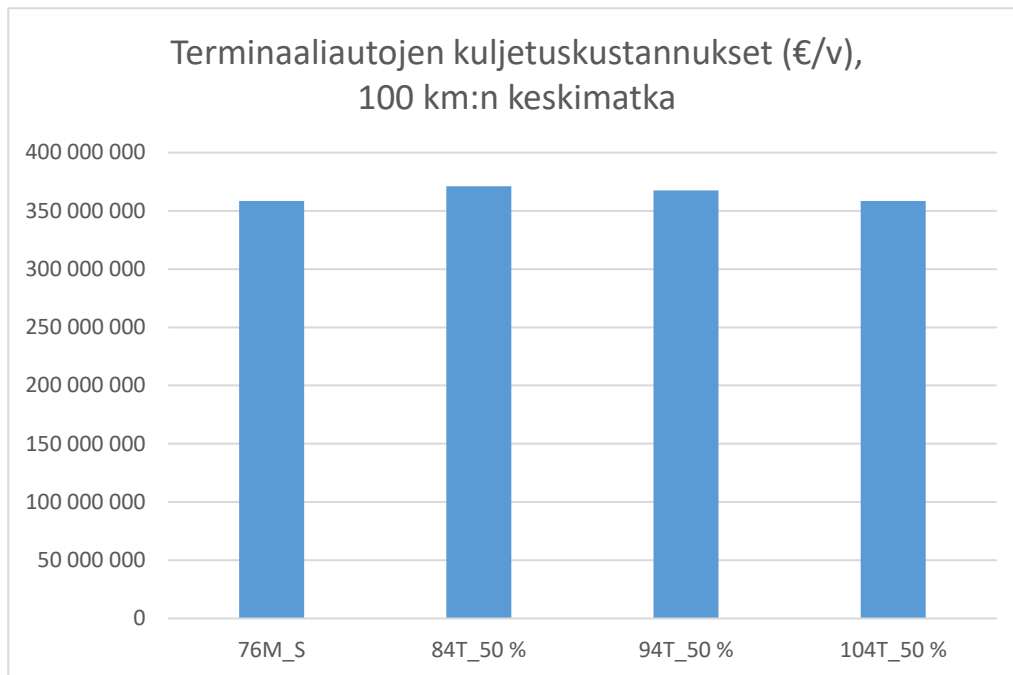
Keskimääräisen kuljetusmatkan mukainen laskelma

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 27 milj. euron vuosittaisen kustannussäästön (kuva 19). HCT-terminaaliyhdistelmät eivät tuo säästöä vielä 100 km:n keskipituisella matkalla (kuva 20).



Kuva 19. Valtakunnalliset pyöreän puun kuljetuskustannukset kalustokoon mukaan (€/v, suora kuljetus metsäautoilla tehtaalle, kuormain 4 t sisältyy omapainoon).

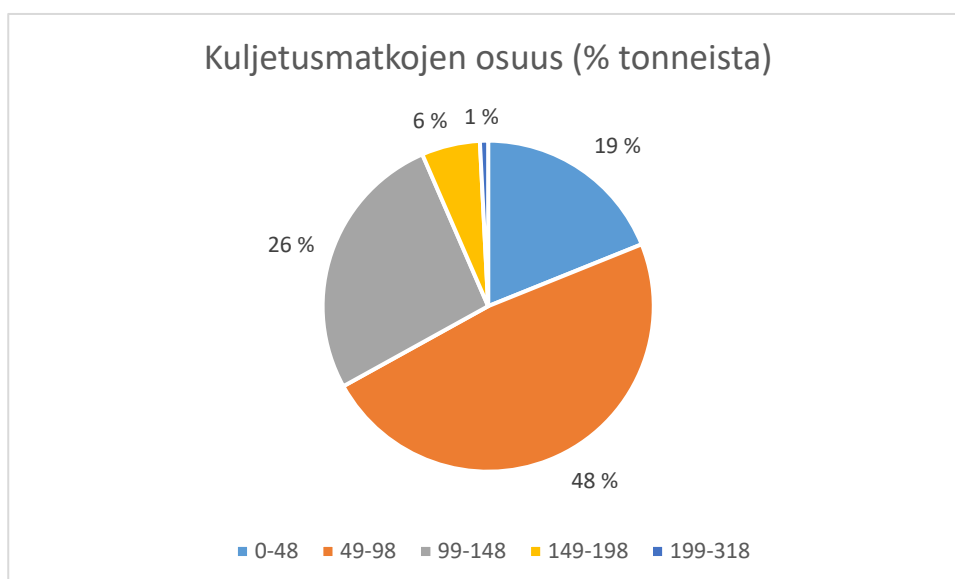


Kuva 20. Valtakunnalliset pyöreän puun kuljetuskustannukset kalustokoon mukaan (€/v, terminaaliautot, 100 km:n keskimatka). Prosenttiluku kuvaa terminaalissa maan kautta kulkevan puukuorman osuutta.

76-tonnisen osalta käytetty metsäautoa terminaaliauton sijasta (oletettu tässä, ettei kuljetusyrityksillä ole välttämättä aina kevyempiä terminaaliautoja käytössä)

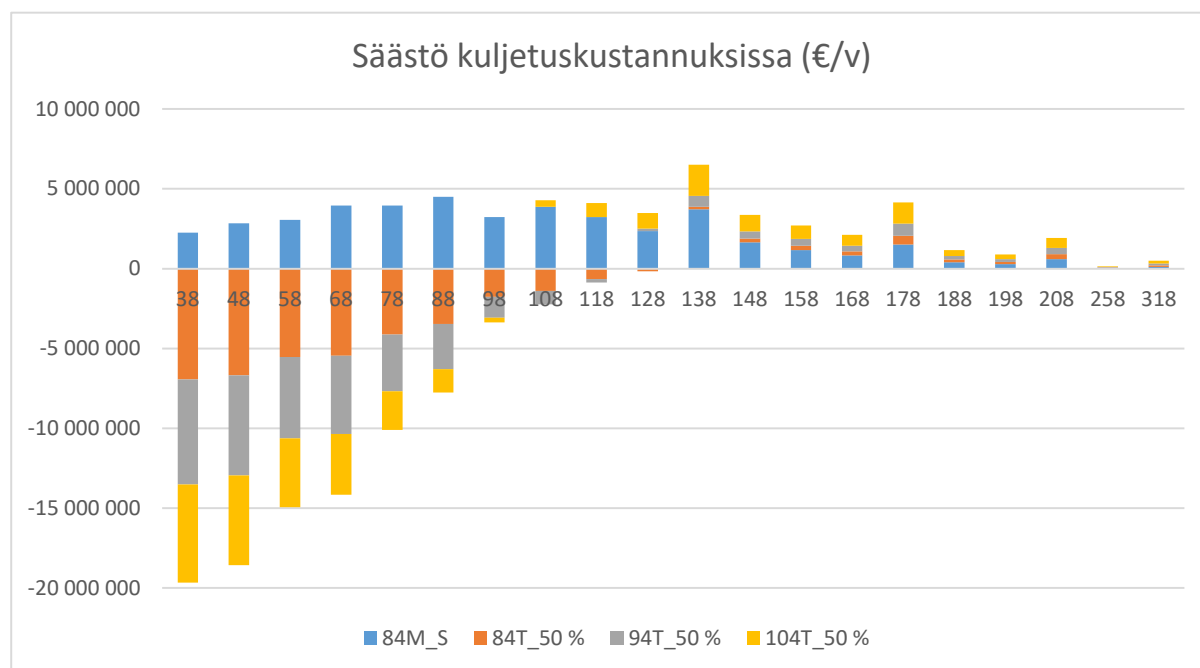
Kuljetusmatkajakauman mukainen laskelma

Puukuljetusten kuljetusmatkojen jakaumasta ei ole saatavilla tarkkaa tietoa. Tässä raportissa jakaumana on käytetty Ramboll Finland Oy:n valtakunnallisen kuljetusoptimoinnin perusteella laskettua jakaumaa, jota on korjattu niin, että keskikuljetusmatka on luvun 2.1 tilaston mukainen (kuva 21).



Kuva 21. Laskelmassa käytetty tiekuljetusvolyymien jakauma kuljetusmatkaluokittain (luokkien tarkempi jako seuraavassa kuvassa) (Ramboll Finland Oy).

Kuljetusmatkajakauman mukaan laskettuna 84-tonninen metsäauto toisi vuodessa 44 miljoonan euron vuosittaiset säästöt puutavarakuljetuksiin (kuva 22). 84-tonnisella terminaaliyhdistelmällä vuosittaiset säästöt olisivat kaksi miljoonaa, 94-tonnisella neljä miljoonaa ja 104-tonnisella kymmenen miljoonaa euroa vuodessa (kun yhdistelmää hyödynnetään vain kustannustehokkailla kuljetusmatkoilla). Laskelmassa ei ole otettu huomioon meno-paluukuljetuksia, tehtaiden välisiä siirtokuljetuksia eikä jalkalavojen hyödyntämistä. Nämä lisäisivät tässä laskettuja kustannussäästöjä.



Kuva 22. HCT-yhdistelmien tuomat säästöt eri kuljetusmatkoilla (edellisen kuvan kuljetusmatkajakauman mukaan laskettuna).

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.

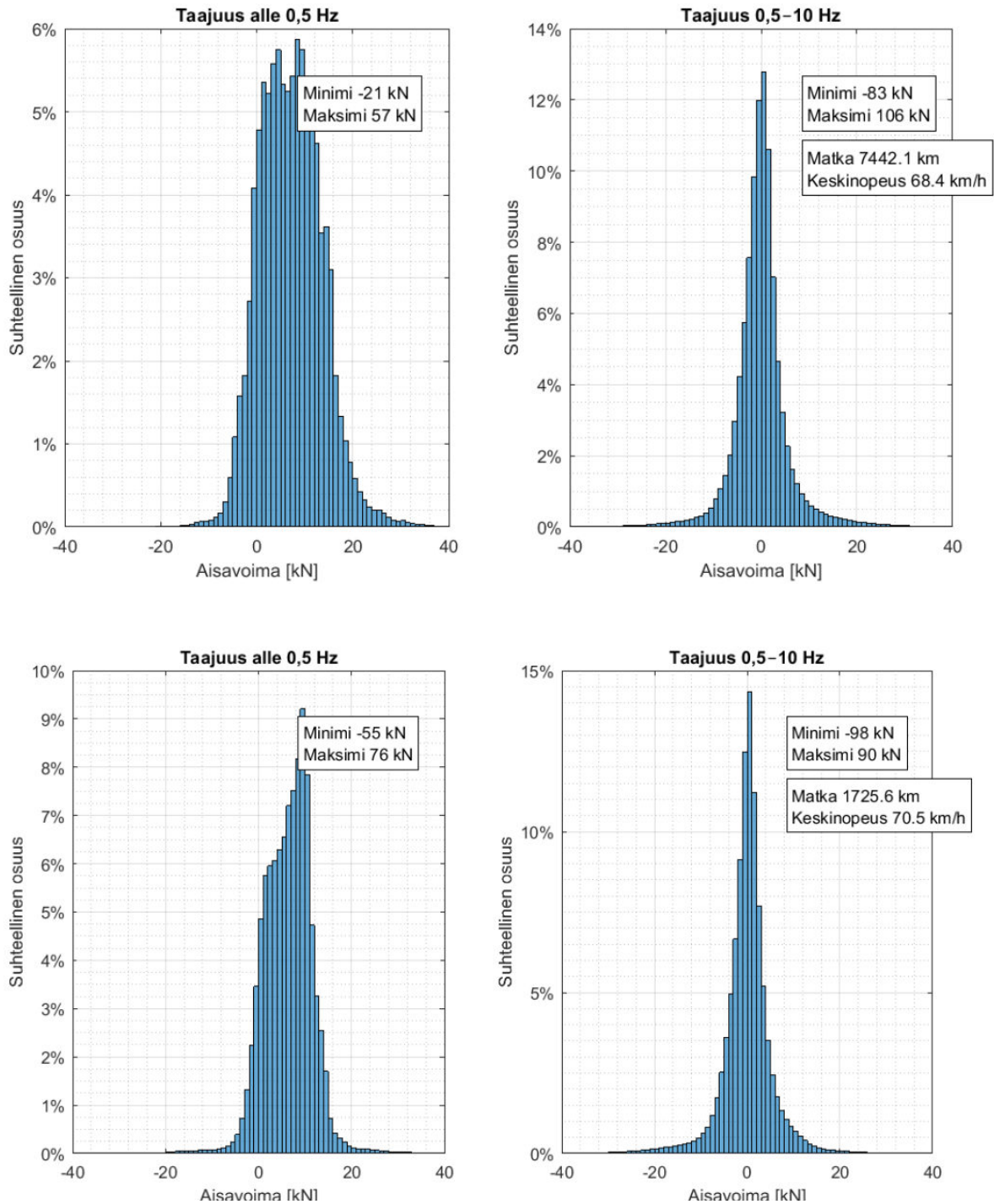
3.5.1 Vetolaitteet

Vetoajoneuvon ja hinattavan ajoneuvon välisiä kytkentöjä koskevat vaatimukset on kuvattu Traficom (2023) määräyksessä. Kytkentälaitteiden tulee olla direktiivin 94/20/EY ja E-säännön n:o 55 mukaisesti ko. massoille tyyppihyväksyttyjä. HCT-kokeiluyhdistelmien laitteet eivät ole ko. vaatimusten mukaisia (taulukko 3), mutta markkinoilla olevat laitteet ovat kehittyneet kokeiluiden aikana.

Oulun yliopisto (Pirnes ja Haataja 2018) tutki Ketosen 104-tonnisen sekä P&A Transin ja Malisen 84-tonnisten yhdistelmien perävaunujen vetoaisoihin kohdistuneita voimia. Vertailukohteenä oli 76-tonninen yhdistelmä. Mittaus suoritettiin vetoaisoihin kiinnitettyllä

venymäliuskoilla. Lisäksi Ketosen ja P&A Transin yhdistelmiin asennettiin ajodynamiikan mitausjärjestelmät.

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 23). 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 ja Haataja 2018).

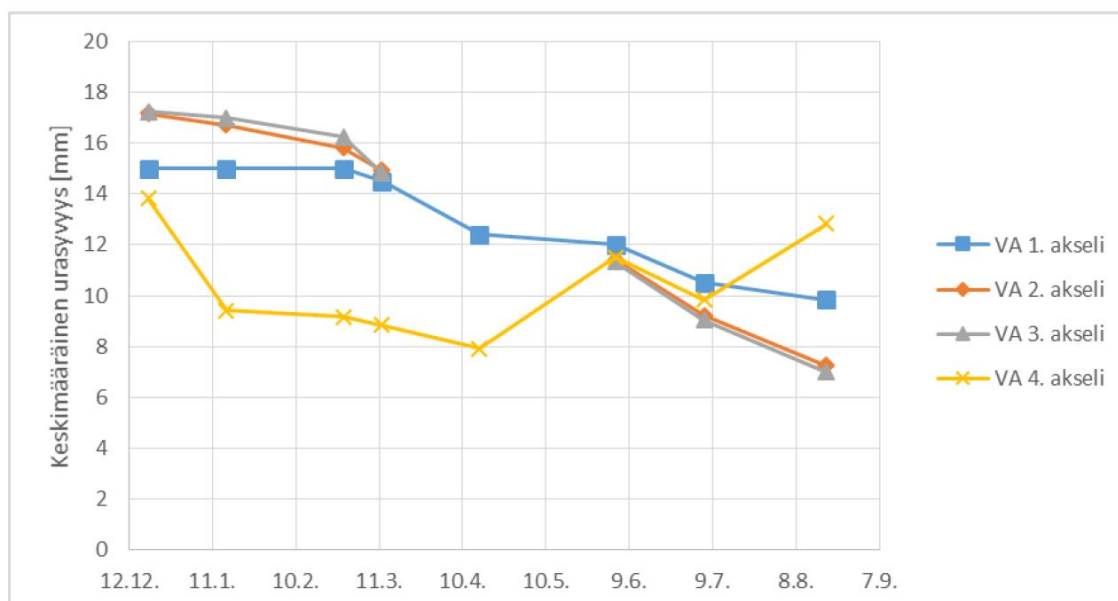


Kuva 23. Mitatut aisavoimat valta- ja kantateillä 84-tonnisella (ylempi rivi) ja 76-tonnisella (alempi rivi) yhdistelmällä (Pirnes ja Haataja 2018).

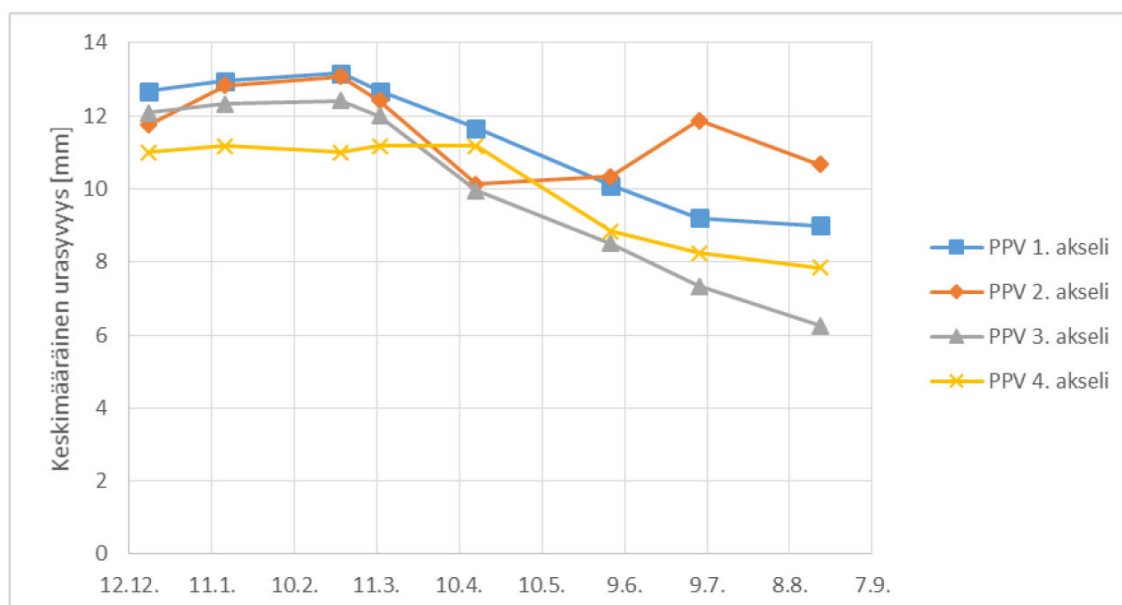
3.5.2 Renkaat

Oulun yliopisto (2016) seurasi Ketosen 104-tonnisen yhdistelmän renkaiden kulumista rengasuria mittaamalla (kuvat 24–26). 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

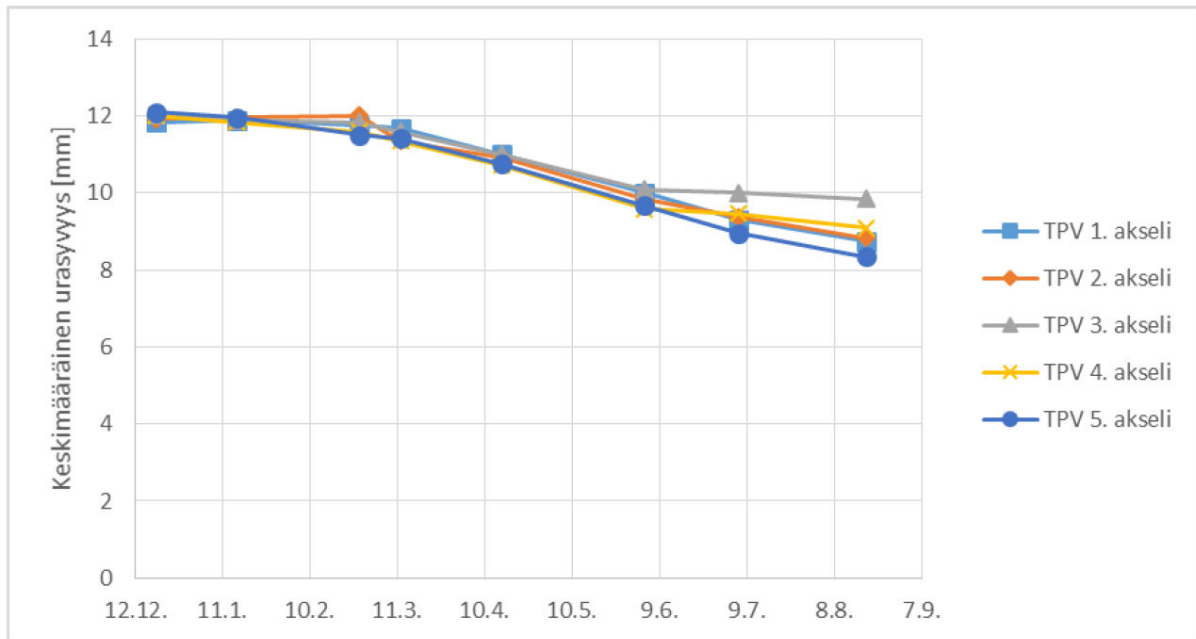
muun kokoisiin yhdistelmiin tai metsäautoihin. Tutkimusta renkaiden ja ajoneuvon muiden osien kulumisesta on tarpeen jatkaa.



Kuva 24. 104-tonnisen HCT-yhdistelmän vetoauton renkaiden urasyvyysien keskiarvo akseleittain eri mittauseroilla (Oulun yliopisto 2016). Neljännen akselin renkaat oli vaihdettu/pinoitettu kaksi kertaa. Vetävien akselien renkaat vaihdettu kerran talvirenkaista kesärenkaisiin.



Kuva 25. 104-tonnisen HCT-yhdistelmän puoliperävaunun renkaiden urasyvyysien keskiarvo akseleittain eri mittauseroilla (Oulun yliopisto 2016). Toisen akselin renkaat oli vaihdettu kerran. Renkaiden paikkaa (oikealta vasemmalle ja toisin päin) oli vaihdettu viikolla 20.



Kuva 26. 104-tonnisen HCT-yhdistelmän varsinaisen perävaunun renkaiden urasyvyyyksien keskiarvo akseleittain eri mittauskerroilla (Oulun yliopisto 2016).

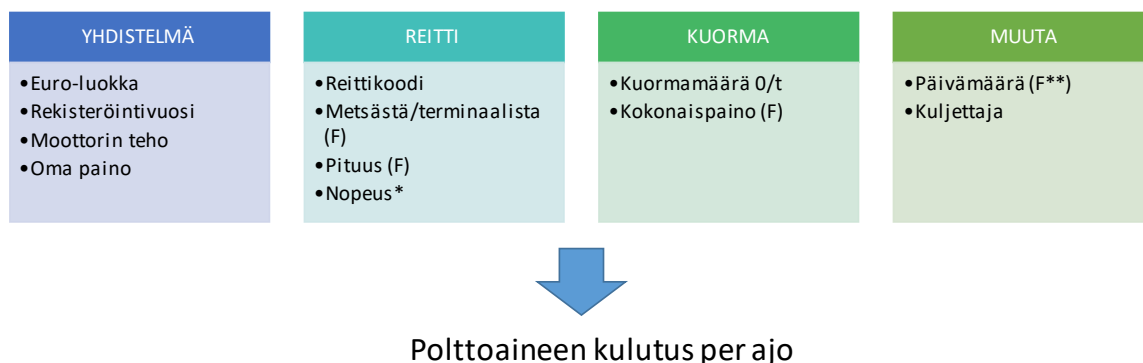
3.6 Polttoaineen kulutus ja päästöt

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.

Metsätehon HCT- ja verrokkiyhdistelmien polttoaineen kulutusfunktioiden laatimisessa hyödynnettiin ajokohtaista tietoa (ks. tarkemmin kuva 27):

- 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 27. 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. Suurimmaksi osaksi yhdistelmien tiedonkeruu toteutettiin vuoden ympäri, jotta eri ajankohtien vaikutus polttoaineen kulutukseen voitiin erotella (seurantajaksot liitteessä 3). Polttoaineen kulutustiedot ja ajonopeudet kerättiin pääosin ajoneuvojen hallintajärjestelmistä (taulukko 6).

Tässä raportissa esitetyissä funktioissa ja laskelmissa on painotettu mahdollisimman uusien yhdistelmien kulutustietoja, jotta kulutustasot vastaisivat nykytilaa. Raportin funktiot ja laskelmat eivät siten kuvaa yksittäisten HCT- tai verrokkiyhdistelmien kulutustasoa, vaan ne ovat useamman yhdistelmän kulutustietojen pohjalta tehtyjä arvioita. Kulutustietoja on tarpeen jatkossakin päivittää aivan uusimpien yhdistelmien kulutusseurannalla tai simuloinneilla.

Taulukko 6. Polttoaineen kulutustietojen keräysmenetelmät.

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

*Rajapintadata on ajoneuvon CAN-väylästä saatua kulutusdataa

3.6.2 Kuljetusreitin vaikutus polttoaineen kulutukseen

Taulukossa 7 on esitetty tutkittujen HCT-yhdistelmien pääreitit. Reiteillä on merkittäviä eroja mm. maantieteellisen sijainnin, keskilähtömatkan ja eri tieluokissa⁷ ajon osuuden osalta. Kunkin ajon reitti on koodattu Metsätehon tutkimusaineistossa omaksi reitiksi. Mikäli yhdistelmällä on hyvin monia reittejä (useilta eri tienvarsivarastoilta lähtevät metsäautot), reittikoodi on muodostettu toimituskohteen ja kuljetusmatkan mukaan.

⁷ Puutavarayhdistelmien osalta tieluokkien vaikutusta polttoaineen kulutukseen on tutkittu mm. lähteissä Anttila ym. 2023 ja Palander ym. 2021

Taulukko 7. Tutkittujen HCT-yhdistelmien pääkuljetusreitit.

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

**Ei polttoaineen kulutusseurantaa tässä raportissa*

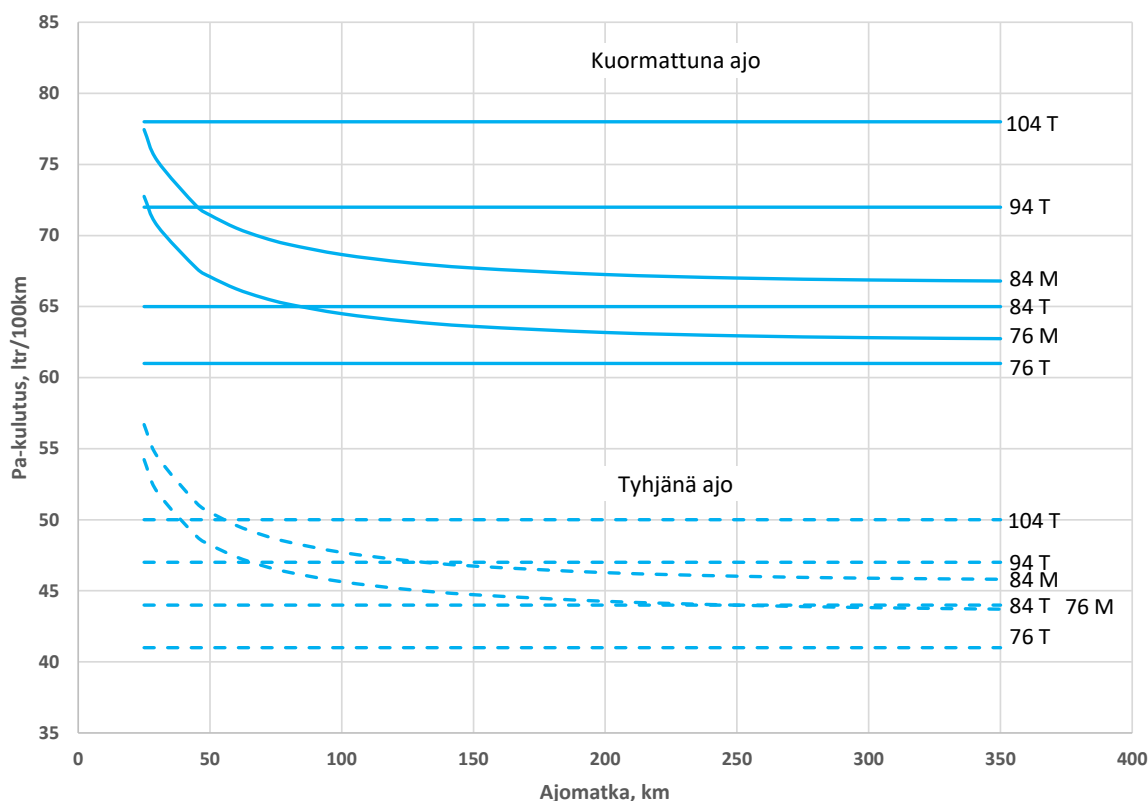
Kuljetusreittien ominaisuuksien vaikutusta polttoaineen kulutukseen on kuvattu taulukossa 8. Keskikuljetusmatkan vaikutus kulutukseen on poistettu tämän raportin laskelmissa arvioimalla kerätyn datan pohjalta polttoaineen kulutus kaikille kuljetusmatkoille.

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 lasti-tyksikköä 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	Mäketiset 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

Tämän raportin laskelmissa käytetyt puutavarayhdistelmien kulutusfunktiot 76-tonnisille ja HCT-yhdistelmille on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. Polttoaineen kulutus (litraa / 100 km) eri puutavarayhdistelmien kokoluokilla ja kuljetusmatkoilla.

Malmstedtin 92-tonnisen, terminaalien välillä ajavan puutavarayhdistelmän keskipolttokulutus oli erillisen tutkimuksen (Kärhä ym. 2023) mukaan 100 km:n kuljetusmatkoilla 72,4 l/100 km (1,12 l / per kuljetettu t) ja 300 km:n matkoilla 70,1 l/100 km (3,32 l/t). Saman tutkimuksen 76-tonnisen yhdistelmän keskipolttokulutus oli 100 km:n matkalla 1,34 litraa / kuljetettu tonni. 300 km:n matkalla 76-tonnisen kulutus oli 3,14 l/t, joka oli muista tutkimuksista poiketen vähemmän kuin HCT-yhdistelmällä. Tyhjänä 92-tonnisen yhdistelmän keskipolttokulutus 122 km:n keskimatkalla oli ilman kuormainta 44,3 l/100 km ja kuormaimen kanssa 47,5 l/100 km (Malmstedt 2024).

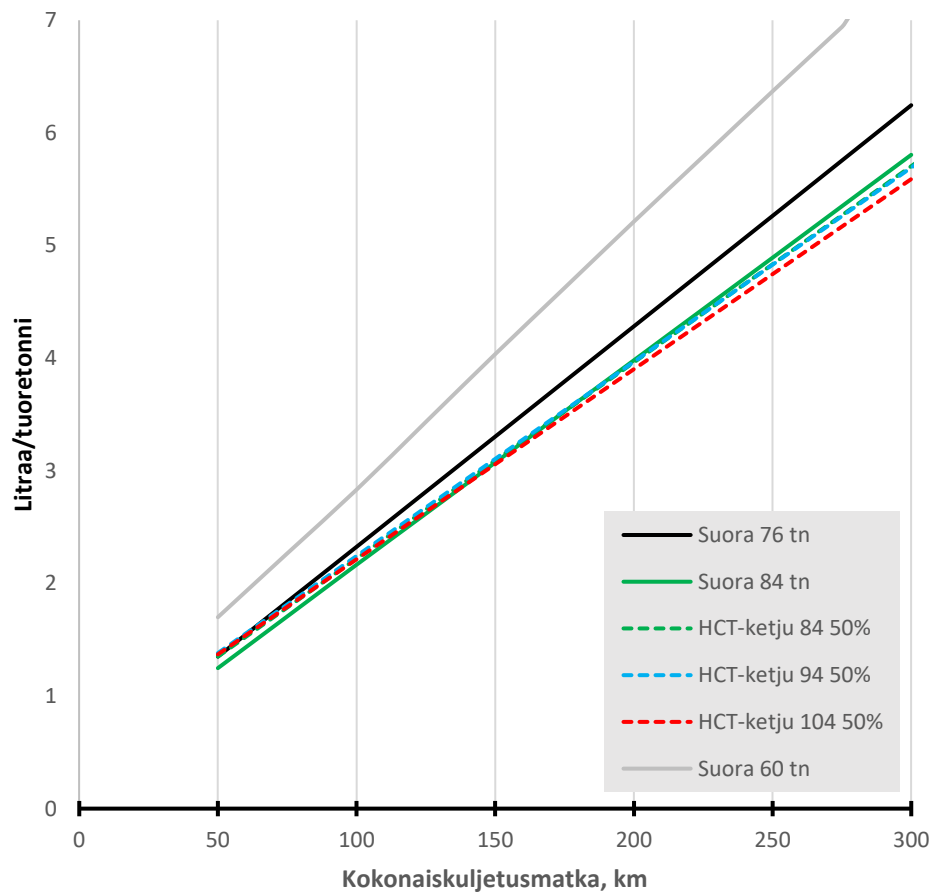
3.6.4 Kuljetusten polttoaineen kulutusvertailut

Suorien puutavarakuljetusten laskelmissa on otettu huomioon kuormaus-, ajo- ja purkuvaiheiden polttoaineen kulutus ja ketjukuljetuksissa myös siirtokuormauksen osuus polttoaineen kulutuksesta. Terminaalista eteenpäin kuljettava auto joko kuormataan kokonaan maasta (100 %), kuormataan puoliksi ja loput kuormasta tulee valmiiksi lastattuna perävaununa (50 %) tai kuorma on valmiiksi lastattu perävaunuun ja jalkalavalle (0 %). Tämän raportin vertailuissa on esitetty vain 50 %:n uudelleenkuormauksen tilanteita.

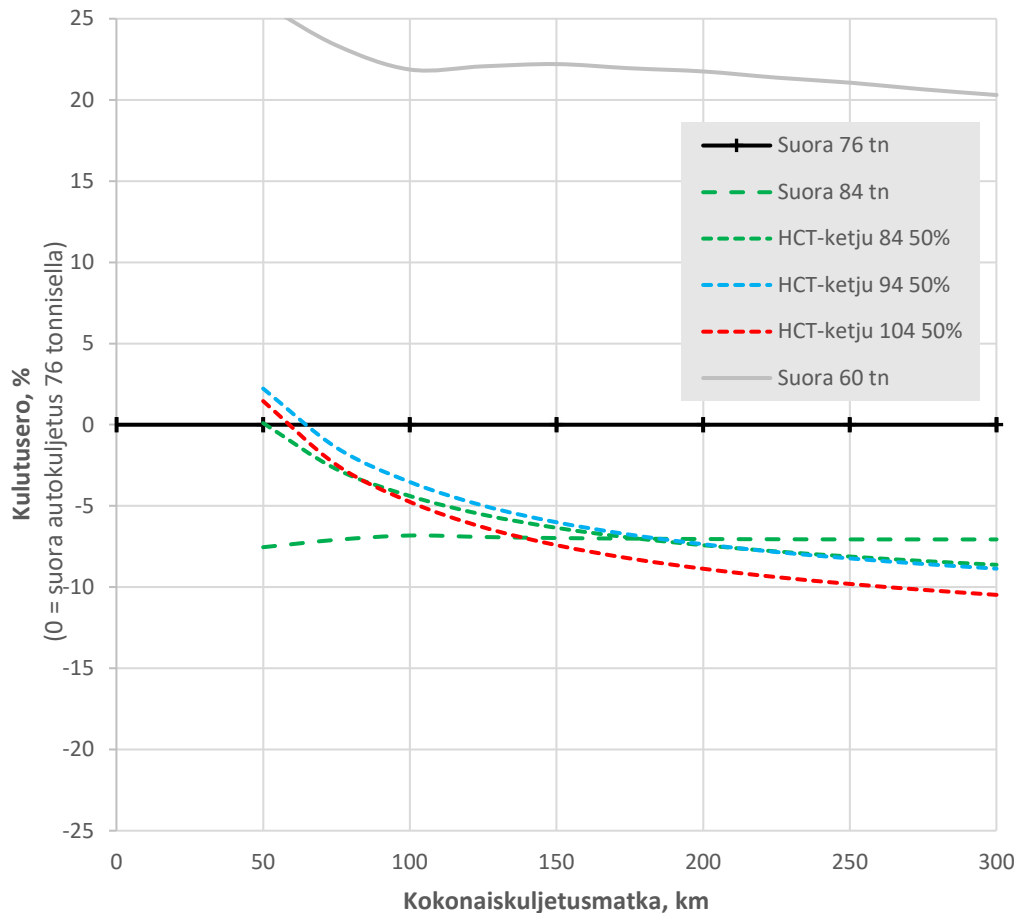
84-tonniset metsäautot tuovat 76-tonnisiin yhdistelmiin nähden noin 7 %:n säästön polttoaineen kulutuksessa tuoretonnia⁸ kohden (kuvat 29–30). Terminaalin kautta kulkevissa, vähintään 100 km:n kuljetusketjuissa 84- ja 94-tonnisen yhdistelmän tuoma säästö on 4–9 % per kuljetettu tuoretonni ja 104-tonnisella 5–11 %.

⁸ Tuoretonni = tonni pyöreää puuta tai haketta kuljetuskosteudessa

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



Kuva 29. Puutavaran kuljetusketjujen polttoaineen kulutuksen vertailut eri kuljetusmatkoilla (litraa/tuoretonni).



Kuva 30. Puutavaran kuljetusketjujen polttoaineen kulutuksen vertailut eri kuljetusmatkoilla (erotus suoraan kuljetukseen 76-tonnisella yhdistelmällä, % per kuljetettu tuoretonni).

3.6.5 Ajovastusmittauksiin ja simulointiin perustuvat kulutus- ja päästölaskelmat

Liikenneviraston (nykyisin Väylävirasto) ajovastustutkimukseen (Sauna-aho ym. 2018) osallistuivat Orpen HCT- ja verrokkiihdistelmät. Tutkimus perustui testiradoilla tehtyihin mittauksiin, joiden pohjalta simuloitiin ajoneuvojen energiankäyttö Helsinki–Oulu-reitillä ja tehtiin laskennallinen CO₂-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.

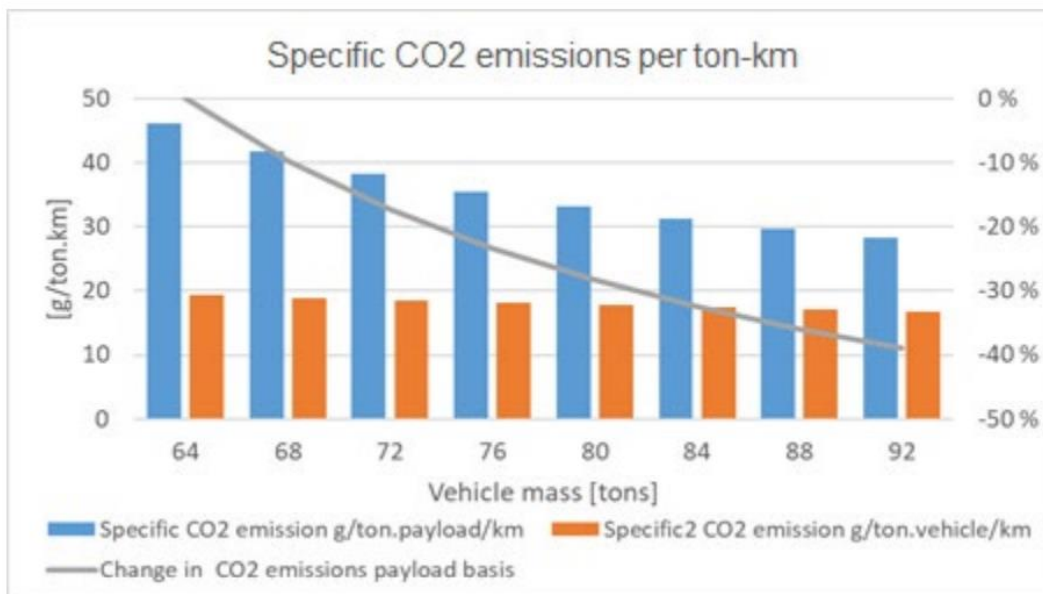
Taulukko 9. 94- ja 76-tonnisen puutavarayhdistelmän polttoaineen kulutus (Sauna-aho ym. 2018).

Yhdistelmä	Kulutus l / 100 km			Kulutus l / 100 tkm	
	Tyhjänä	Puoli-täynnä	Täynnä	Puoli-täynnä	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 ja Sauna-aho teoksessa Sauna-aho ym. 2018).

Akselit	Raakapuun irtotilavuus-massa	Kokonaismassa 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

VTT:n tutkimuksessa (Söderena ym. 2021) simuloitiin ajoneuvoyhdistelmän polttoaineen kulutusta eri kuormamäärillä. Simulointi tehtiin hyödyntäen mitattua kulutusdataa 76-tonnisesta, kappaletavaraa kuljettavasta yhdistelmästä, joka ajoi Helsinki–Oulu-väliä. Simuloinnissa yhdistelmän kokonaispaino oli välillä 64–92 tonnia. Yhdistelmän omapainoksi oli oletettu kaikilla kokonaispainoilla 37 t. Simulointitulosten mukaan 84 tonnia painavan yhdistelmän kulutus per tkm oli 12 % ja 92 tonnia painavan yhdistelmän 20 % pienempi kuin 76 tonnia painavan yhdistelmän (kuva 31). Simulointimallinnusta ei tehty puutavarayhdistelmälle.



Kuva 31. CO₂-päästöt per tkm ajoneuvoyhdistelmän kokonaispainon mukaan (Söderena ym. 2021).

3.6.6 Valtakunnalliset kulutus- ja päästölaskelmat

Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman (Ympäristöministeriö 2022) mukaan taakanjakosektorin, johon liikenne kuuluu, päästöjä tulee vähentää vuoteen 2030 mennessä noin 50 % vuoden 2005 tilanteeseen verrattuna. Ilmastolain (423/2022) mukaan liikenteen ilmastopäästöjen tulee vähentyä vuoteen 2030 mennessä vähintään 60 %, vuoteen 2040 mennessä vähintään 80 % ja vuoteen 2050 mennessä vähintään 90 % (vertailuvuoteen 1990 nähden).

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

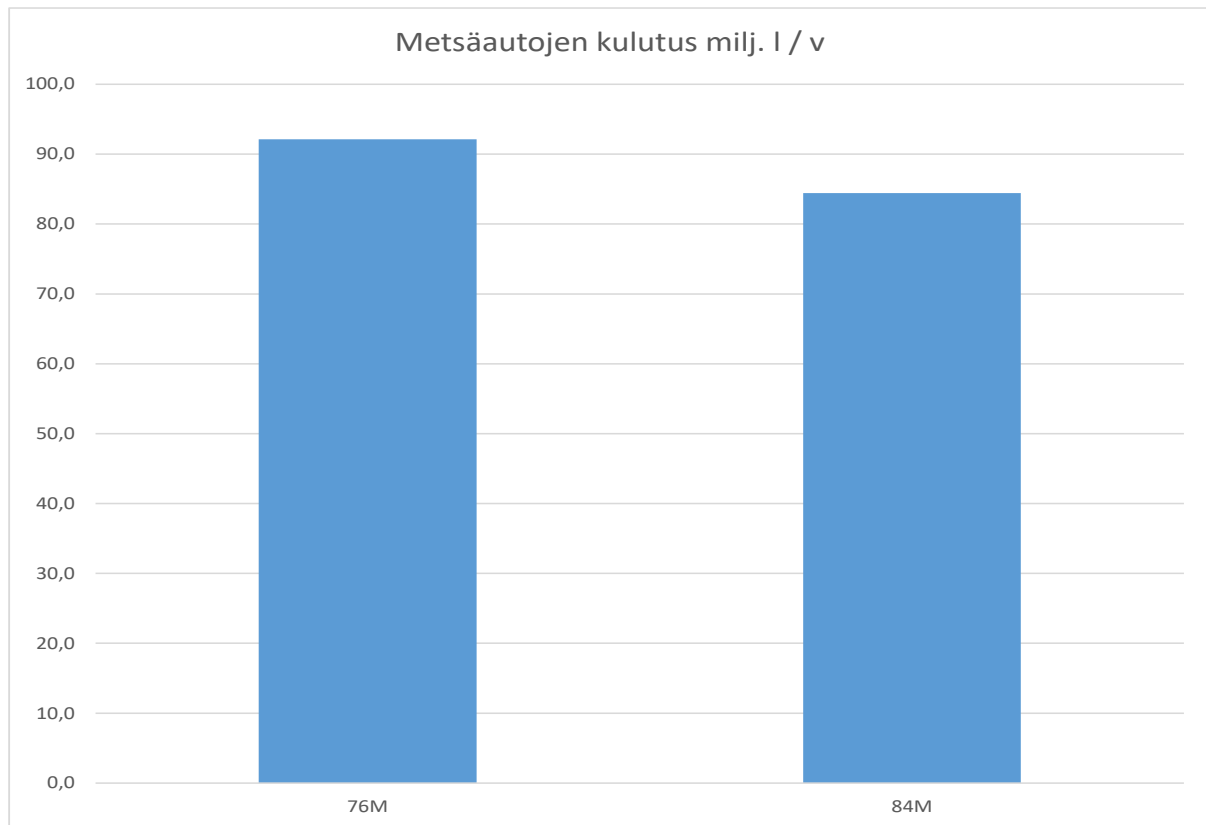
- kuljetusvolyymit ovat vuoden 2021 mukaiset (ks. taulukko 1)
- keskipitkän aikavälin matka puutavarayhdistelmillä 101 km, täysi menokuljetus ja tyhjä paluukuljetus
- ajoneuvojen kulutustasot ovat aiemmin esitettyjen Metsäteho Oy:n kulutusfunktioiden mukaiset
- polttoaineen hiilidioksidipäästökerroin on vuoden 2021 mukainen (1,9655 kg/diesellitra, ennakkotieto) (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy)
- hiilidioksidin päästökustannus on 80,5 €/päästötonni (Metsäranta ym. 2020; vuoden 2018 kustannus korotettu kertoimella 1,0457).

Laskelmat on tarpeen jatkossa päivittää ottaen huomioon aivan uusimpien yhdistelmien kulu-
tustiedot sekä dieselin ajantasainen päästökerroin ja -kustannus.

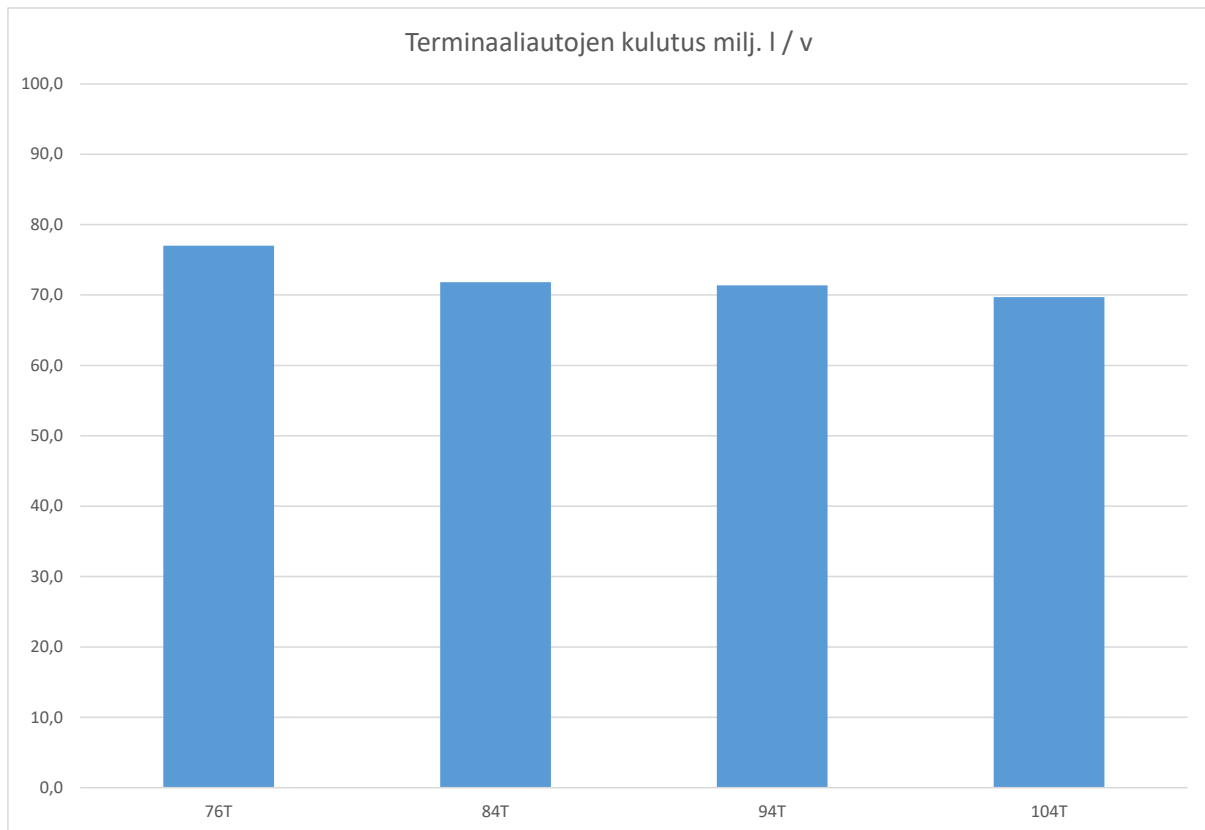
HCT-kuljetusten vaikutukset polttoaineen kulutukseen

Siirtyminen 76-tonnisista metsäautoista 84-tonnisiin puutavarayhdistelmiin vähentäisi vuodessa lähes 8 milj. litraa dieselin kulutusta (kuva 32). Pelkästään **keskimatkan** mukaan

laskettuna (ottamatta huomioon, että suuremmat HCT-yhdistelmät ovat taloudellisempia keskimääräistä pidemmällä kuljetusmatkoilla) ja ilman oletusta meno-paluukuljetuksista, 84-tonninen terminaaliauto vähentäisi polttoaineen kulutusta 4, 94-tonninen 5 ja 104-tonninen 7 milj. litraa vuodessa (kuva 33).

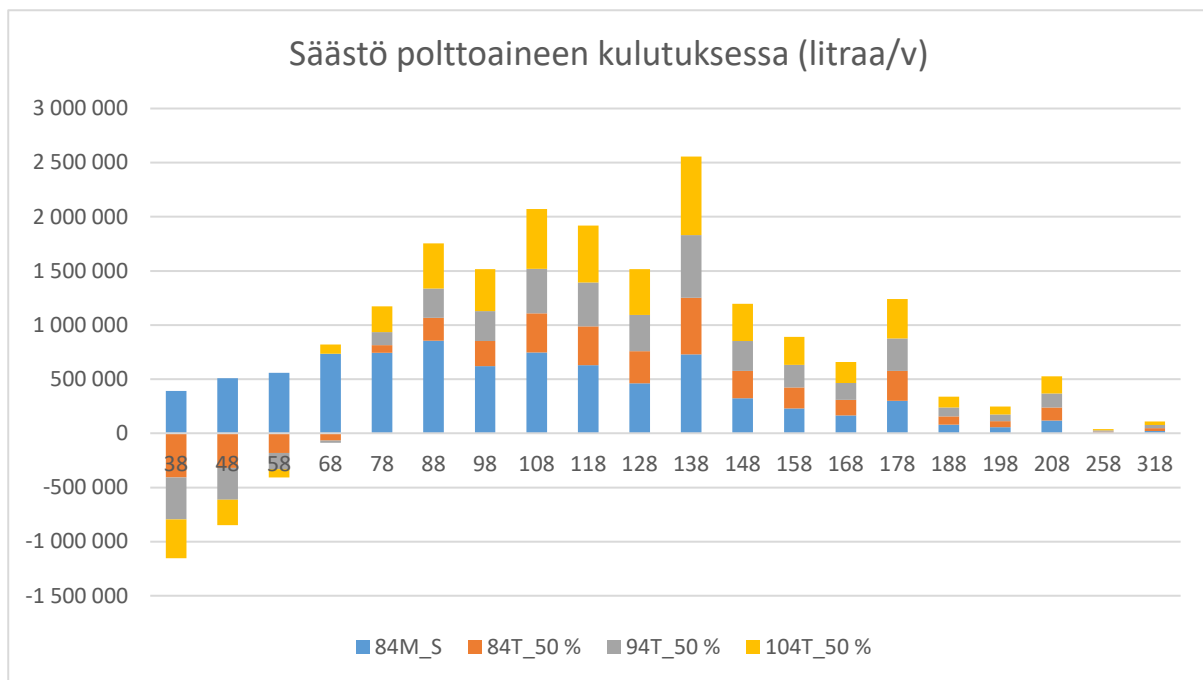


Kuva 32. Valtakunnallinen pyöreä puun kuljetusten polttoaineen kulutus kalustokoon mukaan (milj. l/v, suora kuljetus metsäautoilla tehtaalles, kuormain 4 t sisältyy omapainoon).



Kuva 33. Valtakunnallinen pyöreän puun kuljetusten polttoaineen kulutus kalustokoon mukaan (milj. l/v, terminaaliautojen kuljetusketjut).

Luvussa 3.4.3 esitetyn puutavaran **kuljetusmatkan jakaumaskenaarion** mukaan 84-tonninen metsäauto toisi vuodessa 8 milj. litran, 84-tonninen terminaaliauto 3 milj. litran, 94-tonninen terminaaliauto 4 milj. litran ja 104-tonninen 5 milj. litran polttoaineen kulutussäästön (kuva 34) verrattuna suoraan kuljetukseen 76-tonnisella metsäautolla.

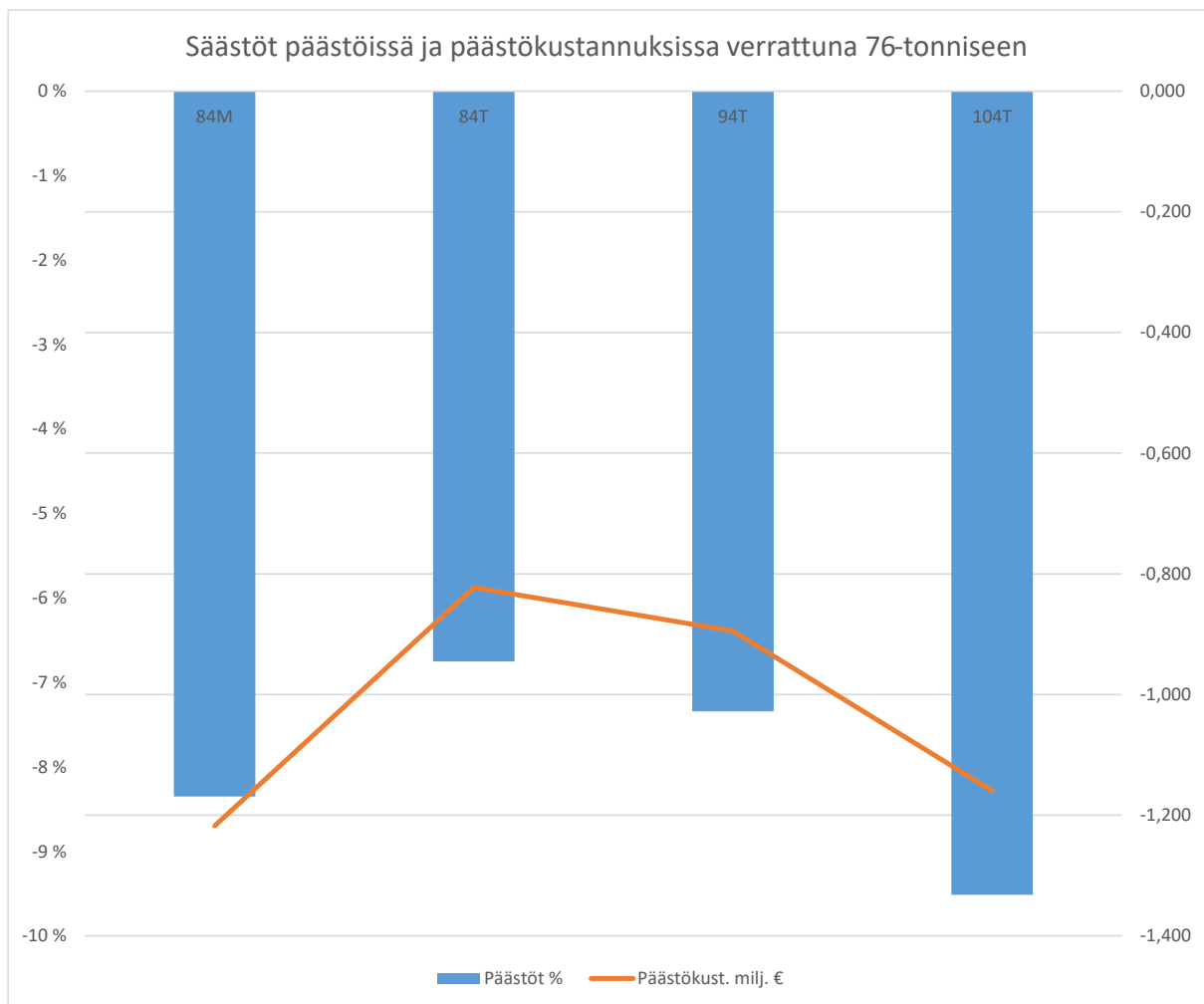


Kuva 34. HCT-yhdistelmien tuomat säästöt polttoaineen kulutuksessa eri kuljetusmatkoilla (kuljetusmatkajakauman mukaan laskettuna).

HCT-kuljetusten vaikutukset päästöihin

Kuvassa 35 on esitetty, miten paljon HCT-yhdistelmät vähentäisivät puutavarakuljetusten päästöjä 76-tonnisiin yhdistelmiin nähden. Vertailulla voi karkeasti arvioida sitä, missä määrin edellä kuvattu päästövähennystavoite vuodesta 2005 vuoteen 2030 voitaisiin puutavarakuljetuksissa saavuttaa pelkästään ajoneuvojen kokoluokkaa suurentamalla. HCT-yhdistelmillä säästettäisiin vuosittaisia puutavarakuljetusten päästöjä 7–10 % ja päästökustannuksia 0,8–1,2 milj. euroa (kuljetusten keskimatkalla laskettuna).

Päästövähennystavoitteen vertailuvuonna 2005 puutavarakuljetuksissa käytettiin 60-tonnisia yhdistelmiä, joiden polttoaineen kulutus oli Väkevän ym. 2004 tutkimuksen mukaan 56,8 l / 100 km (kun tyhjänä ajon osuus 50 %). Mikäli HCT-yhdistelmien kulutusta ja päästöjä verrattaisiin 60-tonnisiin yhdistelmiin, olisivat säästöt tässä raportissa esitettyjä laskelmia suurempia.



Kuva 35. Säästöt vuosittaisissa hiilidioksidipäästöissä (%) ja päästökustannuksissa (milj. €/v), mikäli kaikki pyöreä puu kuljetetaan ko. yhdistelmällä 76-tonnisen metsä- tai terminaaliyhdistelmän sijasta.

Eri päästövähennyskeinojen hyödyntäminen HCT-yhdistelmissä

Päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi myös raskaassa tieliikenteessä on otettu ja ollaan ottamassa käyttöön erilaisia päästövähennyskeinoja. Suurin kaasukäyttöinen ajoneuvoyhdistelmä on tällä hetkellä 75-tonninen. Ruotsissa Scanialla on käynnistynyt 80-tonnisen täyssähköisen puutavarayhdistelmän kokeilu yksityisteillä (SCA 2022). Perävaunujen sähköisillä aksелеilla voidaan helpottaa suurienkin yhdistelmien sähköistämistä. Volvolla on tulossa vetykäyttöisiä kuorma-autoja tämän vuosikymmenen lopulla.

HCT-yhdistelmissä voidaan hyödyntää biodieseliä, uusiutuvaa dieseliä ja tulevaisuudessa sähköpolttoaineita vastaavasti kuin muissakin painoluokissa. Myös kuorma-autojen moottoreita, rakenteita, materiaaleja ja aerodynaamisuutta koskevia kehitystoimia voidaan hyödyntää HCT-yhdistelmissä. Erilaisia keinoja vähentää puukuljetusten polttoaineen kulutusta ja päästöjä on tarkasteltu Metsätehon tutkimuksessa (Venäläinen ym. 2023).

Juntusen (2023) opinnäytetyössä vertailtiin 84-tonnisen HCT-yhdistelmän ja erilaisten päästövähennyskeinojen (uusiutuva diesel, dieselin biopolttoaineisuus, 69-tonniset kaasukäyttöiset yhdistelmät, aerodynaamiset ratkaisut, taloudellinen ajotapa ja kuljettajaa opastavat järjestelmät sekä teiden kunto) vaikutuksia ainespuukuljetusten päästöihin ja kustannuksiin. Normaaliin dieselkäyttöiseen puutavarayhdistelmän nähden kustannuksia vähentävät eniten HCT- ja kaasuyhdistelmät (100 km:n kuljetusmatkalla HCT-yhdistelmä 8 % kuljetettua kuutiota kohden ja kaasuyhdistelmä 3 % kuutiota kohden). Päästöjä tonnikipometriä kohden laskettuna vähentävät eniten 34 %:n bio-osuus dieselissä, rengaspaineen seurantajärjestelmä ja HCT-yhdistelmä. Tulokseen vaikuttivat ko. tutkimuksen aikaiset jakeluvälvoitetavoitteet ja päästökertoimet. Vertailulaskelmaa onkin tarpeen päivittää. Sähköisten puutavara- ja haakeyhdistelmien kustannus- ja päästövähennyslaskelmia tehdään parhaillaan Metsäteho Oy:n MESI-hankkeessa⁹.

3.7 Tie- ja siltarasisitus

3.7.1 Tiet

HCT-yhdistelmien vaikutuksia tierasisitukseen on selvitetty kenttätutkimuksena Oulun yliopiston (Pekkala 2018, Pekkala ja Haataja 2019) ja Tampereen yliopiston (Vuorimies ym. 2018, Vuorimies ym. 2019a, Vuorimies ym. 2023) koordinoimissa tutkimuksissa. Laskennallisia tarkasteluita ovat Liikenneviraston selvitys (Sauna-aho ym. 2018) ja Tampereen yliopiston laskentamallia hyödyntävä diplomityö (Isometsä 2024). Lisäksi Oulun yliopiston ja Ilmatieteen laitoksen hankkeessa (Niskanen ym. 2024) tutkittiin Winter Premium -mallia massojen noston mahdollistamiseksi routa-aikana.

HCT-yhdistelmien tierasisitusvaikutuksia on verrattu nykyisiin yhdistelmiin eritasoisilla teillä. Paksupäällysteisillä teillä isojenkaan HCT-yhdistelmien ei ole havaittu aiheuttavan merkittäviä urautumisia, tai HCT-yhdistelmien aiheuttama urautuminen oli samaa tasoa nykyisiin yhdistelmiin verrattuna. Ohutpäällysteisillä teillä urautumisvaikutusten erot vaihtelivat ja ovat paljolti kiinni tien ja yhdistelmien ominaisuuksista. Aivan ohuimmin rakennetuilla ja heikoilla pohjamailla sijaitsevilla teillä HCT-yhdistelmät aiheuttivat enemmän urasyvyyksien kasvua kuin nykyiset yhdistelmät. Sorateillä eri tutkimusten tulokset poikkesivat jossain määrin toisistaan

⁹ MESI-hankkeen internetsivu <https://www.metsateho.fi/mesi-metsayhtioiden-autokuljetusten-sahkoistaminen/>

(johtuen myös yhdistelmien eri akselimääristä). Ohutpäälysteisten teiden osalta yhdistelmien urautumisvaikutuksia on alettu vertaamaan myös mallintamalla. Metsäsektorin tavoitteena on ns. tyyppiyhdistelmien (eli vain kokonaismassan osalta nykysääntelystä poikkeavien yhdistelmien) määrittely. Määrittelyn osana tulisi tutkia myös tyyppiyhdistelmien tierasitusvaikutukset.

3.7.1.1 Kenttäkokeiden tulokset

Kenttäkokeisiin perustuvia tierasitustutkimuksia on tehty valtion päälystetyillä ja sorateilla sekä yksityisillä sorateilla. Taulukossa 13 on esitetty **yhteenveto** mittauksiin perustuneista tierasitustutkimuksista (osa tutkimustuloksista on koostettu myös raportteihin Vuorimies ym. 2019b ja Knuuti ja Sirvio 2024). Osassa tutkimustuloksia on otettava huomioon, että tutkimusten toteutuksen ulkoiset häiriöt vaikuttivat tulosten luotettavuuteen.

Taulukko 13. Yhteenvedo urautumistutkimuksista. Tutkimusten toteutustavoissa oli eroja, joten tulokset eivät ole täysin keskenään vertailtavia. Osassa tutkimuksia on otettava huomioon, että tutkimusten toteutuksen ulkoiset häiriöt vaikuttivat tulosten luotettavuuteen.

Tutkimus	PAKSUPÄÄLLYSTEISET TIET		OHUTPÄÄLLYSTEISET TIET			SORATIED	
TAU1	Karstula (200 mm)		Kyyjärvi* (30–40 mm)			-	
	Ei merkittävää urautumista 7- eikä 2*7-akselisella		2*7-akselisella suuremmat urasyvytydet kuin 9-akselisella				
TAU2	-		Simo (110 mm)**	Kyyjärvi (30–40 mm)**		Ranua***	
			Ei eroja urasyvytyksissä	2*7-akselisella urat kasvoivat, 7-akselisella ei vaikutusta		2*7-akselisella suuremmat urasyvytydet kuin 7-akselisella	
TAU3	-		Karstula Turve (30–60 mm)	Karstula Siltti/savi (10–60 mm)	Karstula Kantava 10-50 mm	-	
			Ero 75- ja 92-tonnisen yhdistelmän eduksi vaihtui tutkimuspäivän mukaan (oikean uran ja akselin keskikohdan korkeuseron kumulatiivisessa kasvussa kokonaismassan tonnia kohden)		92-tonnisella pienempi uran kasvu per t kuin 75 tonnisella		
OY1	Vuojärvi (900 MPa)	Rovaniemi (290 MPa)	Vuotso (190 MPa)			Ylikiiminki (100 MPa)	Kuhmo (79 MPa)
	7-, 10- ja 13-akselisilla urasyvytyksissä ei voitu osoittaa eroja	Ei mitattu urasyvytyksiä	7-, 10- ja 13-akselisilla urasyvytyksissä ei voitu osoittaa eroja			10-akselisen ”kuoppa”suhteessa hyötykuormaan 1,8–2,9-kertainen verrattuna 7-akseliseen	10-akselisen ”kuoppa”suhteessa hyötykuormaan 0,8–0,9-kertainen verrattuna 9-akseliseen
OY2	-		-			Jaatila, Rovaniemi (150 MPa)	Jaatila, Rovaniemi (100 MPa)
						****	****

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

Nykyisen Väyläviraston ohjeessa (Liikennevirasto 2018) luokitellaan **valtion** päällystetyt tiet taulukon 14 ja soratiet taulukon 15 mukaisesti. Valtion tieverkko (78 000 km) jakaantuu eri tieluokkiin seuraavasti: valtatiet 11 %, kantatiet 6 %, seututiet 17 %, yhdystiet 65 % ja lauttavälit 0,08 % (Tilastokeskus 2024b). Valtion päällystämättömiä teitä on 27 000 km. Kuntien katuverkko on 26 000 km, joka koostuu sekä päällystetyistä että sorateistä. (Väylävirasto 2024). Toteutetut tierasitustutkimukset ovat kohdistuneet eri tasoisille teille.

Taulukko 14. Valtion päällystettyjen teiden kuormitusluokat ja kantavuustavoitteet (Liikennevirasto 2018) sekä suoritettut tierasitustutkimukset.

Kuormitusluokka (milj. akselia vuodessa)	Päällystekerrosten kokonaispaksuus (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) TAU3: Karstula (turvepohjamaa)
0,3	40	130–170	TAU1: Kyyjärvi (yhdystie) TAU 3: Karstula ("kivennäismaapohja")
SILLAT	80		TAU4: Useita kohteita laskennallisessa tarkastelussa
PUTKISILLAT	ko. tien mukaan		-

**Kantavuuden mukaan*

Taulukko 15. Valtion sorateiden kantavuustavoitteet ja suoritettut tierasitustutkimukset (Liikennevirasto 2018).

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 16). Yksityisen tieverkon kattavuus on 350 000 km. Verkko koostuu pääosin päällystämättömistä sorateista. Tierasitustutkimukset ovat kohdistuneet korkeimpien luokkien metsäteihin.

Taulukko 16. Metsäteiden päällysrakenneluokat, tavoitekantavuudet ja suoritettut 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	-

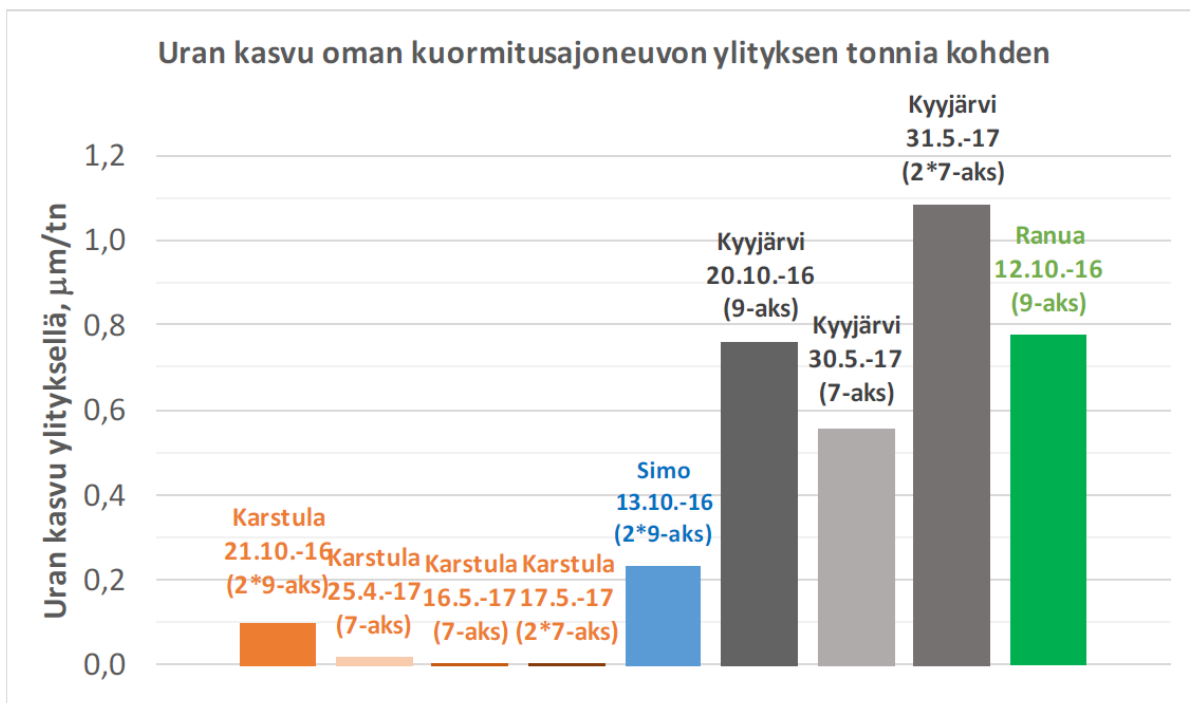
Yksityisteiden nykyisistä kantavuuksista on vain rajoitetusti tietoa saatavilla. Maalaji tien alueella antaa karkean kuvan tien peruskantavuudesta (taulukko 17). GTK:n tarkempi maalajiaineisto on saatavissa vasta puolesta tarkastelun aineistosta.

Taulukko 17. Eri maalajien kantavuus ja osuus yksityisillä sorateilla (heikoin maalaji 100 metrin tieosuudella) (Strandström 2017a, Arbonaut Oy:n ja Metsäteho Oy:n laskelma).

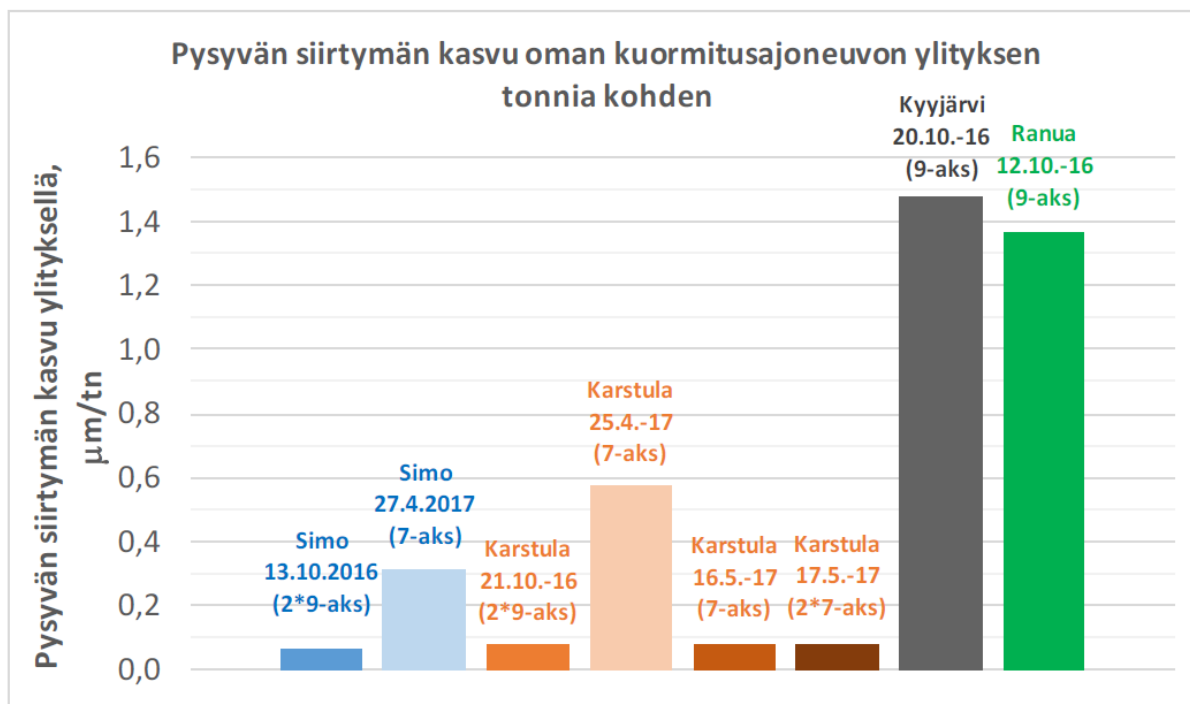
Maalaji	Kantavuus (MN/m ²)	Osuus % (1:200 000 aineisto)	Osuus % (1:20 000 aineisto)
Kallio	300	18	5
Sora	200 (150–280)	0	0
Soramoreeni	100 (70–150)	0	0
Hiekka	50 (35–70)	-	6
Hiekkamoreeni	20 (15–35)	0	24
Siltti/Silttimooreeni/ Savi	10 (5–15)	14	12
Lieju/Turve	5	10	3
Sekalajitteiset	Vaihtelee	58	0
Kartoittamaton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

Tampereen yliopiston ensimmäisessä tutkimusraportissa (Vuorimies ym. 2018) esitettiin tulokset vuosien 2015–2017 tierasitustutkimuksista (kuvat 36–37). ”HCT-yhdistelmänä” käytettiin kahta peräkkäin ajavaa 7- tai 9-akselista yhdistelmää, joiden toisistaan poikkeavat ajo-
linjat vaikuttivat paljon urasyvyyskseen (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 36. Urakasvut kuormitusajoneuvon massa suhteutettuna (Vuorimies ym. 2018). Muun liikenteen aiheuttaman tien häiriintymisen takia Simon tutkimus toistettiin toisessa tutkimuksessa.



Kuva 37. Pysyvien siirtymien kasvu kuormitusajoneuvon massa 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 ohutpäälysteisellä (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, päälysteen 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 pitäneekä paikkansa kantavilla pohjamailla sijaitsevilla päälystetyillä teillä sekä paksupäälysteisillä teillä, joiden päälysteen paksuus on yli 200 mm. Tällöin 9–14-akseliset yhdistelmät eivät todennäköisesti aiheuta enempää urautumista kuin 7-akselisetkaan yhdistelmät.

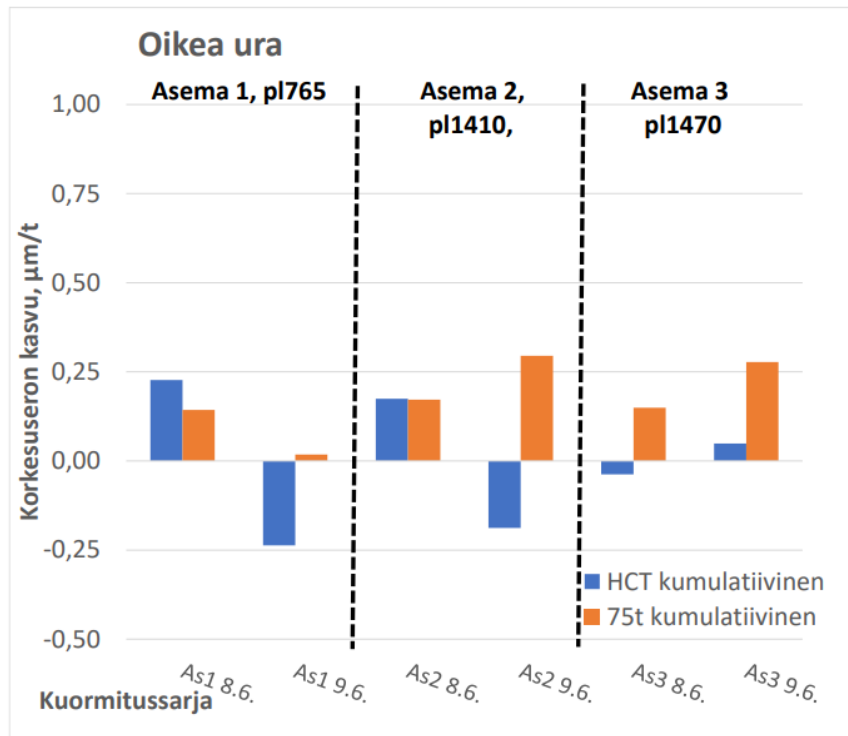
Tampereen yliopiston kolmannessa tutkimuksessa (Vuorimies ym. 2023) tutkittiin ohutpäälysteisen tien urautumista ja kosteustilan muutoksia 75- ja 92-tonnisilla puutavarayhdistelmillä. Tutkimus kohdistui Karstulassa sijaitsevan maantien 697 kolmeen poikkileikkaukseen, joista ensimmäinen oli paksulla turvealueella, toinen hienorakenteisella, siltti/savipohjaisella pohjamaalla ja kolmas kantavammalla pohjamaalla. Tutkimuksessa tarkasteltiin tien urautumiskehitystä laserkeilauksella ja kosteustilan muutoksia maatutkauksella. Mittaustuloksia häiritsti jossain määrin tutkimuksen aikainen viereisen kaistan liikenne.

Erot 75- ja 92-tonnisen yhdistelmän urautumisvaikutuksissa olivat pääosin vähäiset (kuvio 38, jossa vaikutukset on suhteutettu yhdistelmien massoihin). Syynä tässä arveltiin osin olevan 92-tonnisen alemmat keskimääräiset akselipainot suuremmasta akselimäärästä johtuen sekä 75-tonnisen selvästi suuremmat vetävien akselien massat ja vetävien akselien kapeammat renkaat. Varsinkin kantavimmalla pohjamaalla erot yhdistelmien vaikutusten välillä jäivät mitaustarkkuuden rajoitusten takia todentamatta.

Tien urautumiskehityksessä havaittiin puolestaan selviä eroja pohjamaan mukaan. Turvepohjamaalla vaikutukset olivat selvästi suuremmalla kuin kahdessa muun pohjamaan tapauksessa. Turvepohjamaalla havaittiin myös kummallakin yhdistelmällä ns. pumppautumisilmiötä, jossa palautuvat pystysiirtymät kasvavat suhteessa akselimassaan kuormitusten määrän noustessa. Kyseissä kohteissa ilmiön ei kuitenkaan havaittu aiheuttavan tierakenteen kosteuspitoisuuden muutosta.

Tämän ja aiempien tutkimustulosten pohjalta tutkijat toteavat, että tierasituksia tulisi tarkastella tierakenteen kokonaisjäykkyyden (päälysteen ja tierakenteen paksuus ja pohjamaan kantavuus) kannalta. Lyhytkestoisissa tierasitustutkimuksissa kantava pohjamaa hidastaa ohutpäälysteisenkin tien vaurioitumista. Toisaalta turvepohjamaallakin tierakenteen urautuminen voidaan havaita vähäiseksi, jos päälyste on tarpeeksi paksu ja tierakenne järeä.

Urasyvyyden maksimimuutosta mitattiin laserkeilauksella. Urasyvyyden muutokset näin mitattuna olivat hyvin pieniä ja menetelmän mittaustarkkuuden rajoissa.



Kuvio 38. Kuormitussarjasta kumulatiivisesti kertynyt oikean uran ja akselin keskikohdan korkeusero kuormitusajoneuvojen kokonaismassan tonnia kohden (Vuorimies ym. 2023)

Tutkimuksen tulosten analysointia vaikeuttivat eniten yhdistelmien ajourien vaihtelut sekä yhdistelmien erot mm. rengastuksissa ja akselimassoissa. Ensimmäiseen haasteeseen ratkaisuna voisi olla automaattinen kuorma-auto, jolla ajolinjat saataisiin pysymään vakiona. Toiseen haasteeseen ratkaisuna olisi HCT-yhdistelmä, joka toimisi myös 76-tonnisen verrokkina perävaunun poistamisen tai vaihtamisen myötä. Tämän tutkimuksen aineistoa ja tuloksia on hyödynnetty tierasitusten laskentamallin kehittämisessä (ks. tarkemmin luku 3.7.1.2).

Oulun yliopiston (Pekkala 2018) ensimmäisen tierasitustutkimuksessa 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 urasyvyysmuutosten 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 ollut merkittävää eroa.

Tien pinnan hetkelliset venymät/puristumat ("kuopan" tilavuus)

"Kuopan" tilavuus pääosin kasvoi yhdistelmien akselien lukumäärän kasvaessa. "Kuopan" tilavuuteen vaikuttaa merkittävästi myös ajonopeus, koska hitaasti ajattaessa rasitusajan kesto pitenee. Päälystetyillä 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 (taulukko 18).

Taulukko 18. Kuoppa suhteessa hyötykuormaan (Pekkala 2018)

Tutkittu tie	Yhdistelmien väliset erot
Vuojärvi (900 mm päällyste)	13- ja 10-akselisilla 0,7–0,8; 7-akseliseen verrattuna
Vuotso (190 mm päällyste)	13-akselisella 0,8–0,9; 7-akseliseen verrattuna 10-akselisella 0,9; 7-akseliseen verrattuna
Ylikiiminki (100 mm soratie)	10-akselisella 1,8–2,9; 7-akseliseen verrattuna
Kuhmo (79 mm soratie)	10-akselisella 0,8–0,9; 9-akseliseen verrattuna

Taulukkoon 19 on koottu tuloksia **Oulun yliopiston toisesta tierasitustutkimuksesta** (Pekkala ja 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 19. Yhteenveto Oulun yliopiston toisen tierasitustutkimuksen tuloksista Jaatilassa (tietyyppien perässä osuuden kantavuus (MN/m²) ja tutkimusajoneuvojen akselien lukumäärät ko. tutkimuskohteessa) (Pekkala ja 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 yhteenlas- ketulla nettokuor- malla)*	7-akselisella 1,5 mm, 9-akseli- sella 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 syn- tyvän harjanteen mittaamista. Näiden mittausten tuloksia ei kuiten- kaan pidetty ko. menetelmillä toteutettuna tarpeeksi luotettavina.	

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

3.7.1.2 Laskennallisten tarkasteluiden tulokset

AASHO-teorian mukaisissa laskelmissa verrattiin eri kokoisten yhdistelmien kuormaa yhdistelmien ekvivalenttiakseleita¹⁰ 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 20). Laskennallisesti 3+4+5-akselisen ja 94-tonnisen puutavarayhdistelmän tierasitus on 74 % 77-tonnisen tierasituksesta. 12-akselisella ja 100-tonnisella puutavarayhdistelmällä hyötykuormaan suhteutettu tierasitus kasvaa 76-tonniseen verrattuna, jos puun irtotilavuusmassa on alle 300 kg/m³ (taulukko 21). Tätä painavammalla puulla tierasitus vähenee 76-tonniseen verrattuna. (Sauna-aho ym. 2018).

Taulukko 20. Tiekuormituksen määräytyminen puutavarayhdistelmien ominaisuuksien mukaan (Sauna-aho ym. 2018).

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

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

Taulukko 21. Puutavarayhdistelmien tiekuormitus raakapuun irtotilavuusmassan mukaan (Koskinen ja Sauna-aho teoksessa Sauna-aho ym. 2018).

Raakapuun irtotilavuusmassa kg/m ³	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

Tierasitusten laskentamallityössä (Isometsä 2024) hyödynnettiin edellä kuvatun Tampereen yliopiston kolmannen tierasitustutkimuksen oletuksia ja tuloksia. HCT-yhdistelmien mallinnus koski Karstulan ohutpääällysteisen tien hienorakenteisen pohjamaan osuutta sekä 75- ja 92-tonnisia yhdistelmiä.

Suurimmat vaikutukset yhdistelmillä oli asfaltin alapinnan vetomuodonmuutoksiin ja kantavan kerroksen deviatorisiin muodonmuutoksiin (tulokset tarkemmin taulukossa 22). Asfaltin alapinnan vetomuodonmuutoksissa yhdistelmien välinen ero oli pieni. Kantavan kerroksen deviatorinen muodonmuutostila oli kummallakin yhdistelmällä melko suuri. 92-tonnisella yhdistelmällä tien vaurioitumisriskejä 75-tonniseen verrattuna nostavat:

- viimeinen yksikköpyöräakseli, jolla suurehko akselimassa
- suurempi kolmiakselisten telien lukumäärä (18 % suurempi kuormitus kuin kaksiakselisilla telillä)
- kolmeakselisen telin kaksi yksikköpyörällä varusteltua akselia.

Taulukko 22. 75- ja 92-tonnisen yhdistelmän mallinnetut vaikutukset ohutpäällysteisellä tiellä, jolla on hienorakenteinen pohjamaa (Isometsä 2024).

Kuormitusvaste	Tulokset
Asfalttipäällysteen alapinnan vetomuodonmuutos	- Molemmilla noin 550–600 $\mu\text{m}/\text{m}$ venymä (merkittävä) - Huippuarvo 75-tonnisen yhdistelmän akseleilla 3 ja 4 (joilla huomattavan korkeat akselimassat) - Keskimääräinen arvo yhdistelmillä lähes sama
Pohjamaan pystysuuntainen puristusmuodonmuutos (1,4 m:n syvyys)	- Kummallakin huippuarvot noin 350–400 $\mu\text{m}/\text{m}$ (pieni/keskinkertainen), 75-tonnisella kolmannen ja neljännen akselin korkeat akselimassat vaikuttavat tulokseen. - Yhdistelmien oikea puoli korostuu tien sivukaltevuudesta johtuvan suuremman pyöräkuorman vuoksi
Kantavan kerroksen yläosan pystyjännitystila (0,18 m:n syvyys)	- 75-tonnisella 160–300 kPa, 92-tonnisella 160–250 kPa - 92-tonnisella kuitenkin 300–350 kPa:n pystyjännityspiikit ensimmäisellä ja viimeisellä akselilla (niiden yksikköpyörillä on 20 % suuremmat akselimassat kuin 75-tonnisen yksikköpyörillä)
Kantavan kerroksen ja alusrakenteen deviatorinen muodonmuutostila (0,05–0,43 ja 0,90–1,10 m:n syvyys)	- Keskimääräinen arvo kummallakin alle 1 000 $\mu\text{m}/\text{m}$:n rajan, joka kriittinen plastisten muodonmuutosten nopealle kertymiselle. - 92-tonnisella varsinkin viimeisen yksikköpyöräakselin arvo lähellä 1 000 $\mu\text{m}/\text{m}$. - Kantavassa kerroksessa kummallakin huippuarvo jopa 1 900–2 000 $\mu\text{m}/\text{m}$, mutta keskiarvoinen arvo kuvaa koko kerroksen tilaa paremmin. - Alusrakenteessa normalisoitu muodonmuutos noin 50 % pienempi kuin kantavassa kerroksessa.

Kehitetty laskentamalli on staattinen eikä se pysty ottamaan huomioon useiden akselien vaikutusten kertymää. Dynaamisella mallilla voitaisiin ottaa huomioon mm. akselien välien pituuksia ja vaikutusten kertymistä. Myös renkaiden leveyksiä olisi tarpeen ottaa tarkemmin huomioon. Työn mallilla lasketut tulokset erosivat AASHTO-teorialla lasketuista ekvivalenttikertomista. AASHTO-teoria ei todennäköisesti pidä paikkansa ohutpäällysteisillä asfaltiteillä. Mallinnustulosten pohjalta ohutpäällysteisen tien urautumisriskiä voidaan eniten pienentää paksummalla asfalttipäällysteellä tai yhdistelmän paripyöräakseleilla.

Työn pohjalta on käynnistynyt jatkotutkimus, jossa hyödynnetään kehitettyä laskentamenetelyä myös kahden muun HCT-yhdistelmän urautumisvaikutusten arviointiin. Jatkotutkimus valmistuu loppuvuodesta 2024. Tavoitteena on, että erilaisia HCT-yhdistelmiä voisi verrata mallintamalla keskenään ja 76-tonnisiin yhdistelmiin ilman työläitä kenttätutkimuksia.

3.7.1.3 Winter Premium -toimintamallin tutkimus

Oulun yliopiston ja Ilmatieteen laitoksen Winter Premium -hankkeessa (Niskanen ym. 2024) tutkittiin toimintamallia, jossa tiestön painorajoituksia nostettaisiin tiestön ollessa roudassa. Vastaavia toimintamalleja on käytössä eräissä muissa maissa.

Tutkimuksessa selvitettiin asfalttitien (vt 5 Sodankylässä) ja soratien (Javarus Kemijärvellä) roudan ja kantavuuden kehittymistä jatkuvatoimisilla mittauksilla:

- Perco-aseman avulla tierakenteen jäätymis- ja sulamistilanne
- Ilmatieteen laitoksen ja erikseen asennettujen sääasemien avulla mm. lämpötilan kehittymistä
- Routaputkiloiden avulla tierakenteen lämpötilan ja siten roudan syvyyden etenemistä 0–20 cm:n syvyydessä.

Tutkimukseen osallistuivat 76-, 84- ja 85-tonniset puutavarayhdistelmät.

Routa-ajan kantavuus

Talviolosuhteissa sekä päällystetyn että soratien kantavuus kasvaa moninkertaiseksi kesäaikaan verrattuna (taulukko 23).

Taulukko 23. Tutkimusteiden kantavuus (MPa) kesällä ja talvella (keskiarvo mittaussuoran matkalla) (Niskanen ym. 2024).

Ajankohta	Sodankylä (päällystetty tie)	Javarus (soratie)
Kesä	337	198
Talvi	13 528	7 306

Routa-ajan tierasitustutkimukset maanpainemittausten pohjalta

Eri kokoisten yhdistelmien vaikutusta tierakenteeseen tutkittiin teihin asennetuilla maanpainantureilla. Antureiden avulla saatiin myös eroteltua tulokset yhdistelmän akselimäärän mukaan. Tierakennevaikutusta arvioitiin yhdistelmän aiheuttaman painekuopan tilavuudella ja sitä verrattiin tierakenteen jäätyamisen tilanteeseen. Tuloksissa kiinnitettiin erityisesti huomiota tilanteisiin, joissa tie oli jäänyt vähintään 30–40 cm:n syvyyteen asti eikä tien pinta ollut sulanut vastaavalle syvyydelle. Sodankylässä tutkimustie jäätynyt ko. syvyyteen lokakuun 2021 loppupuolella. Tien pinta sulanut hetkellisesti ko. syvyyteen maaliskuun lopulla ja pysyvästi huhtikuun puolivälissä. Vuoden 2022 lopulla tie jäätynyt pysyvästi ko. syvyyteen (ilman että tien pinta oli samaan aikaan sulanut samaan syvyyteen) marraskuun alkupuolella.

Maanpainekuopan tilavuus pieneni em. ajanjaksona selvästi sekä 9- että 10-akselisilla yhdistelmillä (liite 4). Tilavuus puolestaan kasvoi nopeasti kevään edetessä. Tuloksiin ei ollut yhdistettävissä yhdistelmien painotietoja, joten 10-akselisen tuloksissa oli vain painavia puulasteja kuljettaneen yhdistelmän tiedot, kun taas 9-akselisilla on voitu kuljettaa hyvin eripainoisia lasteja. Myöskään ajoneuvojen ajolinjoja ei voitu seurata. Tästä syystä yhdistelmien välisiä eroja on vaikea arvioida.

Routa-ajan määrittäminen

Tutkimuksessa selvitettiin erilaisia tietolähteitä routa-ajan ja siten tien mahdollisen painorajoituksen nostamisen määrittämiseksi. Tien jäätymistä voi seurata lämpösummien, routamittausten perusteella määritettävän routakartaston avulla tai kantavuusmittauksilla. Haasteita roudan määrittämiseen tuovat syksy- ja kevätjaksot, jolloin tien vuorottainen jäätyminen ja sulaminen on tyypillistä. Winter Premium -mallista saisiikin suuremman hyödyn, jos sen voisi toteuttaa dynaamisesti lyhyenkin ajanjakson tilanteet huomioon ottaen. Tutkimuksessa ei arvioitu routa-ajan sallimaa painorajoituksen nostoa, vaan se vaatisi erillisen mallinnustyön.

Omana erillistarkastelunaan Winter Premium -hankkeessa oli ajoneuvosta kerättävän datan analysointi (Pirnes ym. 2023). Tutkimusajoneuvoihin kiinnitettiin liiketila-anturit, ja ajoneuvosta kerättiin kiihtyvyydestietoja ja Fleet Management System (FMS) -järjestelmän tuottamia tietoja. Vuodenaikaisvaihtelua havaittiin varsinkin etuakselin pystykiihtyvyyden tuloksissa. Vaihtelu oli selvempää tyhjiällä kuin kuormatuilla yhdistelmillä. Vaihtelut olivat lämpötilariippuvaisia, mutta niiden pohjalta ei pystynyt tulkitsemaan Winter Premium -mallin edellyttämään tien jäätymistä. Ajoneuvodatan hyödyntämiseksi on tarpeen jatkotutkimus, jossa mm. otetaan tarkemmin huomioon ajoneuvon nopeudet ja massat.

Ilmatieteen laitoksen osiossa (Sukuvaara ym. 2023) analysoitiin tietoja, joita kerättiin Winter Premium -hankkeen ulkopuolisiin ajoneuvoyhdistelmiin jo asennetuilla antureilla ja kameroilla sekä hankkeen omiin tutkimusteihin asennetuilla antureilla. Hankkeen aikana kerätty

havaintoaineisto ei ollut kuitenkaan riittävä tiekohtaisen kelirikkomallin selväksi kehittämiseksi. Ilmatieteen laitos jatkaa sorateiden tiesäämallin kehittämistä muiden hankkeiden yhteydessä.

3.7.1.4 Kirjallisuus- ja haastatteluselvityksen tulokset

HCT-yhdistelmien tievaikutusten kirjallisuus- ja haastatteluselvityksessä (Knuuti ja Sirvio 2024) tierasituksille herkkiksi kohteiksi mainittiin tiedot, joissa:

- päällyste on alle 150 mm
- pohjamaana on turve tai pehmeä savi (sulan maan aikaiset vaikutukset)
- pohjamaan on siltti tai hieno hiekka roudan sulamisen aikana
- tie tai sen piennar on kapea
- on tietyt risteys- tai liikenneympyrätilanteet
- soratie on toteutettu huonosti.

Selvityksessä on esitetty osa luvun 3.7.1.1 tutkimusten tuloksista sekä tuloksia eräistä ulkoilla tehdyistä tutkimuksista. Selvityksessä on esitetty myös haastatteluiden perusteella ajoneuvojen vaikutuksia tiestön kuntoon, mutta niistä ei käy aina selvästi ilmi, millaisista yhdistelmistä ja tiestön osista kulloinkin puhutaan. Selvityksessä esitetään massojen noston arviointia varten tieverkon ongelmakohtien tunnistamista, tarvittavien toimenpiteiden ja niiden kustannusten arviointia sekä tieosien pitkäaikaisten tierasitustutkimusten käynnistämistä. Selvitys esittää HCT-reittien toimintamalleiksi a) sallittujen reittien heikkojen kohteiden tunnistamista ja korjaamista tai b) tiestön mahdollisen nopeamman vaurioitumisen sallimista ja tien rappeutumismallin hyödyntämistä toimenpideajankohtien määrittämisessä. Nykyisestä infrastruktuurista tulisi selvittää HCT-yhdistelmille soveltuvat tiedot (päällysteiden paksuus ja pohjamaan laatu) sekä risteysten ja liikenneympyröiden soveltuvuus.

3.7.2 Keinoja vaikuttaa tierasitukseen

Tierasitusten vähentämiseen on erilaisia keinoja, joita voidaan tuki hyödyntää jo nykyisen kohteissa yhdistelmissä.

Olosuhteiden mukaan dynaamisesti vaihtuvat tien painorajoitukset

Oulun yliopisto ja Ilmatieteen laitoksen Winter Premium -hankkeessa¹¹ tutkittiin ajoneuvojen painojen noston mahdollisuuksia teiden ollessa roudassa (ks. tarkemmin luku 3.7.1.3). Winter Premium -malli yhdistettynä HCT-käytäviin mahdollistaisi sen, että routa-ajan ulkopuolella HCT-yhdistelmät ajaisivat vain erikseen määritellyillä HCT-käytävillä ja vain routa-aikana käytävien ulkopuolella.

Kuljetuskelpoisuusluokitus

Metsäsektorin kuljetusten suunnitteluun on tavoitteena saada korjuukelpoisuusluokitusta vastaava työkalu, joka paikkatietojen, tien rakentamistietojen ja säätiöiden pohjalta arvioisi yksittäisten sorateiden kuljetuskelpoisuutta eri ajankohtina (mm. Solonen ym. 2024). Työkalua hyödyntämällä kunkin alueen kuljetuksia voitaisiin paremmin kohdentaa niille ajanjaksoille, jolloin riski tien rikkoutumiseen on pieni. Työkalun kehittäminen on vielä kesken.

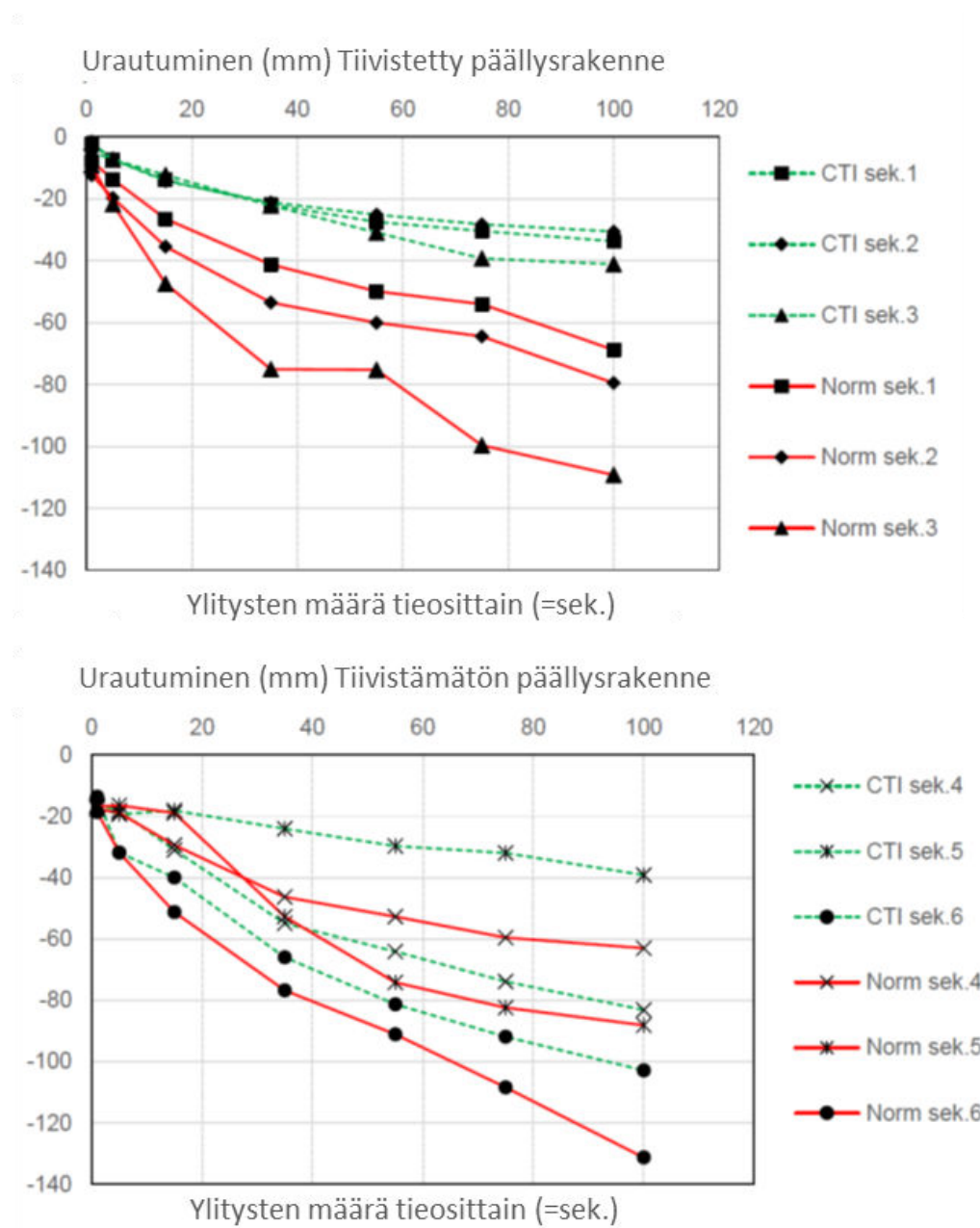
¹² TIESIT-hankkeen terminaaliosion internetsivu <https://www.metsakeskus.fi/fi/energiapuuterminaaliselvitys>

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 3.8.3). Jotta terminaaleja ja kuormauspaikkoja voidaan hyödyntää puulogistiikassa joustavasti, tulisi tieto käytössä olevista terminaaleista olla helposti saatavissa. Puuterminalien sijainteja kartoitetaan parhaillaan Suomen metsäkeskuksen TIE-SIT-hankkeessa.

Rengaspaineiden säätöjärjestelmät (Central Tire Inflation System, CTI)

CTI-järjestelmiä on tällä hetkellä Suomessa käytössä puutavaran kuljetuksissa (ks. tarkemmin Siekkinen ja Korpilahti 2015). Järjestelmän käyttö pienentää ajoneuvon tiehen aiheuttamia urautumia (kuva 39).



Kuva 39. Tavallisen ja CTI-järjestelmällä varustellun puutavarayhdistelmän urautumisvaikutus (Bergqvist ym. 2016).

Puutavarayhdistelmien keskipyöräperävaunu

AT Wheelsin akselistoratkaisussa puutavarayhdistelmän perävaunun kahden lisäakselin pyörät on sijoitettu akseliston keskelle (8(+2)-akselinen yhdistelmä) (kuva 40). Destian vetämässä, valtatiellä toteutetussa tutkimuksessa (Virtala ym. 2018) lisäpyörällinen ratkaisu vähensi 4 baarin maksimipaineella päällysteen tieriasitusta yhteensä 40 % ja kantavan kerroksen tieriasitusta 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 mitausolosuhteiden muuttumisen takia yhdistelmän tulokset eivät ole vertailtavissa kahden muun tutkitun yhdistelmän tuloksiin.

Oulun yliopiston (Pekkala ja Haataja 2018) tutkimuksessa soratietä ajettiin ensin 9-akselisella puutavarayhdistelmällä ja sitten keskipyöräperävaunulla varustetulla yhdistelmällä. Keskelle sijoitettujen pyörien ei havaittu tasoittavan jo syntyneitä uria, mutta turvepohjaisella tiellä 8(+2)-yhdistelmän tuoma lisäurautuminen jäi hyvin pieneksi (taulukko 24). Moreenipohjaisella tiellä 8(+2)-akselisen yhdistelmä urautumisvaikutus oli 9-akselista suurempi. 8(+2)-yhdistelmän vaikutusten luotettava arviointi vaatii vielä lisätutkimusta.



Kuva 40. AT Wheelsin akselistoratkaisu perävaunuun (Kuva: AT Wheels Oy).

Taulukko 24. Urakehityksen keskimääräinen kasvu (mm), kun soratietä oli ajettu ensin 9-akselisella yhdistelmällä ja sitten 8(+2)-akselisella perävaunulla (kahdessa akselissa AT Wheel-sin ratkaisu) (Pekkala ja Haataja 2019).

Tietyyppi	9-aks.	8(+2)-aks.	Yhteensä
Turve	13,0	0,5	13,5
Moreeni	2,2	5,0	7,2

Väyläviraston tutkimuksessa (Sauna-aho ja Sauna-aho 2020) tutkittiin keskipyöräperävaunun vaikutuksia tiestöön ja polttoaineen kulutukseen. Soratiellä keskipyörät tiivistivät selvästi tien keskustaa. Päälystetyillä teillä havaitut urautumismuutokset ajokertojen välillä olivat pieniä.

3.7.3 Sillat

Siltojen kestävyys HCT-yhdistelmien kannalta riippuu sillan jännepituudesta ja poikkileikkausmitoista sekä yhdistelmien ominaisuuksista (kokonaismassa ja -pituus, akseleiden ja akseliyryhmien välinen etäisyys ja massa sekä painavimpien akseleiden sijoittuminen yhdistelmässä). Varsinkin pitkillä silloilla voisi tulla tarpeelliseksi rajoittaa samanaikaisten HCT-yhdistelmien määrää. (Sauna-aho ym. 2018, Kalliovalkama 2022).

Tampereen yliopiston diplomityössä (Kalliovalkama 2022) tutkittiin laskennallisesti yhdentoista eri HCT-yhdistelmän aiheuttamaa rasitusta valituille teräsbetonisille kotelopalkkisilloille. Kootyypit on yleinen pitkien jänneiden silloissa. Vaikutusviivatarkastelussa havaittiin, että HCT-yhdistelmien aiheuttamat rasitukset eivät nouse samassa suhteessa massojen kasvun kanssa. Useissa tapauksissa HCT-yhdistelmien aiheuttamat rasitukset olivat yli 10 % suuremmat kuin

76-tonnisen kuormakaaviossa (varsinkin maksimi vääntömomentti pitkällä silloilla; taulukko 25). Joissakin tapauksissa erot HCT-yhdistelmän ja vertailukaavion välillä olivat kuitenkin hyvin pienet (pienimmillään 84-tonnisilla ja lyhyillä silloilla).

Taulukko 25. Laskennallinen ero HCT-yhdistelmien ja AA13/76:n mukaisen kuormakaavion aiheuttamissa siltarasituksissa vääntömomentin osalta (Kalliovalkama 2022)

	Vääntömom max		Vääntömom min	
	Pitkä silta	Lyhyt silta	Pitkä silta	Lyhyt silta
T100	17,1 %	2,4 %	9,1 %	-10,6 %
H100	12,4 %	-4,4 %	1,7 %	2,9 %
T92	10,9 %	-1,4 %	0,3 %	-5,9 %
H91	18,4 %	9,0 %	11,6 %	8,1 %
T90	13,3 %	1,0 %	8,9 %	6,6 %
H90	14,2 %	-0,1 %	8,9 %	6,0 %
M85	9,2 %	-2,7 %	4,2 %	1,5 %
M84C	7,0 %	3,7 %	3,9 %	2,5 %
M84D	8,5 %	5,3 %	5,3 %	3,9 %
H84	4,6 %	-0,1 %	0,0 %	-1,9 %
T84	4,0 %	-5,9 %	3,8 %	2,5 %

Punaisella merkitty yli 7,5 %:n erotukset ja vihreällä alle 2,5 %:n erotukset.

Työssä tehtiin myös erillinen kuormituslaskelma 91-tonniselle haakeyhdistelmälle ja 84-tonniselle puutavarayhdistelmälle 84D, jolla oli suurimmat siltarasituserot AA13/76:n kuormakaavioon verrattuna (ks. taulukko 25). Lisätarkastelussa lyhyttä ja pitkää siltaa kuormitettiin HCT-yhdistelmillä, AA13/76:n mukaisella kuormalla ja 4,5 kN/m³:n pintakuormalla. Rasituksissa silloille ja taipumissa siltojen palkeille 94-tonnisen ero 84-tonniseen vaihteli välillä -1–3 %. 84-tonnisen ero 76-tonniseen nähden vaihteli välillä -5–3 %. 91-tonnisen ero 76-tonniseen nähden vaihteli välillä -4–6 %. Suurimmat erot HCT-yhdistelmillä 76-tonniseen nähden oli pidemmän, kolmikoteloisen sillan vääntömomentissa.

Työn loppuun laadittiin ehdotus siltojen koekuormituksista, joilla voitaisiin varmentaa ja täydentää laskennallisia tuloksia. Laskelmissa ei pystytty ottamaan huomioon mm. siltojen mahdollisia jälkijännityksiä. Väylävirastolla on parhaillaan käynnissä HCT-yhdistelmien siltarasitustutkimus. Siinä koekuormitetaan valittuja siltoja HCT- ja niiden verrokkiyhdistelmillä. Tutkimus on jatkoa Kalliovalkaman siltakuormitusten mallinnustyölle. Koekuormitustutkimus valmistuu kevään 2025 aikana.

Suomen metsäkeskuksen (2024) kartoituksen mukaan yksityisteillä on noin 13 000 siltaa. Katavaa tietoa siltojen kantavuuksista ei ole, mutta tieto painorajoituksista tulee lisääntymään Digiroadissa. Metsähallitus Metsätalous Oy:n omien teiden siltoja koskeneessa tutkimuksessa 85-tonnisen ja 28-metrinen HCT-yhdistelmän rasitus tyyppisillalla Ble II jäi kantavuuslaskelman mukaan pienemmäksi kuin 76-tonnisen yhdistelmän (Sweco 2020). Yksityisteiden sillat ovat yleensä lyhyitä, jolloin HCT-yhdistelmän paino ei kohdennu sille kokonaan.

Väyläviraston kirjallisuus- ja haastatteluselvityksessä (Knuuti ja Sirvio 2024) ehdotetaan HCT-yhdistelmien siltarasitusvaikutusten arvioinnin helpottamiseksi siltojen parametrisoituja mallin-
nusmenetelmiä, siltojen anturointia ja HCT-yhdistelmien vaikutusten seuranta.

Siltarasituksen vähentämisen yhtenä 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 41). Ruotsissa on testattu geoaitaamista ajoneuvoyhdistelmien nopeuksien madaltamiseksi siltoja ylitysten ajaksi (Andersson ym. 2023). Toimintamalleja, joilla voidaan vähentää painorajoitetuista silloista johtuvia rajoitteita HCT-kuljetuksille, on kuvattu seuraavassa luvussa.



Kuva 41. Jeesiöjoen sillan liikennevalot estivät muun liikennöinnin sillalla saman aikaan HCT-yhdistelmän kanssa (Kuva: Ari Siekkinen). Liikennevalot ovat nyt samassa käytössä Kitisenjoen sillalla.

3.8 HCT-käytävät ja -terminaalit

3.8.1 HCT-käytävien määrittäminen

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 26). HCT-kokeiluissa onkin ollut mukana yhdistelmiä, jotka hyödyntäisivät erilaisia HCT-käytäviä:

1. Metsästä lähtevät noin 84-tonniset yhdistelmät (Malinen, P&A Trans, Peltoniemi)
2. Rautatieterminaaleihin puuta syöttävät yhdistelmät (Ketonen)
3. Autoterminaalissa metsäautosta HCT-yhdistelmään siirrettävien puiden kuljetukset (Hannonen, Moilaspojat)

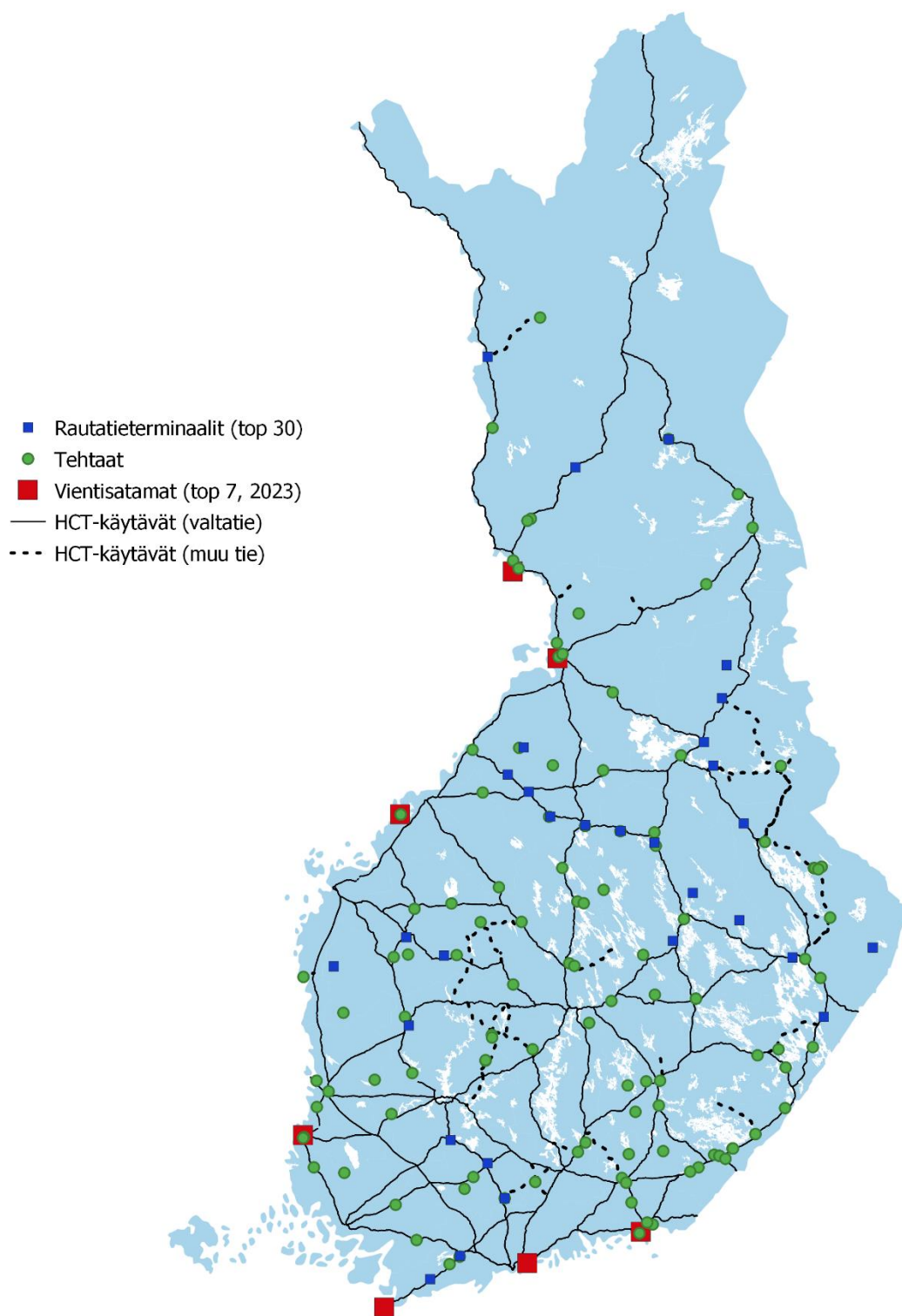
4. Sivutuotehaketta kuljettavat yhdistelmät (Huhtala, Konnekuljetus, Sammalisto, Wickström)
5. Tehtaiden välistä vaihtopuuta kuljettavat yhdistelmät (Malmstedt, Orpe).

Taulukko 26. 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 siltarastitutkimus tulee tarkentamaan tätä kriteeriä*

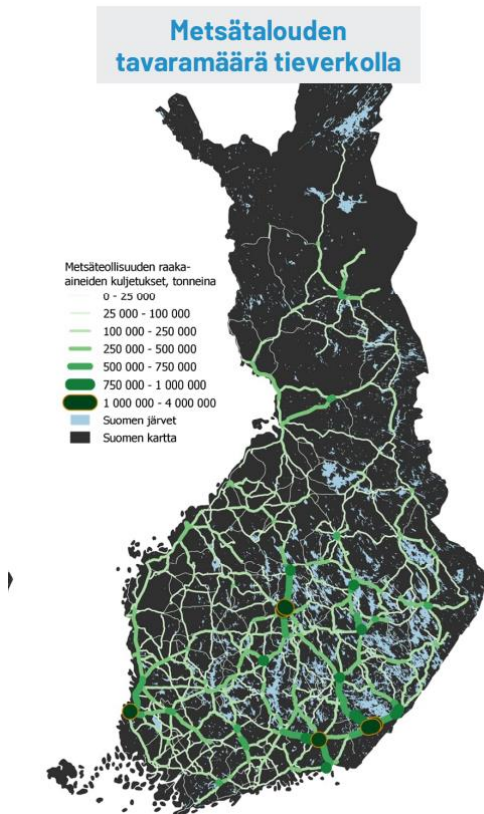
Metsäteollisuus ry:n jäsenkyselyssä ja Metsäteho Oy:n osakaskyselyssä metsäyhtiöt ovat alustavasti tunnistaneet tarpeita HCT-yhdistelmien kuljetuskäytäviksi (kuva 42). Käytäviin sisältyisivät kaikki valtatie ja eräät muut keskeiset yhteydet tuotantolaitoksiin. Lisäksi käytäviä olisi mahdollisuus ulottaa metsäyhtiöiden omille yksityisteille, jotka ovat suoraan yhteydessä valtion tieverkkoon. Kartassa on esitetty myös keskeiset metsäsektorin vientisatamat ja juna-kuljetusten raakapuuterminaalit. HCT-yhdistelmiä on hyödynnetty osana multimodaaleja kuljetusketjuja. HCT-reittiehdotuksia ei ole verrattu ko. yhteyksien tie- ja siltainfrastruktuurin tasoon (siltojen tarkat kantavuustiedot eivät ole julkisia tietoja).



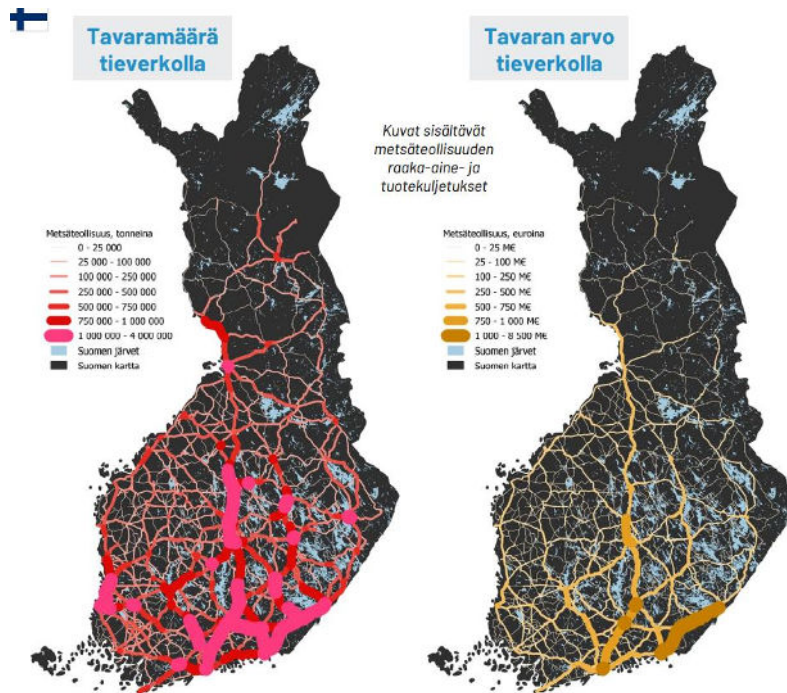
Kuva 42. Alustavasti ehdotettuja HCT-käytäviä raakapuun, sivutuotehakkeen ja sahatavaran kuljetuksiin (Metsäteollisuus ry:n ja Metsäteho Oy:n kyselyt metsäyhtiöille). Lisäksi maksimissaan 84-tonnisille on ehdotettu tässä esitettyä laajempaa verkkoa (tarvittaessa vain olosuhteiden salliessa tai vain metsäyhtiöiden omilla yksityisteillä). Karttaa tullaan päivittämään käynnissä olevien selvitysten pohjalta.

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).

Metsäteollisuuden raaka-aine- ja tuotekuljetusvirrat tieverkolla on esitetty kuvissa 43–44 (kuvat perustuvat tilastoaineistoihin, jotka ovat osin puutteelliset). Merkittäviä kuljetusvirtoja kohdistuu sekä tuotantolaitoksiin että rautateiden kuormauspaikoille.



Kuva 43. Metsäteollisuuden raaka-aineiden kuljetukset tieverkolla (Tilastokeskus lähteessä Infra ry ym. 2022).



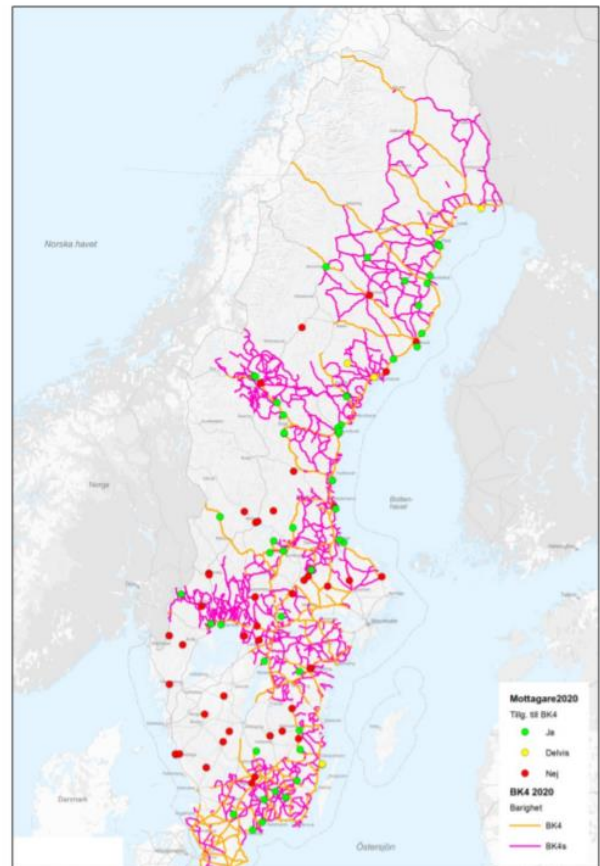
Kuva 44. Metsäteollisuuden raaka-aine- ja tuotekuljetukset tieverkolla (Tilastokeskus läh- teessä Infra ry ym. 2022).

HCT-käytävät Ruotsissa

Ruotsissa 74-tonnisille ajoneuvoyhdistel- mille on vuodesta 2018 lähtien ollut käy- tössä BK4-tieverkko. Verkko sisältää val- tion teitä ja kuntien katuverkkoa. Yksityistiet sisältyvät verkkoon niiltä osin, kuin teille ei ole erikseen asetettu painorajoitusta.

Vuoden 2026 lopulla BK4-verkon on tarkoi- tus kattaa 63 % Ruotsin raskaan liikenteen strategisesta tieverkosta. Alueellista verkon toteutussuunnitelmaa (mm. Trafikverket 2024) päivitetään ja seurataan vuosittain. Verkon laajentuminen riippuu Ruotsin par- lamentissa tehdyistä infrastruktuurin inves- tointipäätöksistä. Vuonna 2029 verkon on tarkoitus kattaa 70–80 % raskaan liiken- teen strategisesta tieverkosta. BK4-verkon ajantasainen tilanne löytyy Trafikverketin karttapalvelusta (NVDB på webb).

Skogforskin mallinnuksen (Hofsten ym 2021) mukaan vuoden 2020 lopulla Ruotsin puukuljetusvolyymista 55 %:lla oli pääsy BK4-verkkoon (ks. kuva 45).



Kuva 45. Ruotsin metsäteollisuuden tuotantolai- tokset ja terminaalit sekä BK4-verkko vuoden 2020 lopulla (Hofsten ym 2021).

3.8.2 Yhdistelmien joustava käyttö HCT-käytäväverkolla

Metsäteho Oy:n haastattelututkimuksessa (Venäläinen ja Poikela 2021) selvitettiin kuljetus- ja metsäyhtiöiltä sekä laitevalmistajilta näkemyksiä siitä, miten yli 76-tonnisia HCT-yhdistelmiä voitaisiin hyödyntää rajoitetullakin HCT-käytäväverkolla. Keskeisinä keinoina haastatteluissa mainittiin:

- HCT-metsäautolla ajaminen alkumatkan ajan 76-tonnisena (kuorman täydentäminen leimikon kantavan tieosuuden yhteydessä, siirtokuormauspaikassa tai HCT-terminaalissa).
- 84-tonnisella HCT-yhdistelmällä ajaminen 76-tonnisena HCT-reitistön ulkopuolella (omapainon oltava erityisen kevyt ajotalouden varmistamiseksi tai kyseessä oltava kuormattu paluukuljetus jollain kevyemmällä tuotteella)
- Yhdistelmällä ajaminen 76-tonnisena tai HCT-painoisena tiestön kantavuuden vaihtelun mukaan (ks. tarkemmin Winter Premium -malli)
- 76-tonnisen yhdistelmän kasvattaminen HCT-kokoon kuljetusreitillä varrella vetoautoja ja perävaunuja vaihtamalla tai perävaunuja lisäämällä.

Yksittäiset painorajoitettut sillat eivät välttämättä estä HCT-käytävien tehokasta hyödyntämistä. Tienvarsivarastojen, terminaalien ja toimituskohteiden sijainneista riippuen 76-tonninen yhdistelmä voidaan täydentää HCT-painoiseksi painorajoitettun 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 löytä toimiva kiertoreitti. HCT-käytävillä, joiden varrella on useampia puun käyttökohteita, on tarjolla kuljetusvirtoja, joiden ei tarvitse ylittää painorajoitettua siltaa. Painorajoitettut sillat ja lossit joudutaan jo tällä hetkellä ottamaan huomioon puukuljetusten suunnittelussa. (Siekkinen 2020).

3.8.3 HCT-terminaalit

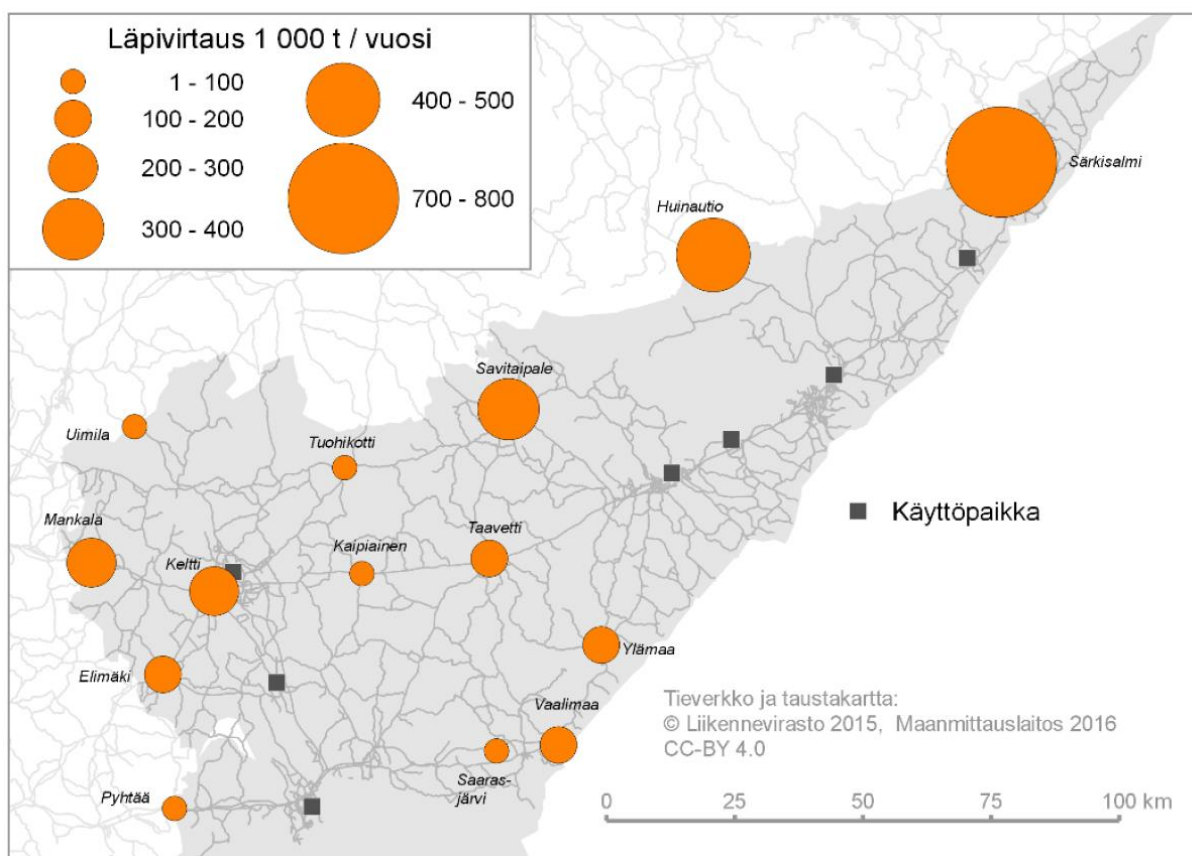
HCT-terminaalien hyödyntäminen laajentaa HCT-käytävien toiminta-aluetta ja potentiaalista kuljetusvolyymia mahdollistaessaan kuormien siirron 76-tonnistensa ja HCT-yhdistelmien välillä. Puun siirto metsäautosta HCT-yhdistelmään voidaan toteuttaa varsinaisen tiekuljetusterminaalin lisäksi missä tahansa 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.

HCT-kokeiluiden osallistuneiden yritysten haastatteluissa (Venäläinen ja Poikela 2021) yli 76-tonnisiin yhdistelmiin siirtyminen lisäisi HCT-terminaalien käyttötarvetta. Uusia terminaleja tarvittaisiin varsinkin Pohjois-Suomeen. Muualla riittää osin nykyisten terminaalien kehittäminen. Terminaali-investointitarpeiden ei nähty muodostuvan suureksi, ja terminaleja on

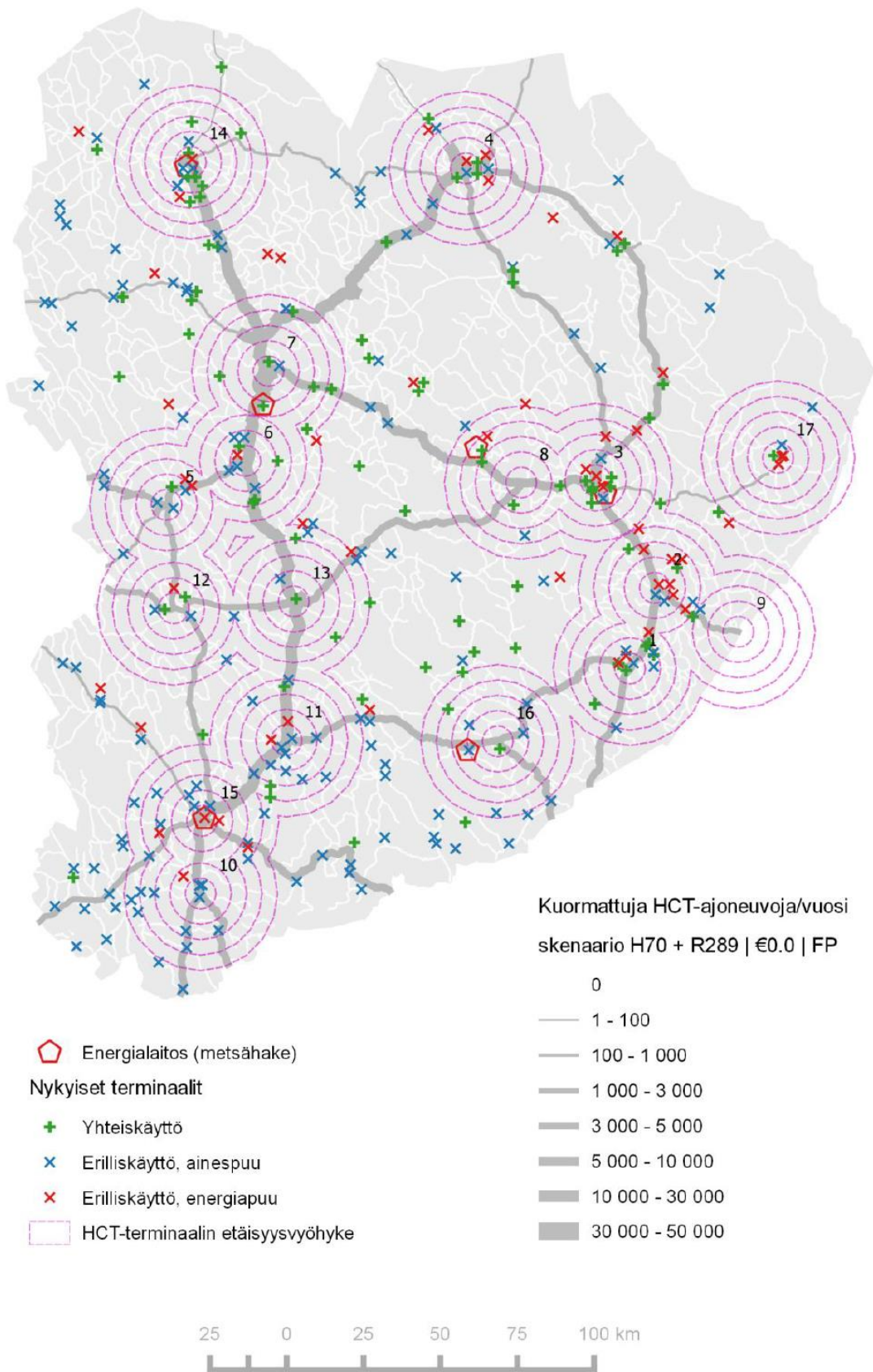
mahdollista hyödyntää kuljetuksissa 76-tonnisillakin yhdistelmillä (mm. kelirikkoajan varastointi). Terminaalien tehokasta hyödyntämistä edesauttavat valmiiksi kuormatut ajoneuvoyksiköt ja jalkalavat (ks. kuvat 13–14) sekä lastauspalvelu.

LUT-yliopiston simulointitutkimuksissa (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2017 ja Korpinen ja Aalto 2017) on tunnistettu tiekuljetusketjuihin sopivien HCT-terminaalien potentiaalisimpia sijoittumipaikkoja Kaakkois- ja Itä-Suomessa (kuvat 46–47). Tarkastelut indikoivat samalla potentiaalisten HCT-käytävien sijoittumista ko. alueilla. Tarkasteluita onkin tarpeen laajentaa muillekin alueille Suomessa. Puuterminalien nykyisiä ja potentiaalisia sijaintipaikkoja kartoitetaan Suomen Metsäkeskuksen TIESIT-hankkeen¹² yhteydessä.



Kuva 46. Kaakkois-Suomen puun käyttöpaikat ja HCT-terminaalien läpi virtaaman kuitupuun määrä skenaariossa, jossa on 30 HCT-ajoneuvoa, 86 metsäautoa, 14 terminaalialia ja oletettu terminaalikustannus 0,50 €/t (Korpinen ja Aalto 2017).

¹² TIESIT-hankkeen terminaaliosion internetsivu <https://www.metsakeskus.fi/fi/energiapuuterminaliselvitys>



Tieverkko ja taustakartta © Liikennevirasto 2017, Maanmittauslaitos 2016, CC-BY 4.0

Kuva 47. Itä-Suomen HCT-kuljetusvirrat ja nykyiset puuterminalit (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2017).

3.8.4 HCT-kuljetusten seuranta- ja rajoitusjärjestelmät

Jotta HCT-kuljetukset rajoittuisivat vain HCT-käytävälle, esillä on ollut mm. HCT-yhdistelmien painojen ja reittien seuranta (esim. massojen seuranta liikkuvista ajoneuvoista Weigh-in-Motion/WiM-järjestelmillä). Ruotsissa on tarkasteltu HCT-yhdistelmien pääsyn älykästä rajoittamista (Intelligent Access, IA) (Asp ja Wandel 2023). IA-ratkaisuilla estetään teknisesti HCT-yhdistelmien liikkuminen niille sopimattomilla reiteillä, jolloin varmistetaan infrastruktuurin kunnon ja liikenneturvallisuuden säilyminen. Ruotsissa on testattu myös kuorma-autojen geoaitaamista, jolla pudotetaan kuorma-auton nopeutta sillan ylityksen ajaksi (Andersson ym. 2023).

Suomessa puu- ja hakekuljetusketjuissa kuorman paino mitataan kuormainvaaoilla (tienvarsi-varastot, 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.

3.9 Liikenneturvallisuus

Yli 76-tonnisten HCT-yhdistelmien ei ole havaittu olevan merkittävästi muita yhdistelmiä heikompia liikenneturvallisuuden kannalta. Suuremmat yhdistelmät voivat jopa parantaa liikenneturvallisuutta, koska ajoneuvomäärät vähenevät. Suurempien yhdistelmien hyvän liikenneturvallisuuden takana voi olla myös se, että niillä ajetaan keskimääräistä paremmilla teillä, kuljettajat ovat kokeneita ja yhdistelmissä on enemmän liikenneturvallisuutta parantavaa ajoneuvotekniikkaa. (Knuuti ja Sirvio 2024).

Massojen noston osalta keskeisiä liikenneturvallisuutta koskevia tutkimusaiheita Suomessa olivat ajoneuvojen stabiliteetti, liikkuvuus, kiihtyvyys ja jarrutusmatkat. Oulun yliopiston tutkimuksessa (Pirnes ym. 2018) verrattiin 84- ja 104-tonnisten HCT-yhdistelmien luistoa, kiihtyvyyttä ja jarrutusmatkoja 76-tonniseen yhdistelmään (taulukot 27–29). 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 27. 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 metsäautoilla 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 28. 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 29. Oulun yliopiston toisen kesäolosuhteiden jarrutuskokeen tuloksia (Pirnes ym. 2018).

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

Ajoneuvojen pidentämisen osalta tutkimuksia tehtiin koskien ajoneuvojen kääntyvyyttä ja muun liikenteen ohituskäyttäytymistä. Keskeisiä tuloksia koskien stabiiliteettia, 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.

Aalto-yliopiston tutkimuksessa (Heinonen 2017) vertailtiin HCT-yhdistelmien ja verrokkien ohitustilanteita. HCT-yhdistelmien ohittaminen kesti keskimäärin 0,8–1,3 sekuntia kauemmin kuin verrokkien. Yhdistelmiä ohitettiin keskimäärin samoilla ajonopetuksilla, mutta

nopeusrajoitusten ylitykset olivat yleisempiä verrokki- kuin HCT-yhdistelmien ohittamisessa. HCT-yhdistelmien takana oli hieman enemmän muiden ajoneuvojen jonoutumista kuin verrokkiyhdistelmillä.

3.10 Kuljettajatarve

Ajoneuvojen käyttöä tiellä koskeneen asetusmuutoksen taustamuistiossa (Valtioneuvoston asetus... 2018) arvioitiin suurempien yhdistelmien toisaalta parantavan työllisyyttä (teollisuuden kilpailukyvyn nousu ja siten kuljetusvolyyymien kasvun kautta). Toisaalta tehokkaammat kuljetukset vähentävät kuljettajien tarvetta, mitä ei kuljettajapulan takia pidetä kuitenkaan ongelmana. Puutavarakuljetuksissakin uusien kuljettajien tarve ylittää alalle valmistuvien määrän, vaikka kuljettajien kokonaistarve ei kasvaisikaan (Strandström ja Poikela 2020). 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 ovatkin kattaneet hyvin eri massaluokkia 84 ja 104 tonnin välillä. Kaikilla HCT-puutavara- ja hakeyhdistelmillä on ollut nykyisin sallittua (76 tonnia) korkeampi paino. Pelkällä pituuksien nostolla saavutetaan puukuljetuksissa vain rajattuja hyötyjä.

Seuraavaan taulukkoon (30) on koottu erikokoisten HCT-yhdistelmien vaikutuksia puutavarakuljetuksissa. Suuremmat ajoneuvoyhdistelmät vähentävät puutavarakuormien määrää 84 000–209 000:lla ja hakekuormien määrää 36 000–130 000:lla vuodessa. Puutavaran **kuljetuskustannukset** vähentyisivät yhdistelmäkoosta ja -tyypistä riippuen 2–44 milj. eurolla vuodessa (parhaimmillaan 7,5–11,9 % per m³ 100–300 km:n kuljetusmatkalla, joissakin tapauksissa matkan oltava yli 100 km säästön saavuttamiseksi). **Polttoaineen kulutus** laskisi 3–8 milj. litralla vuodessa (3,5–10,5 % per tuoretonni 100–300 km:n kuljetusmatkalla). HCT-hakeyhdistelmien vaikutukset julkaistaan myöhemmin. Tässä raportissa esitetyt tulokset koskevat vain kokeiluluvan saaneita HCT-yhdistelmiä. Kokeiluiden yhteydessä on todennäköisesti syntynyt kehitysideoita, joilla yhdistelmistä saataisiin tässä esitettyä kustannustehokkaampia ja toimivampia.

HCT-yhdistelmien ja verrokkien polttoaineen kulutustietoa on kerätty pitkän ajanjakson aikana, jolloin kuorma-autojen polttoainetehokkuus on kehittynyt. Tämä heikentää eri aikoina kerätyn kulutustiedon vertailtavuutta. Metsätehon laskelmissa on siksi painotettu uusimmista yhdistelmistä kerättyä tietoa. Tässä raportissa esitettyjä kulutuslaskelmia tullaan tarkistamaan vuoden 2025 aikana uusimpien kulutustietojen pohjalta. Myös VTT:n simulointimallilla tehdyn tarkastelun mukaan suuremmat yhdistelmät vähentävät hyötykuormakohtaista polttoaineen kulutusta. Simulointimalleilla tehdyillä tarkasteluilla voitaisiin vähentää paitsi ajoneuvokehityksen, mutta myös esimerkiksi kuljettajan ja kuljetusreitin ominaisuuksien vaikutuksia tuloksiin.

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 stabiiliteetin osalta jo HCT-kokeiluluvan hakuvaiheessa.

Taulukko 30. Yhteenveto HCT-yhdistelmien ja -kuljetusketjujen vaikutuksista puutavarakuljetuksissa (kulutuksen osalta verrattuna 76-tonniseen metsä- tai terminaaliautoon ja kustannusten osalta 76-tonniseen metsäautoon). Vaikutusarviot perustuvat raportin laatimishetkellä käytössä olleisiin tutkimusaineistoihin ja -tuloksiin.

Vaikutus	84M	85M	84T, 50 %	90T	92T	94T, 50 %	100T	104T, 50 %
Ajot 1 000 kpl/v	-109	-100	-84	-117	-106	-151	-181	-209
Kuljetus-kustannukset milj. €/v (100 km:n keskimatka)	-27	*	+13	*	*	+9	*	0
Kuljetus-kustannukset milj. €/v (skenaario kuljetusmatkaja-kaumasta**)	-44	*	-2	*	*	-4	*	-10
Kuljetus-kustannukset per m ³ (100–300 km)	-7,7...-8,5 %	*	+3,5...-7,5 %	*	*	+2,4...-8,6 %	*	0...-11,9 %
Polttoaineen kulutus milj. l/v (101 km:n keskimatka)	-7,7	*	-4,0	*	-1,0***	-5,4	*	-7,0
Polttoaineen	-8	*	-3	*	*	-4	*	-5

kulutus milj. l/v (skenaario kuljetusmatkaja-kaumasta**)								
Polttoaineen kulutus per tuoretonni (100–300 km)	-6,8...-7,1 %	*	-4,4...-8,6 %	*	-1,2 %***	-3,5...-8,9 %	*	-4,7...-10,5 %
Tierasitus	<i>Paksupäällysteiset tiet:</i> Tierasitus ei kasva suurillakaan HCT-yhdistelmillä. <i>Ohutpäällysteiset tiet:</i> Paksuimmilla teillä tierasitus ei kasvane, mutta eri kokoisille HCT-yhdistelmille sopivien teiden määrittäminen vaatii tarkentamista (tutkimusta käynnissä). <i>Soratiet:</i> HCT-kuljetukset koskisivat todennäköisesti korkeintaan 84-tonnisia ja 10-akselisia yhdistelmiä. Johtopäätösten tekemistä varten lisätutkimukset ovat tarpeen.							
Siltarasitus	****	****	****	****	****		****	
Liikenneturvallisuus	<i>Liikkuvuus (luisto):</i> Maantiellä talviolosuhteissa 104- ja 84-tonnisilla tavanomaisen liikenteen vaatimusten mukainen, vaikka luistoa havaittiin tietyissä tilanteissa. <i>Kiihdytys:</i> 104-tonnisella 56 sek (eli 56 % kauemmin kuin 76-tonnisella) (Pirnes ym. 2018). <i>Stabiiliteetin, kääntyvyyden ja muun liikenteen ohituskäyttäytymisen</i> 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).							
Työllisyys	Kuljettajapulan takia HCT-yhdistelmillä ei arvioida olevan negatiivisia vaikutuksia autokuljettajien työllisyyteen.							

*Ei lasketa ko. kokoluokalle erikseen, mutta ko. kokoluokasta kerättyjä tietoja on hyödynnetty tässä esitetyissä muiden kokoluokkien laskelmissa

**Mukaan lukien vain ne kuljetusmatkaluokat, joilla syntyy säästöä.

***Keskikulutus keskimääräisellä (ei siis täydellä) kuormalla Kärhän ym. 2023 mukaan ja keskikulutus tyhjänä (ilman kuormainta, 122 km:n keskimatkalla) Malmstedtin 2024 mukaan. Ko. kulutustasot eivät ole täysin vertailtavissa taulukossa esitettyihin muihin kulutuslukemiin.

****Ks. tarkemmin taulukko 25 (tulokset vaihtelevat mm. sillan pituuden mukaan)

HCT-yhdistelmien **tierasitusvaikutuksia** on tutkittu erilaisissa kohteissa ja erilaisilla yhdistelmillä. Paksupäälysteisillä teillä HCT-yhdistelmät eivät aiheuta tien urautumista tai ero nykyisiin yhdistelmiin on hyvin pieni. Aivan ohuimmin rakennetuilla ja heikoilla pohjamailla sijaitsevilla teillä HCT-yhdistelmät aiheuttavat enemmän urasyvyyksien kasvua kuin nykyiset yhdistelmät. HCT-yhdistelmille sopivien, ohuesti päälystettyjen teiden määrittäminen vaatii vielä tarkentamista. Tätä tukee ohutpäälysteiselle tielle kehitetty tierasitusten vertailun laskentamalli, jota jatkokehitetään käynnissä olevassa hankkeessa. 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 voitu hyödyntää muun raskaan liikenteen aiheuttaman tien häiriintymisen takia.

Winter Premium -hankkeessa tutkittiin toimintamallia, jossa teiden painorajoituksia nostettaisiin, kun tierakenne on jäänyt 30–40 cm:n syvyyteen asti. Hankkeessa todettiin roudan kasvattavan sekä päälystetyn että soratien kantavuuden moninkertaiseksi. Toimintamallin hyödyntämistä heikentää syksy- ja kevätkausina tyypillinen tien vuorottainen jäätyminen ja sulaminen. Vaihtoehtona onkin mallin kehittäminen dynaamiseksi olosuhteiden vaihtumisen mukaan. Hankkeessa ei määritetty roudan mahdollistamaa massan korotuksen määrää. Hankkeessa kehitettiin kelirikon ennustemallia, jota jatkokehitetään muiden hankkeiden yhteydessä.

Puutavarakuljetusten tierasitusten vähentämiseksi on tässä raportissa kuvattu eri keinoja (ajantasainen teiden kuljetuskelpoisuusluokitus, CTI, lisäpyörälliset perävaunut, HCT-kuljetusten tekniset seuranta- ja rajoitusratkaisut). Ko. keinoja käyttöönottamalla tierasitusta ja tievaurioita voidaan vähentää jo nykykokoisissa yhdistelmissä.

Ensimmäinen **siltarasitustutkimus** HCT-yhdistelmien vaikutuksista rajoittui kotelopalkkisiltoihin ja niiden laskennallisiin tarkasteluihin. Suurimmillaan HCT-yhdistelmät lisäsivät rasitusta yli 10 % (varsinkin pitkillä silloilla). Vertailun useimmilla 84-tonnisilla ja lyhyillä silloilla rasitusero jäi selvästi pienemmäksi. Tutkimuksessa ehdotettiin jatkotoimenpiteenä koekuormituksia, joilla voitaisiin täsmentää ja täydentää laskennallisen tutkimuksen tuloksia. Laskelmissa ei pystytty ottamaan huomioon mm. siltojen mahdollisia jälkijännityksiä. Keväällä 2025 valmistuu Väyläviraston käynnissä oleva siltojen koekuormituksiin perustuva jatkotutkimus.

Päälystettyjen teiden osalta HCT-kuljetukset on ajateltu rajoitettavan vain erikseen määriteltäville **HCT-käytävälle**. Näin taataan käytävien sopivuus HCT-yhdistelmille ja toisaalta priorisoidaan tarvittavat infrastruktuuri-investoinnit yhteysväleille, joilla hyödyt HCT-yhdistelmille ovat suurimmat. Puutavara- ja hakekuljetusten osalta HCT-käytäviä 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).

Päälystettyä HCT-käytäväverkkoa täydentäisi metsäyhtiöiden omien, suoraan yleisiin teihin yhteydessä olevien yksityisteiden tieverkko. Metsäsektorin HCT-käytäväehdotus tarkentuu tie- ja siltarasitustutkimusten tulosten mukaan. Toisaalta tie- ja siltaverkon nykyisestä kunosta, kantavuudesta ja keskeisistä pullonkauloista on tarpeen saada tarkempi kuva.

HCT-teeman **jatkotutkimustarpeita** ovat:

- Mahdollisimman optimien (kustannuksiltaan, polttoainetaloudeltaan ja tie- ja siltarasitukseltaan) 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 ja terminaaliyhdistelmät puun eri pituudet huomioon ottaen sekä sivutuotehakeyhdistelmät).
- Ns. tyyppiyhdistelmien määrittäminen eli vain kokonaismassan osalta nykyisestä sääntelystä poikkeavien yhdistelmien määrittäminen. Tyyppiyhdistelmien määrittelyssä on tarpeen ottaa huomioon myös metsäsektorin tuotekuljetusten ja muiden toimialojen kuljetusten tarpeita.
- Tämän raportin kustannusvertailuiden päivittäminen (ml. tulevan tieliikenteen päästökaupan ja liikenteen verotusuudistuksen vaikutukset)
- Täydentävät tierasitustutkimukset (esim. hakeyhdistelmien tierasitustutkimusta ei ole tehty, mallia soratien palautumisajasta ei ole) ja pitkäkestoiset seurantakohteet
- Tierasitusmallin mahdolliset jatkokehitystarpeet ja lisätarkastelut käynnissä olevan hankkeen päätyttyä (varsinkin ns. tyyppiyhdistelmien tarkastelut)
- Täydentävät siltarasitustutkimukset (muiden kuin kotelopalkkisiltojen laskennalliset tarkastelut) ja mahdolliset toimintamallit siltarasituksen vähentämiseksi (esim. välimatkat tai -ajat siltojen ylittämisessä HCT-kalustolla)
- Polttoaineen kulutuksen simulointimallin kehittäminen ja mallitarkastelut
- Päästöjä vähentävien keinojen (täyssähkö- ja kaasuaajoneuvoyhdistelmät, perävaunujen sähköiset akselit, yhdistelmän kevyempi omamassa, voimalinjojen optimointi yms.) vaikutusten ja potentiaalin tutkiminen HCT-kalustolla
- Raakapuun ja hakekuljetusten HCT-käytäväverkkoehdotus ottaen huomioon HCT-kuljetusten potentiaaliset hyödyt (myös muiden toimialojen kuljetuksissa) ja mahdollisten pullonkaulojen poistamisen kustannukset
- Potentiaalisten HCT-käytävien nykyisen tie- ja siltainfrastruktuurin nykyisen kunnon ja mahdollisten pullonkaulojen sekä tarvittavien toimenpiteiden kustannusten arvioiminen
- Raakapuun HCT-terminaaliverkoston alueelliset tarkastelut jo tehtyjen tarkasteluiden lisäksi
- Vetolaitteiden kehittämiseen liittyvät tarpeet ja mahdolliset ratkaisut
- Selvitys yhdistelmien kokonaismassan vaikutuksista ajoneuvojen huolto- ja korjauskustannuksiin

LÄHTEET

Andersson K, Noreland D, Lundahl J, Eriksson A (2023) Geostängslade BK4-transporter vide bropassager och tjälade vägar. RISE Rapport 2023:87. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1801539/FULLTEXT01.pdf>.

Anttila P, Ojala J, Palander T, Väättäin K (2023) The effect of road characteristics on timber truck driving speed and fuel consumption based on visual interpretation of road database and data from fleet management system. Silva Fennica vol. 56 no. 4. article id 10798. <https://www.silvafennica.fi/article/10798>

Asp T, Wandel S (2023) A Framework for Intelligent Access and Compliance Assurance for High Capacity Transport. Transportation Research Procedia 72. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146523008852?via%3Dihub>.

Bergqvist M, Björheden R, Eliasson L (2016) Kompakteringseffekter på skogsbilvägar. Arbetsrapport från Skogforsk nr. 917–2016. <https://www.skogforsk.se/contentassets/2a1f59a536e54a2792c0d7dc7f46cd46/kompakteringseffekter-pa-skogsbilvagar-arbetsrapport-917-2016.pdf>.

Heinonen T (2017) High Capacity Transport -ajoneuvoyhdistelmien vaikutukset liikennevirtaan. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 48/2017. <https://www.doria.fi/handle/10024/144005>

Hofsten H von, Flisberg P, Gustavsson O, Davidsson A (2021) BK4-läget – Beskrivning och analys av skogsbrukets tillgång till BK4-vägnät. Skogforsk Arbetsrapport 1089-2021. https://www.skogforsk.se/cd_20210624141218/contentassets/9f926088ac494c5cbb1be36f61e5906f/arbetsrapport-1089-2021.pdf

Infra ry, Elinkeinoelämän keskusliitto EK, Keskuskauppakamari, SAK, SKAL, Suomen Tieyhdistys (2022) Modernit pääväylät – kilpailukykyinen Suomi – Väylävisio 2025–2050. https://kauppakamari.fi/wp-content/uploads/2022/10/Modernit_pa%CC%88a%CC%88va%CC%88yla%CC%88t_kilpailukykyinen_Suomi_loppuraportti_09_2022.pdf

Isometsä J (2024) Raskaan liikenteen kuormitusvasteiden mallintaminen. Diplomityö, Tampereen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/155139/IsometsaJukka.pdf>

Juntunen E (2023) Ainespuun autokuljetusten päästövähennyskeinojen kustannusvaikutukset. Pro gradu, Itä-Suomen yliopisto. https://erepo.uef.fi/bitstream/handle/123456789/29530/urn_nbn_fi_uef-20230284.pdf

Kalliovalkama R (2022) Teräsbetonisen kotelopoikkileikkauksen toiminta ja HCT-yhdistelmien vaikutukset rasitukseen. Diplomityö, Tampereen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202208166427>

Knuuti M, Sirvio K (2024) T-OMHA / Kirjallisuusselvitys HCT-rekkojen vaikutuksesta tiestön kuntoon. Väyläviraston julkaisu 37/2024. https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/189137/VJ_37-2024_978-952-405-177-4.pdf

Korpijärvi K, Björnström M, Karlsson M, Raitila J, Virkkunen M, Hurskainen M (2021) Biohiilen valmistus ja käyttö turvetta korvaavana tukipolttoaineena bioenergian tuotannossa, Tutkimusraportti VTT-R-717-21. <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2021/VTT-R-717-21.pdf>

Korpilahti A (2015) Bigger vehicles to improve forest energy transport. Metsätehon tulostalko-sarja 3/2015. <http://www.metsateho.fi/bigger-vehicles-to-improve-forest-energy-transport/>.

Korpinen O-J, Aalto M (2017) Optimoitu puuterminaliverkosto. 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 -verkot. Metsätehon raportti 242. https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_242_Terminaalitoiminnot_energiatehokkaassa_puutavaralogistiikassa_T3.pdf.

Kärhä K, Kortelainen E, Karjalainen A, Haavikko H, Palander T (2023) Fuel consumption of a high-capacity transport (HCT) vehicle combination for industrial roundwood hauling: A case of laden timber truck combinations in Finland. International Journal of Forest Engineering. <https://www.tandfonline.com/eprint/AAGPSNFMEEFRQGPYE86/full?target=10.1080/14942119.2022.2163871>

Lappeenranta teknillinen yliopisto (2017) Puutavaran terminaalipaikkojen simulointi Itä-Suomen alueelle. <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Liite-6-Tutkimusraportti-Puutavaran-terminaalipaikkojen-simulointi-I-S-alueelle.pdf>.

Lapp T, Ilikkanen P (2017) HCT-ajoneuvojen liikennejärjestelmävaikutukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 57/2017. <https://www.doria.fi/handle/10024/147575>

Lapp T, Ilikkanen P, Weckström C, Mäkinen S (2022) Rataverkon raakapuun kuormauspaikkaverkon tilanne ja tulevaisuuskuva. Väyläviraston julkaisu 29/2022. <https://www.doria.fi/handle/10024/185109>

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

Liikennevirasto (2018) Tierakenteen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 38/2018. https://ava.vaylailmi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf.

Luonnonvarakeskus (2024a) Lämpö- ja voimalaitosten kiinteiden puupolttoaineiden käyttö maakunnittain. Tilasto. https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_04%20Metsa_04%20Talous_07%20Puun%20kaytto_10%20Puun%20energiakaytto/01_Laitos_ekaytto.px/. [Vii-tattu 2.7.2024].

Luonnonvarakeskus (2024b) Metsäteollisuuden puunkäyttö vuosittain ja toimialoittain. Tilasto. https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_04%20Metsa_04%20Talous_08%20Metsateollisuuden%20puunkaytto/04_metsateol_puunk_tavaralajeittain_1860.px/. [Viitattu 2.7.2024].

Luonnonvarakeskus (2024c) Teollisuuspuun kaukokuljetustavat ja keskiläpikuljetusmatkat 1982–2021. Tilasto. 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 2.7.2024].

Luonnonvarakeskus (2024d) Tuontihakkeen laskennallinen käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa. Tilasto. https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_04%20Metsa_04%20Talous_07%20Puun%20kaytto_10%20Puun%20energiakaytto/22_tuontihake_arvio.px/. [Viitattu 2.7.2024].

Malmstedt K (2024) HCT-yhdistelmän kulutus tyhjänä. Sähköpostiviesti 12.8.2024.

Metsäranta H, Iikkanen P, Ristikartano J, Reimi P (2020) Tie- ja rautatieliikenteen hankearvioinnin yksikköarvojen määrittäminen vuodelle 2018. Päivitetty 1.4.2022. Väyläviraston julkaisuja 48/2020. <https://www.doria.fi/handle/10024/179995>.

Metsäteho Oy, Lappeenrannan teknillinen yliopisto (2017) Terminaalitoiminnot energiatehokkaassa puutavaralogistiikassa – Loppuraportti. Metsätehon tulosalvosarja 2/2017. <http://www.metsateho.fi/terminaalitoiminnot-energiatehokkaassa-puutavaralogistiikassa-loppuraportti/>.

Metsäteollisuus ry (2022) Viennin osuus metsäteollisuuden tuotannosta. Tilasto 30.8.2022. [Viitattu 21.10.2022].

Niskanen P, Pirnes V, Pekkala V, Rasi-Koskinen H, Tuutijärvi M-T, Jokinen K, Sukuvaara T, Karsisto V, Mäenpää K (2024) Winter Premium – Loppuraportti. Raportti n:o 13. Oulun yliopisto, Konetekniikka. <https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/48305/nbnfioulu-202403152264.pdf>

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

Palander T, Broz S A, Kärhä K (2021) Impacts of Road Infrastructure on the Environmental Efficiency of High Capacity Transportation in Harvesting of Renewable Wood Energy. *Energies* 2021, 14, 453. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/2/453>

Palander T, Viitamäki K, Borz S A (2023) Impacts of using larger and heavier vehicles on operations and profitability of timber transportation: The case of Finnish operating environment. *Annals of Forest Research*, 66(2). <https://afrjournal.org/index.php/afr/article/view/2992>

Pekkala V (2018) Tien rasitukset tieverkossa HCT- ja muiden puunkuljetusyhdistelmien vaikutusten vertailu. Loppuraportti 15.8.2018. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tien_rasitukset_tieverkossa_LOPPURAPORTTI_20180825_VPe.pdf.

Pirnes V, Haataja M (2018) HCT-puutavarayhdistelmien ajoseuranta- ja stabiiliteettitutkimus – Vetoaisvoimamittaukset. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/vetoaisvoimamittaukset_eu_pohja.pdf.

Pekkala V, Haataja M (2019) HCT-yhdistelmien vaikutus soratien urautumiseen. Raportti n:o 10, Oulun yliopisto Konetekniikka. <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526224817.pdf>.

Pirnes V, Tuutijärvi M-T, Haataja M (2018) HCT-puutavarayhdistelmien ajoseuranta- ja stabiiliteettitutkimus - Yhdistelmien liikkuvuus ja ajovakaus. Oulun yliopisto 17.8.2018. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/hct_puutavarayhd_liikkuvuus_ajovakaus_eu_pohja.pdf.

Pirnes V, Untinen J, Jokinen K, Niskanen P (2023) Winter Premium – Ajoneuvoyhdistelmien mittaukset – Loppuraportti. Oulun yliopisto, Materiaali- ja konetekniikka. Liiteraportti läheteessä <https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/48305/nbnfioulu-202403152264.pdf>.

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. <http://www.metsateho.fi/terminaalitoiminnot-energiatehokkaassa-puutavaralogistiikassa-t3-raportti242/>.

Sauna-aho J, Sauna-aho P (2020) Keskipyöräperävaunu verrattuna normaaliperävaunuun raakapuukuljetuksissa polttoaineenkulutuksen ja tiekuormituksen kannalta. Väyläviraston julkaisu 68/2020. https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/180365/vj_2020-68_978-952-317-835-9.pdf.

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. <https://www.doria.fi/handle/10024/163959>

SCA (2022) SCA's world-unique electric timber truck from Scania has arrived. Internetartikkeli 1.7.2022. <https://www.sca.com/en/top-news-startpage/2022-07/scas-world-unique-electric-timber-truck-from-scania-has-arrived/>

Siekinen A (2020) Ovatko heikot sillat este HCT kuljetuksille? Julkaisematon kalvoesitys.

Siekinen A, Korpilahti A (2015) Rengaspaineiden säätö puutavara-ajoneuvoissa. Metsätehon tulosalvosarja 13/2015. https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja_2015_13_Rengaspaineiden_saato_puutavara_ajoneuvoissa_ak.pdf.

Solonen H, Väättäin K, Tokola T, Venäläinen P, Anttila P, Kärhä K (2024) Metsäteiden kuljetuskelpoisuustiedon visio ja tiekartta - Alemman tieverkon liikennöitävyys ja ympärivuotisen puuhuollon turvaaminen. Luonnonvarakeskus Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 43/2024. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/554981/luke-luobio_43_2024.pdf.

Strandström M (2017a) Pohjamaan kantavuusluokitus – Metsätieohjeiston uudistettu materiaali. <http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Pohjamaan-kantavuusluokitus.pdf>.

Strandström M (2017b) Päälysrakenneluokat - Metsätieohjeiston uudistettu materiaali. <http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/P%C3%A4%C3%A4lysrakenneluokat.pdf>.

Strandström M (2018) Ajoneuvoyhdistelmien kääntyvyys metsäteiden kääntymispaikoilla ja liittymissä. Metsätehon tulosalvosarja 1/2019. <https://www.metsateho.fi/ajoneuvoyhdistelmien-kaantvyys-metsateiden-tuloskalvosarja/>.

Strandström M (2021) Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2020. Metsätehon tulosalvosarja 8/2021. <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja-2021-08-Metsahakkeen-tuotantoketjut-Suomessa-vuonna-2020.pdf>.

Strandström M (2022) Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2021. Metsätehon tulosalvosarja 5/2022. <https://www.metsateho.fi/puunkorjuu-ja-kaukokuljetus-vuonna-2021/>.

Strandström M (2023) Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2022. Metsätehon tulosalvosarja 12/2023. <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja-2023-12-Puunkorjuu-ja-kaukokuljetus-vuonna-2022.pdf>.

Strandström M (2024) Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2023. Metsätehon tulosalvosarja 2/2024. <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja-2024-02-Puunkorjuu-ja-kaukokuljetus-vuonna-2023.pdf>.

Strandström M, Poikela A (2020) Metsäalan työvoimatarve – päivitetyt Savotta 2025 -laskelmat. Metsätehon tulosalvosarja 8/2020. <https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja-2020-08-Metsaalan-tyovoimatarve-Savotta2025.pdf>.

Suomen metsäkeskus (2024) Yksityisteiden siltapaikat. Karttapalvelu. <https://story-maps.arcgis.com/stories/04cefb6993254e5ab4fdec5bc0f129cb>. [Viitattu 2.7.2024].

Sweco (2020) Tyypisillan Bel II kantavuusselvitys 85 tonnin yhdistelmälle. Julkaisematon raportti 29.9.2020.

Söderena P, Nylund N-O, Rosenblatt D, Stokes J, Lama N, Cádiz A, Takada Y, Kobayashi M, Lee C-B, Lindgren, M (2021) Heavy-Duty Vehicles Performance Evaluation. Annex 57 – A Report from the Advanced Motor Fuels Technology Collaboration Programme. https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Annex_57.pdf.

Tilastokeskus (2024a) Kotimaan kuorma-autoliikenteen suoritteet tavaralajeittain, 2011–2023. Tilastosivu. https://statfin.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_kttav/statfin_kttav_pxt_119b.px/. [Viitattu 1.7.2024].

Tilastokeskus (2024b) 12jz Maanteiden pituus ja liikennesuorite kunnittain, 2017–2023. Tilasto. https://pxweb2.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_tiet/statfin_tiet_pxt_12jz.px/. [Viitattu 1.7.2024].

Traficom (2020) Pidemmät ja raskaammat HCT-rekat. Internetsivusto. <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/pidemmät-ja-raskaammat-hct-rekat>. [Viitattu 2.7.2024].

Traficom (2021) Ajoneuvoyhdistelmien tekniset vaatimukset. Määräys TRAFICOM/304841/03.04.03.00/2019. https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/FI_Final_HCT-m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ys_korjaukset.pdf. [Viitattu 2.7.2024].

Traficom (2023) Autojen ja niiden perävaunujen tekniset vaatimukset. Määräys TRAFICOM/422611/03.04.03.00/2020. <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/M%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ys%20autojen%20ja%20niiden%20per%C3%A4vaunujen%20tekniset%20vaatimukset.pdf>. [Viitattu 2.7.2024].

Trafikverket (2024) Uppdatering av regeringsuppdrag – Implementering av bärighetsklass 4. 4.6.2024. https://bransch.trafikverket.se/contentassets/9d861d7e13004618aa2dec5db07510c/uppdatering-av-regeringsuppdrag--implementering-av-barighetsklass-4-2024-06-04_rattad-till-ompublicering.pdf

Valtioneuvosto (2023) Vahva ja välittävä Suomi – Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023. Valtioneuvoston julkaisuja 2023.58. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165042/Paaministeri-Petteri-Orpon-hallituksen-ohjelma-20062023.pdf>.

Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta - Vaikutustenarviointi.

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. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_242_Terminaalitoiminnot_energiatehokassa_puutavaralogistiikassa_T3.pdf.

Venäläinen P (2019) Puutavara- ja hakeajoneuvojen pidentämisen vaikutukset – Täydennetty versio. Metsätehon raportti 246. https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Metsatehon_raportti_246_Puutavara_ja_hakeajoneuvojen_pidentamisen_vaikutukset.pdf.

Venäläinen P, Poikela A (2021) Puutavaran ja hakkeen HCT-yhdistelmät ja kuljetusketjut – Yrityshaastatteluiden tulokset. Metsätehon tulosalvosarja 5/2021. <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja-2021-05-Puutavaran-ja-hakkeen-HCT-yhdistelmät-ja-kuljetusketjut.pdf>.

Venäläinen P, Poikela A (2022). Puutavara- ja hakeajoneuvojen massojen noston vaikutukset. Metsätehon raportti 265 (aiheen 3. väliraportti). <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti-265-Puutavara-ja-hakeajoneuvojen-massojen-noston-vaikutukset.pdf>.

Venäläinen P, Poikela A, Strandström M (2023) Puun korjuun ja kuljetusten päästöjen nykytila ja vähennyskeinot – 2. päivitys. Metsätehon tulosalvosarja 4/2023. <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja-2023-4-Puun-korjuun-ja-kuljetusten-paastojen.pdf>.

Virtala P, Pirnes V, Pitkänen P (2018) Perävaunun aiheuttaman tierasituksen pienentäminen uudella akselistoratkaisulla. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 55/2018. <https://www.doria.fi/handle/10024/165119>

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. <https://www.doria.fi/handle/10024/165324>

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. <https://www.doria.fi/handle/10024/173131>

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. <https://www.doria.fi/handle/10024/173541>.

Vuorimies N, Varin P, Kolisoja P (2023) Ohutpäällysteisen tierakenteen rasittumisen vertailututkimus 2022 – Kuormituskokeet 92- ja 75-tonnisilla ajoneuvoyhdistelmillä. Väyläviraston julkaisuja 59/2023. https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/187847/vj_2023-59_978-952-405-102-6.pdf.

Väkevä J, Pennanen O, Örn J (2004) Puutavara-autojen polttoaineen kulutus. Metsätehon raportti 166. https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_166.pdf.

Väylävirasto (2024) Tieverkko. Verkkosivusto. <https://vayla.fi/vaylista/tieverkko#.XfoM-kGQzZaQ>. [Viitattu 2.7.2024].

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. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14942119.2020.1757324>.

Ympäristöministeriö (2022) Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelma – Kohti hiili-neutraalia yhteiskuntaa 2035. Ympäristöministeriön julkaisuja 2022: 12. https://julkaisut.valtio-neuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164186/YM_2022_12.pdf

Liite 1A. Tarkasteltujen puutavarayhdistelmien tiedot 1/3

Yhdistelmät	Ketonen ^T	Verrokki ^M	Orpe ^{TA}	Orpe ^{TB}	Verrokki ^{T*}
Merkki	Scania	Scania	Volvo	Volvo	Volvo
Kokonaispaino, t	104	76	94	100	76
Omapaino, t	28,2	21,1	27,5	27,26/27,2	24
Hyötykuorma, t	75,8	54,9	66,5	72,74/72,8	52
Kokonaispituus, m	33	24	31	31,5	23
Leveys ja korkeus, m	2,55/4,35	2,55/4,35	2,55/4,35	2,55/4,35	2,55/4,2
Akselit ja renkaat, kpl	13/46	9/32	12/42	12/38 tai 40	9/30
Moottorin teho, hv	730	620	700	750	700
Moottorin Euro-päästöluokka	6	5	5	6	5
Ensirekisteröintivuosi	2015	2014	2014	2019	2014

*Sama vetoauto kuin HCT-yhdistelmällä

Liite 1A. Tarkasteltujen puutavarayhdistelmien tiedot 2/3

Yhdistelmät	Hannonen ^{TA}	Hannonen ^{TB}	Verrokki ^{TA}	Verrokki ^{TB***}	P&A Trans ^{MA}	P&A Trans ^{MB}	Verrokki ^M	Malinen ^M	Verrokki ^M
Merkki	Scania	Scania	Scania	Scania	Scania	Scania	Volvo	Scania	Scania
Kokonaispaino, t	84	84	76	76	84	84	76	84	76
Omapaino, t	21,3	21	20,4	21	23,0+3,6*	22,5+4,3*	22,3+3,6*	22,8+4,0*	23,3+4,0*
Hyötykuorma, t	62,7	63	55,6	55	61/57,4	61,5/57,2	53,7/50,1	61,2/57,2	52,7/48,7
Kokonaispituus, m	26,9	26,7	23,5	26,7	25,0	24,8	25,0	24,3	23,6
Leveys ja korkeus, m	2,55/4,4	2,55/4,35	2,55/4,4	2,55/4,4	2,55/4,4	2,55/4,4	2,55/4,3	2,55/4,4	2,55/4,4
Akselit ja renkaat, kpl	10/34	10/30** tai 34	9/32	10/30** tai 34	10/34	10/34	9/32	10/34	9/32
Moottorin teho, hv	730	730	730	730	730	650	750	730	730
Moottorin Euro-päästöluokka	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Ensirekisteröintivuosi	2016	2019	2014	2019	2014	2020	2014	2016	2016

*Kuormaimen paino

**Osa leveitä ykköspyöriä

***Sama yhdistelmä kuin B-HCT-yhdistelmä

Liite 1A. Tarkasteltujen puutavarayhdistelmien tiedot 3/3

Yhdistelmät	Moilaspojat ^{T/M}	Malmstedt ^{T**}	Peltoniemi ^M	Verrokki ^M
Merkki	Volvo	Sisu	Scania	Scania
Kokonaispaino, t	90/84	92	85	76
Omapaino, t	24,8/23,8***	27,95+3*	24,7+4*	24,72+4*
Hyötykuorma, t	65,2/60,2	64,05/61,05	60,3/56,3	51,28/47,28
Kokonaispituus, m	26,7/24,5	32,0	28	23,5
Leveys ja korkeus, m	2,55/4,2	2,55/4,4	2,55/4,4	2,55/4,4
Akselit ja renkaat, kpl	11/36 / 10/34	12/42	10/34	9/32
Moottorin teho, hv	650	625	650	730
Moottorin Euro-päästöluokka	6	6	6	6
Ensirekisteröintivuosi	2018	2018	2021	2019

*Kuormaimen paino

**Toimii tarvittaessa myös metsäautona

***Toimii vain siirtoautona, joten ei kuormainta

Liite 1B. Tarkasteltujen hakeyhdistelmien tiedot 1/2

Yhdistelmät	Huhtala ^{HA}	Huhtala ^{HB*}	Verrokki ^{HA}	Verrokki ^{HB}	Wickström ^{HB}	Wickström ^{HA}	Verrokki ^H
Merkki	Scania	Scania	Volvo	Scania	Scania	Scania	Scania
Kokonaispaino, t	100	98	68	76	92	85	64
Omapaino, t	33,54	33,2	23,8	26,0	34,0*	31,7	23,54
Hyötykuorma, t	66,46	64,8	44,2	50,0	58,0*	53,3	40,46
Kokonaispituus, m	33,97	34,5	25,25	25,25	32,77	33,97	25,25
Leveys ja korkeus, m	2,55/4,4	2,55/4,4	2,55/4,2	2,55/4,2	2,55/4,4	2,55/3,84	2,55/4,4
Akselit ja renkaat, kpl	12/46	12/46	8/20	9/32	12/38	12/30	8/20
Moottorin teho, hv	730	770	345	650	650	730	580
Moottorin Euro-päästöluokka	6	6	5	6	6	6	6
Ensirekisteröintivuosi	2017	2022	2013	2015	2019	2017	2015

*Yhdistelmän vetoauto vaihdettu uuteen 2023

Liite 1B. Tarkasteltujen hakeyhdistelmien tiedot 2/2

Yhdistelmät	Sammalisto ^{HA}	Sammalisto ^{HB}	Verrokki ^{HA}	Verrokki ^{HB}	Konnekuljetus ^{H+}
Merkki	Scania	Scania	Scania	Scania	Volvo
Kokonaispaino, t	91	84	76	76	90
Omapaino, t	29	27,8	27,2	27,2	29,5
Hyötykuorma, t	62	56,2	48,8	48,8	60,5
Kokonaispituus, m	29	27,5	25,3	25,3	28,0
Leveys ja korkeus, m	2,55/4,2	2,55/4,2	2,55/4,2	2,55/4,2	2,6/4,3
Akselit ja renkaat, kpl	11/34	10/30	9/28	9/28	11/34
Moottorin teho, hv	730	730	730	730	750
Moottorin Euro-päästöluokka	6	6	6	6	6
Ensirekisteröintivuosi	2017	2017	2016	2016	2018

*Lisäksi tuotekuljetusta (sellupaaleja)

Liite 2A. Selvitys vetoauton arvonalenemasta

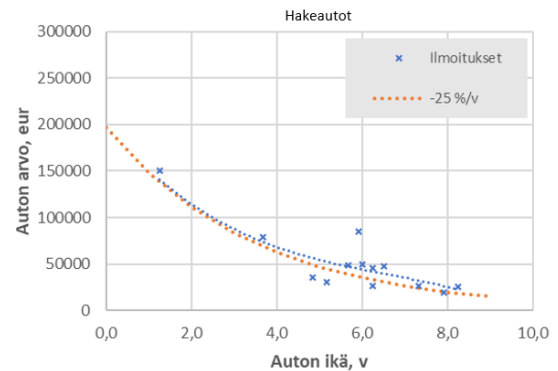
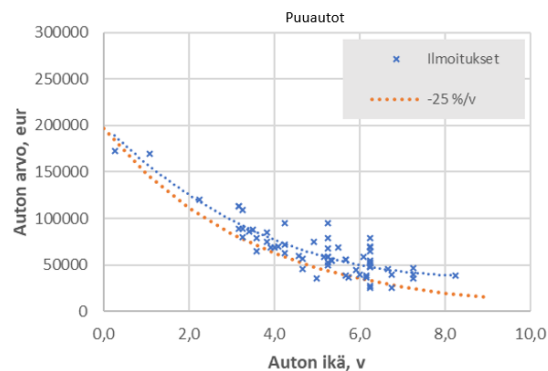
Myynti-ilmoitukset

- 103 voimassa olevaa tai äskettäin poistunutta ilmoitusta Nettikone- ja Mascus-sivustoilta
 - 76 puuautoa, 27 hakeautoa
 - Ensirekisteröinti 1/2012 ->

RekNr	Lähde	IlmTyyp	Autotyyppi	Malli	Vm	Kk	Ikä	Mittarit	Hinta	Vetotap	kW	Vaih.
9093-158	Mascus	myytävänä	Puuauto	Volvo FH16	2016		4,3	435000	95000	8x4	478	Autom
9093-158	Mascus	myytävänä	Puuauto	Scania R730	2016	11	3,8	530000	85000	8x4/4	537	Autom
9093-158	Mascus	myytävänä	Puuauto	Volvo FH16	2016	9	4,0	559000	69000	8x4	552	Autom
9093-158	Mascus	myytävänä	Puuauto	Scania R580	2016	10	3,9	610000	69000	8x4*4	427	Manual
9093-158	Mascus	myytävänä	Puuauto	Scania R730	2016	8	4,1	633000	69500	8x4	537	Autom
9093-158	Mascus	myytävänä	Puuauto	Scania R730	2016	11	3,8	640000	75000	8x4	537	Autom
9093-158	Mascus	myytävänä	Puuauto	M-B Arocs 3558	2016	2	4,6	659000	59900	8x4*4	426	Autom
9093-158	Mascus	myytävänä	Puuauto	Volvo FH16	2016		4,3	720000	71700	8x4	552	Autom
9093-158	Mascus	myytävänä	Puuauto	Scania R730	2016	1	4,7	941000	57000	8x4*4	537	Autom
9093-158	Nettikone	myyty	Puuauto	Volvo FH16	2016		4,3	626000	63000	8x4	551	Autom
9093-158	Nettikone	poistettu	Puuauto	M-B Arocs 3263	2016	1	4,7	690000	45000	8x4	463	Autom
9093-158	Nettikone	myytävänä	Hakeauto	Scania R580	2016	1	4,7	830000		8x2	426	Autom
9093-158	Nettikone	myyty	Hakeauto	Volvo FH540	2016		4,3	790000	72000	6x2	397	Autom
9093-158	Nettikone	poistettu	Hakeauto	Volvo FH 540	2016	1	4,7	625000		8x4	397	Autom

Arvonalenema auton ikään suhteutettuna

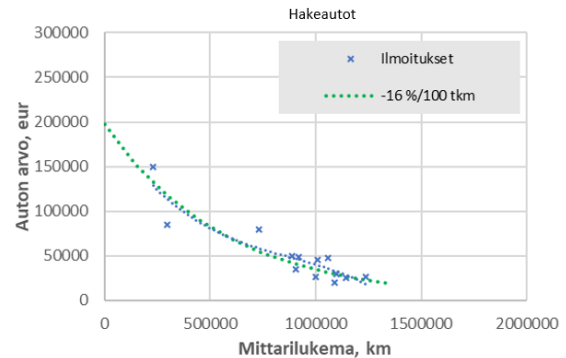
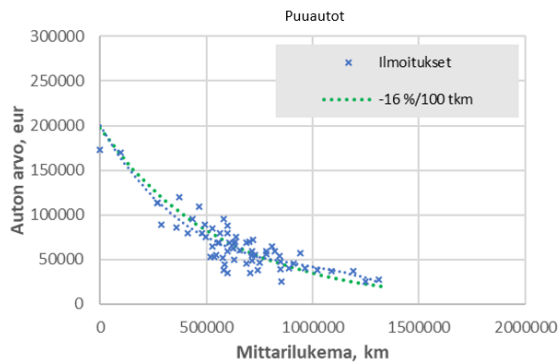
- Metsätehon laskelmissa vetoauton arvonalenemaksi eli vuosipoistoksi on oletettu kokoluokasta ja autotyyppistä riippumatta 25 %/v
- Puuautojen myynti-ilmoituksissa pyyntihinnat suhteessa auton ikään laskevat selvästi hitaammin, keskimäärin n. 20 %/v, hakeautoilla 23 %/v



Liite 2B. Selvitys vetoauton arvonalenemasta

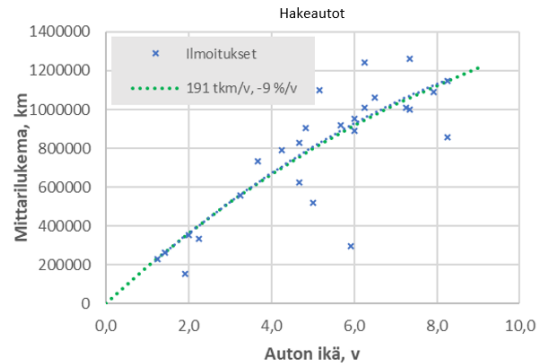
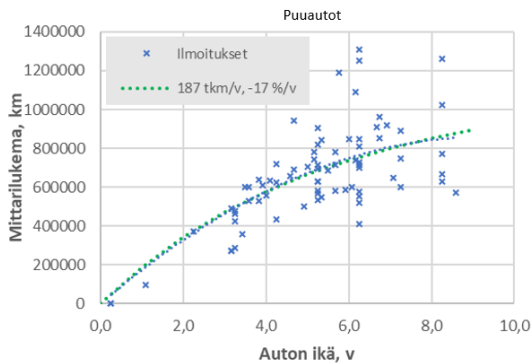
Arvonalenema ajokilometreihin suhteutettuna

- Autojen myynti-ilmoituksissa pyyntihinnat suhteessa kilometrilukemiin laskevat keskimäärin noin 16 %/100 tkm, puuautoilla aleneminen hidastuu kokonaisajokilometrien kasvaessa



Vuosittaiset ajokilometrit

- Myynti-ilmoitusten mittarilukemien perusteella puuautoille kertyy uutena ajokilometrejä keskimäärin n. 190 tkm/v, ja km-kertymä hidastuu 17 %/v
- Hakeutoilla ajokilometrejä kertyy uutena lähes samaa tahtia mutta km-kertymä pysyy vakaampana



Liite 3. Yhdistelmien polttoaineen kulutuksen seurantajaksot.

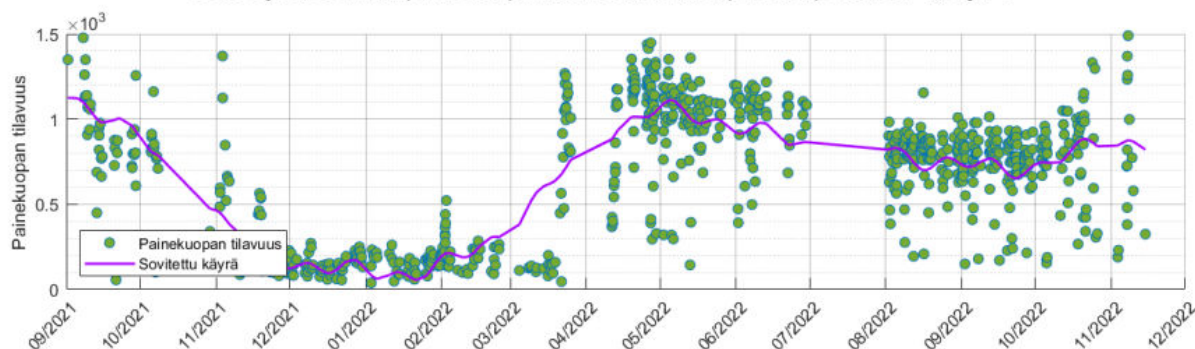
Ketonen ^T	Verrokki ^M	Orpe ^T (94 t)	Orpe ^T (100 t)	Verrokki ^T
7.10.2015- 30.9.2016	1.3.2014- 28.2.2015	1.10.2015- 30.9.2016	7.4–29.6.2022	1.10.2015- 30.9.2016
Hannonen ^{TA}	Hannonen ^{TB}	Verrokki ^{TA}	Verrokki ^{TB}	
13.6.2016- 31.5.2017	1.3.2021- 27.6.2022	13.6.2016- 25.11.2016	1.7–15.8.2022	
P&A Trans ^{MA}	P&A Trans ^{MB}	Verrokki ^M	Peltoniemi verrokki ^M	
1.6.2016- 14.6.2017	1.–30.4.2022, 1.6–15.7.2022	22.8.2016- 10.8.2017	1.4.2022- 15.7.2022	
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 ^{HA}	Huhtala ^{HB}	Verrokki ^{HA}	Verrokki ^{HB}	Konnekuljetus ^H
1.5.2017- 10.4.2018	*	19.6.2017- 28.11.2017	1.3.2018- 28.2.2019	3.9.2018- 30.3.2019
Sammalisto ^{HA}	Sammalisto ^{HB}	Verrokki ^{HB}	Wickström ^{HA}	Wickström ^{HB}
12.1-30.9.2018	19.12.2017- 30.9.2018, 1.11-19.12.2022	15.12.2017- 31.3.2018	1.7.2017- 4.6.2018	*

*Seuranta käynnistymässä

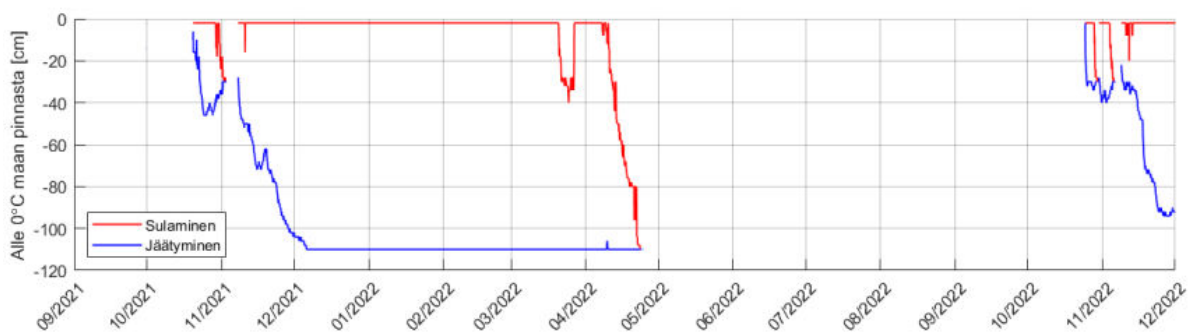
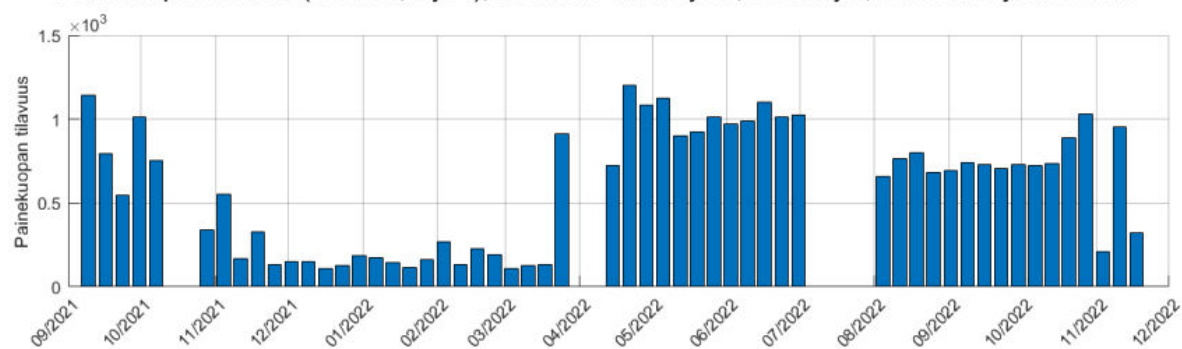
**Erillinen tutkimus (mm. Kärhä ym 2023)

Liite 4A. Maanpaine painekuopan tilavuuksina ilmaistuna 9-akselisilla yhdistelmillä vt 5:lla Sodankylässä (Niskanen ym. 2024)

9 aks. yhdistelmät, painekuopan tilavuudet, interpolointi paineista 1, 3 ja 4



Painekuopan tilavuus (anturit 1, 3 ja 4), keskiarvo viikon ajalta, Sodankylä, 9 akseliset yhdistelmät



Liite 4B. Maanpaine painekuopan tilavuuksina ilmaistuna 10-akselisilla yhdistelmillä vt 5:lla Sodankylässä (Niskanen ym. 2024)

