



HCT-puutavarayhdistelmien ajoseuranta- ja stabiliteettitutkimus

Vetoaisavoimamittaukset

Projektitutkija Ville Pirnes, Oulun yliopisto
Professori (emeritus) Mauri Haataja, Oulun yliopisto

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Tiivistelmä

Tämä raportti liittyy Oulun Yliopiston hankkeeseen HCT-puutavarayhdistelmien ajoseuranta- ja stabiiliteettitutkimus. Tutkimuksen osana on tutkittu ajoneuvoyhdistelmien perävaunujen vetoaisoihin kohdistuvia voimia. Vetoaisavoimia on mitattu Ketosen Kuljetuksen 104 tonnin, P&A Trans Oy:n 84 tonnin, Kuljetusliike O Malinen Oy:n 84 tonnin ja 76 tonnin kokonaismassan yhdistelmistä. Yhdistelmät ovat HCT-ajoneuvoyhdistelmiä lukuun ottamatta Malisen 76 tonnin kokonaismassan yhdistelmää, joka on tavanomainen 9-akselinen täysperävaunuyhdistelmä. 84 tonnin yhdistelmät ovat 10-akselisia täysperävaunuyhdistelmiä ja 104 tonnin 13-akselinen vetoauton, puoliperävaunun ja varsinaisen perävaunun yhdistelmä. Vetoaisavoimia on mitattu vetoaisoihin asennetuilla venymäliuskoilla.

Mitatut vetoaisavoimat on jaettu jälkikäsitellyssä digitaalisilla suodattimilla alle 0,5 Hz taajuiseen staattiseen osaan ja 0,5–10 Hz dynaamiseen osaan. Staattiset voimat ovat ajettavasta tietyypistä riippuvaisia. Dynaamiset voimat ovat suurimmillaan ajettaessa maantiellä. Yhdistelmistä mitattiin satunnaisesti jopa yli 100 kN suuruisia yksittäisiä dynaamisia voimia. Tuloksissa puristus on negatiivinen voima ja veto positiivinen voima.

Kuljetusliike O Malisen 84 t HCT-yhdistelmän matalataajuiset (alle 0,5 Hz) aisavoimat valta- ja kantateillä olivat karkeasti arvioiden pääasiassa välillä -4–16 kN (minimi -21 kN, maksimi 57 kN), muilla yleisillä teillä -4–18 kN (minimi -55 kN, maksimi 91 kN), 21 km matkalla sorateita -4–20 kN (minimi -19 kN, maksimi 50 kN) ja metsäautoteillä -4–20 kN (minimi -54 kN, maksimi 50 kN).

Kuljetusliike O Malisen 76 tonnin täysperävaunuyhdistelmästä mitatut matalataajuiset voimat valta- ja kantateillä olivat karkeasti arvioiden pääasiassa välillä -2–14 kN (minimi -55 kN, maksimi 76 kN), muilla yleisillä teillä -4–16 kN (minimi -51 kN, maksimi 69 kN), sorateilla -4–18 kN (minimi -45 kN, maksimi 71 kN) ja metsäautoteillä -4–20 kN (minimi -47 kN, maksimi 46 kN). Kun 84 t yhdistelmän tuloksissa otetaan huomioon ainoastaan suoraan ajettaessa mitatut vetoaisavoimat, lähentyvät tulokset 76 t yhdistelmän tuloksia. Tällöinkin HCT-yhdistelmän vetoaisavoimat ovat jakautuneet laajemmalle alueelle kuin 76 t yhdistelmässä.

Kuljetusliike O Malisen yhdistelmien 0,5–10 Hz taajuiset aisavoimat olivat pääosin -8 ja 8 kN välillä molemmissa yhdistelmissä kaikilla tiettyypeillä. Minimiarvot (puristusvoima) korkeataajuisissa voimissa olivat molemmissa yhdistelmissä lähellä toisiaan, suurin mitattu puristus oli molemmissa yhdistelmissä -98 kN. Suurin korkeataajuinen vetovoima oli 84 t yhdistelmässä suurempi kuin 76 t yhdistelmässä.

P&A Trans Oy:n HCT-yhdistelmässä alle 0,5 Hz pituussuuntaiset aisavoimat valtatieolosuhteissa marras-joulukuussa 2016 olivat karkeasti arvioiden pääasiassa välillä -2–16 kN (minimi -18 kN, maksimi 57 kN), ja tammikuussa 2017 välillä -6–16 kN (minimi -36 kN, maksimi 53 kN). Metsäautoteillä matalataajuiset voimat marras-joulukuussa 2016 olivat karkeasti arvioiden pääasiassa välillä -2–22 kN (minimi -34 kN, maksimi 51 kN), ja tammikuussa 2017 välillä -4 – 20 kN (minimi -44 kN, maksimi 65 kN). Korkeataajuiset (0,5-10 Hz) voimat valtatieolosuhteissa marras-joulukuussa 2016 olivat pääasiassa välillä -6–4 kN (minimi -112 kN, maksimi 128 kN) ja tammikuussa 2017 -8–6 kN (minimi -127 kN, maksimi 126 kN). Metsäautoteillä vastaavat lukemat olivat molemmilla ajanjaksoilla -8–8 kN (minimi -101 kN, maksimi 97 kN).

Ketosen Kuljetuksen HCT-yhdistelmän matalataajuiset voimat kesäkuukausina 2016 olivat pääasiassa välillä -2–14 kN (minimi -24 kN, maksimi 51 kN) ja talvikuukausina 2017 -4–18 kN (minimi

-62 kN, maksimi 42 kN). Dynaamiset voimat ovat kesäkuukausina 2016 pääasiassa olleet -6–6 kN välillä (minimi -123 kN, maksimi 94 kN) ja talvikuukausina 2017 -8–8 kN (minimi -85 kN, maksimi 170 kN). Ketosen Kuljetuksen HCT-yhdistelmässä oli lisäksi havaittavissa muita tutkittuja yhdistelmiä enemmän puristusvoimia.

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. Lisäksi Ketosen Kuljetuksen 104 t HCT-yhdistelmässä esiintyi alle 0,5 Hz taajuisia puristusvoimia muita yhdistelmiä enemmän.

Asiasanat: HCT-ajoneuvoyhdistelmä, vetoaisa, voimamittaus

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Alkusanat

Tämä vetoaisavoimia käsittelevä tutkimus liittyy Oulun yliopiston laajaan HCT-puutavarayhdistelmien EAKR-rahoitteiseen tutkimusprojektiin, jossa selvitetään HCT-puutavarayhdistelmien ominaisuuksia mittauksin ja simuloinnein. Tässä, vetoaisavoimia käsittelevässä osiossa on mitattu neljän eri yhdistelmän vetoaisavoimat tavallisissa, jokapäiväisissä ajotehtävissä.

Haluamme erityisesti kiittää kaikkia tutkimukseen osallistuneita kuljetusyrityksiä: Ketosen Kuljetus Oy:tä, P&A Trans Oy:tä ja Kuljetusliike O Malista ja niiden henkilökuntaa tutkimukseen osallistumisesta.

Oulu, 17.8.2018

Ville Pirnes

Mauri Haataja

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	2
Alkusanat.....	4
Sisällysluettelo	5
Merkinnät ja lyhenteet.....	6
Johdanto	7
Tutkimusyhdistelmien anturointi.....	8
Kalibrointi	10
Tulokset	12
Kuljetusliike O Malisen yhdistelmät.....	13
P&A Trans Oy:n 84 tonnin kokonaismassan HCT-yhdistelmä	21
Ketosen Kuljetus Oy:n 104 tonnin kokonaismassan HCT-yhdistelmä	24
Yhteenveto.....	29

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Merkinnät ja lyhenteet

ACL	Advanced Central Logger
CAN	Controller Area Network
GPS	Global Positioning System
HCT	High Capacity Transport
SVIM	Synchronous Versatile Input Module
R	Resistor, vastus tai venymäliuska
U_A	mitattava jännite
U_E	mittaussillan syöttöjännite
U_{nol}	jännite nollakohdassa
F	aisavoima
F_{kal}/u	kalibroinnissa määritetty skaalauskerroin

Johdanto

Raskaaseen kuljetuskalustoon kohdistuvista rasituksista on julkaistu varsin vähän tutkimustuloksia. Varsinkaan todellisissa käyttöolosuhteissa mitattuja kuormituksia ei juurikaan ole saatavilla. HCT-yhdistelmien tutkimus on antanut oivan mahdollisuuden tutkia kalustoon kohdistuvia kuormituksia. Tässä raportissa on esitelty neljästä eri puutavaran kuljetusyhdistelmästä mitattuja vetoaisavoimia. Kolme yhdistelmistä on HCT-yhdistelmiä ja yksi tavanomainen 76 tonnin kokonaismassan täysperävaunun yhdistelmä.

Vetoaisavoimat on mitattu aisoihin liimatuilla venymäliuskoilla, mikä on yleinen käytäntö tämänkaltaisissa tutkimuksissa. VBG yhtiön esimerkin mukaan tässä tutkimuksessa mitatut vetoaisavoimat on jaettu matalataajuisiin, lähes staattisiin ja korkeamman taajuisiin dynaamisiin voimiin. VBG yhtiön edustaja on vieraillut Oulun yliopistossa tutustumassa mittauksiin toukokuussa 2016 ja tuloksia on käyty esittelemässä Ruotsissa VBG:n tehtaalla helmikuussa 2018.

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

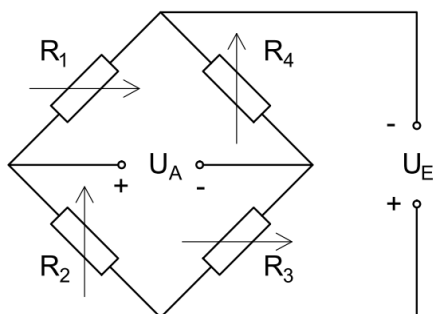
Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



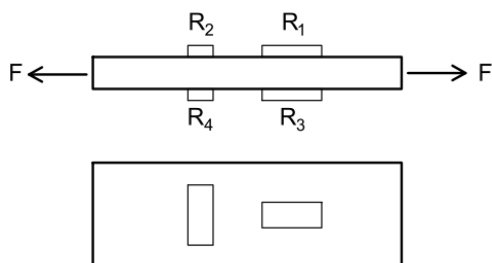
Tutkimusyhdistelmien anturointi

Vetoaisavoimia mitattiin vetoaisoihin liimatuilla venymäliuskoilla. Käytetyt venymäliuskat olivat Kyowan kahteen suuntaan mittaavia KFG-5-120-D16-11-L3M3S-liuskoja. Liuskojen liuskavakio oli $2,09 \pm 1,0 \%$; pituus 5 mm ja vastus $120,4 \pm 0,4 \Omega$. Liuskojen liimaukseen käytettiin Kyowan venymäliuskaliimaa CC-33A. Kuvassa 1 on esitetty mittauksissa käytetty venymäliuskojen kytkentäperiaate (Wheatstonen siltakytkentä). R_1 , R_2 , R_3 ja R_4 ovat venymäliuskoja. U_E on mittaussillan syöttöjännite ja U_A mitattava jännite. Sijoittamalla liuskat sopivasti saatiin erotettua aisapalkin pitkittäissuuntainen ja poikittaissuuntainen kuormitus toisistaan. Kytkennällä saatiin aikaan myös lämpötilakompensointi, ts. metallin lämpölaajeneminen ei vaikuttanut mittaustuloksiin.

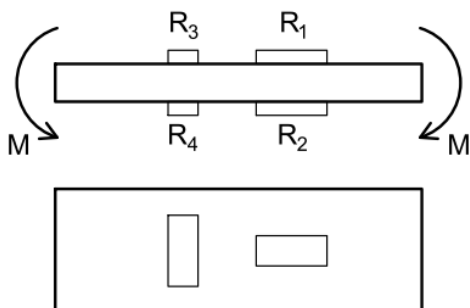
Pitkittäisvoiman mittauksessa käytettiin kuvassa 2 esitettyä venymäliuskojen sijoitusta (akσιαalisen venymän mittausta), jossa taivutusmomentin vaikutus venymään eliminoidtiin pois. Poikittaisvoiman mittauksessa käytettiin kuvassa 3 esitettyä taivutuksen mittausta, jossa aksiaalisen voiman vaikutus venymään eliminoidtiin pois.



Kuva 1. Venymäliuskojen kytkentäperiaate.

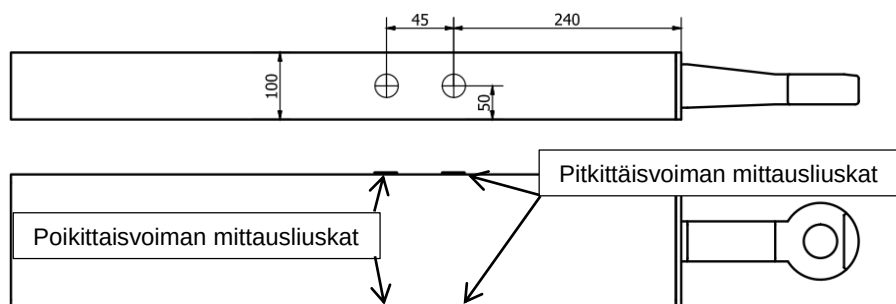


Kuva 2. Venymäliuskojen sijoitusperiaate aksiaalisen venymän mittauksessa.

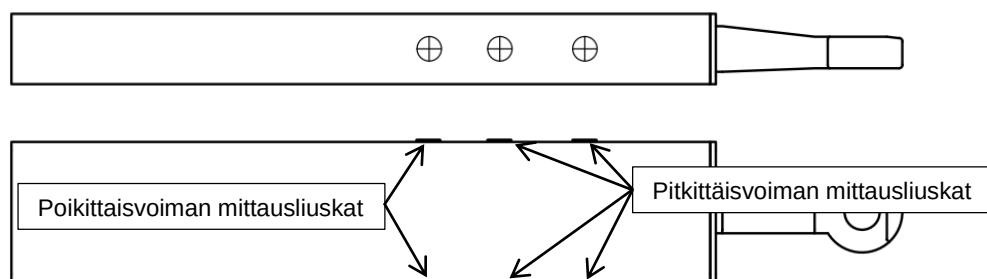


Kuva 3. Venymäliuskojen sijoitusperiaate taivutuksen mittauksessa.

Ketosen Kuljetuksen ja P&A Transin yhdistelmissä aisavoiman mittaus kytkettiin yhdistelmiin asennettuihin ajodynamiikan mittausjärjestelmiin. Mittausjärjestelmä koostui Motec ACL tiedonkeruuyksiköstä, CAN-väylistä ja niihin liitetystä mittauslaitteista. Venymäliuskat kytkettiin Motec SVIM-moduuliin. Moduuli lähetti mittaustulokset CAN-väylää pitkin ohjaamoon ACL:ään. Ketosen Kuljetuksen yhdistelmässä venymäliuskamittauksen siltajännite 5V alennettiin ajoneuvon akkujännitteestä DC-DC jännitemuuntimella. P&A Transin yhdistelmässä venymäliuskasillat kytkettiin SVIM:n 5 V jänniteulostuloon. Mittaustaajuus venymäliuskamittauksissa oli 100 Hz. Kuvissa 4 ja 5 on esitetty venymäliuskojen sijoitus Ketosen Kuljetuksen ja P&A Trans Oy:n yhdistelmien täysperävaunujen vetoaisoihin.

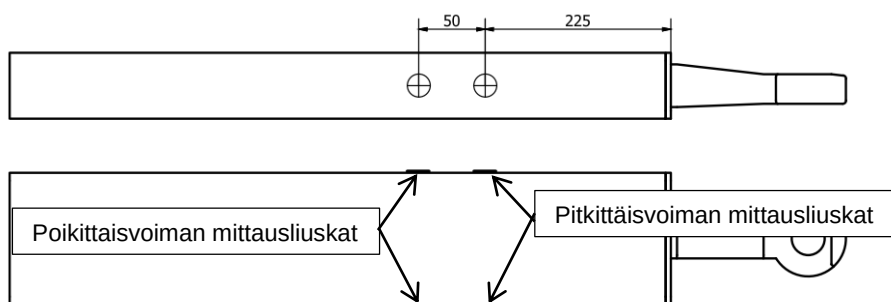


Kuva 4. Venymäliuskojen sijoitus Ketosen Kuljetuksen HCT-yhdistelmässä.

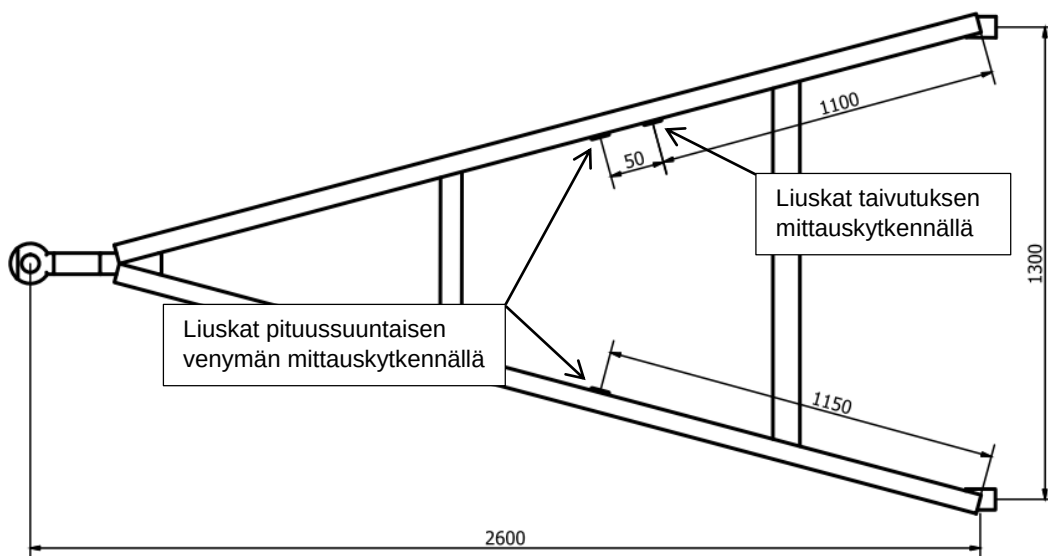


Kuva 5. Venymäliuskojen sijoitus P&A Trans Oy:n HCT-yhdistelmässä.

Kuljetusliike O Malisen yhdistelmissä mittausjärjestelmä koostui MoTeC C185 tallentavasta näytöstä, GPS:stä ja SVIM-moduulista. Tallentava näyttö ja GPS sijoitettiin ohjaamoon ja SVIM vetoaisalle. SVIM-moduulilla mitattiin liuskojen venymän seurauksena siltakytkennässä tapahtuva jännitteen muutos. Tallentava näyttö ja SVIM yhdistettiin CAN-väylällä toisiinsa. Venymäliuskasilltojen siltajännite kytkettiin SVIM:n 5 V jänniteulostuloon. Mittaustaajuus mittauksissa oli 100 Hz. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty venymäliuskojen sijainnit Kuljetusliike O Malisen yhdistelmien vetoaisoissa.



Kuva 6. Venymäliuskojen sijoitus Kuljetusliike O Malisen HCT-yhdistelmässä.



Kuva 7. Venymäliuskojen sijoitus Kuljetusliike O Malisen 76 tonnin yhdistelmässä (vertailuyhdistelmä).

Kalibrointi

Ketosen kuljetuksen 104 tonnin yhdistelmän voimamittauksiin käytettävät venymäliuskat kalibroitiin 12.3.2016 järjestettyjen ajokokeiden yhteydessä. Vetoaisan venymäliuskojen kalibroinnissa täyteen kuormattua täysperävaunua vedettiin aisasta pyöräkuormaaajalla nostoliinoilla. Liinojen välissä oli 200 kN voima-anturi. Venymäliuskat oli kytketty samaan mittauslaitteistoon voima-anturin kanssa. Mittaukseen käytettiin National Instrumentsin NI cRIO-9014:ään liitettyä mittausmodulia NI 9237 ja siihen liitettyä Microstar Laboratories MSTB 24764 mittauskorttia. Vetoaisaa vedettiin suoraan aisan suunnassa, sekä 10° ja 90° kulmassa pituussuuntaan nähden. Aisaa vedettiin niin suurella voimalla kuin pyöräkuormaaajan pyörät pitivät jäisellä alustalla. Kuormitusta nostettiin asteittain. 90° kulman tulostiedosto osoittautui myöhemmin tyhjäksi, joten sitä ei voitu kalibroinnissa käyttää.

Vetopöytään kohdistuvan pystyvoiman mittaukseen tarkoitetut venymäliuskat kalibroitiin kuormauksen yhteydessä vertaamalla auton mittaristosta auton päälle kuormattavaa massaa ja venymäliuskoista mitattua jännitettä. Pitkittäissuunta kalibroitiin vetämällä pyöräkuormaaajalla puoliperävaunua vetokytkimestä suoraan taakse. Vetovoima mitattiin samalla voima-anturilla ja mittausjärjestelmällä kuten vetoaisan kalibroinnissa. Venymäliuskoissa tapahtuva jännitemuutos mitattiin yhdistelmään asennetulla mittalaitteistolla. Vetopöydän poikittaissuunnan kalibroinnissa vedettiin yhdistelmää sivulle vetopöydän kohdalta kuormassa olleesta tukista. Kalibroinnissa saadut

kertoimet on esitetty taulukossa 1. Vetopöydän kalibrointikertoimiin on syytä suhtautua varauksella. Venymäliuskojen sijainnin vuoksi vetopöytään kohdistuva pystykuorma vaikuttaa pitkittäisvoiman mittaustuloksiin ja päinvastoin. Kyseisen ongelman vuoksi vetopöydän mittaustulokset on toistaiseksi jätetty käsittelemättä. Vetoaisan kalibrointikertoimet ovat riippumattomia mittaussillan siltajännitteestä.

Taulukko 1. Ketosen Kuljetus, 104-tonnin HCT-yhdistelmä, kalibroinnin tulokset

Mittauskohde	Skaalauskerroin
Vetoaisa, pitkittäisvoima	525,2 kN/mV/V
Vetoaisa, poikittaisvoima	85,6 kN/mV/V
Vetopöytä, pitkittäisvoima	48,55 kN/mV
Vetopöytä, poikittaisvoima	186,92 kN/mV
Vetopöytä, pystyvoima	79,62 kN/mV

P&A Trans Oy:n 84 tonnin kokonaismassan HCT-yhdistelmän vetoaisavoimamittaukset kalibroitiin 20.12.2016. Mittausjärjestely oli samanlainen kuin Ketosen Kuljetuksen yhdistelmän kalibroinnissa. Pyöräkuormaajan sijasta käytettiin aisan vetämiseen yhdistelmän vetoautoa. Kuljetusliike O Malisen yhdistelmät kalibroitiin 26. ja 27.1.2017 samanlaisella mittausjärjestelyllä kuin P&A Trans Oy:n HCT-yhdistelmä. Kalibrointien tulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. P&A Trans Oy:n ja Kuljetusliike O Malisen tutkimusyhdistelmien aisavoimamittausten kalibroinnin tulokset

Mittauskohde	Skaalauskerroin
P&A Trans 84-t. HCT-yhdistelmä, vetoaisa, pitkittäisvoima	601,4 kN/mV/V
P&A Trans 84-t. HCT-yhdistelmä, vetoaisa, poikittaisvoima	103,8 kN/mV/V
Kuljetusliike O Malinen 84-t. HCT-yhdistelmä, aisa, pitkittäisvoima	540,2 kN/mV/V
Kuljetusliike O Malinen 84-t. HCT-yhdistelmä, aisa, poikittaisvoima	220,4 kN/mV/V
Kuljetusliike O Malinen 76-t. yhdistelmä, aisa, pitkittäisvoima	648,9 kN/mV/V

Tulokset

Tulokset käsiteltiin Motec i2Pro ja Mathworks Matlab -ohjelmistoilla. Tulokset muunnettiin jännitteestä voimaksi kaavalla:

$$F = \frac{(U_A - U_{nol})}{U_E} \cdot \frac{F_{kal}}{u},$$

missä F on aisavoima [kN],

U_A on mitattu jännite [mV],

U_{nol} on jännite nollakohdassa [mV],

U_E on siltajännite [V] ja

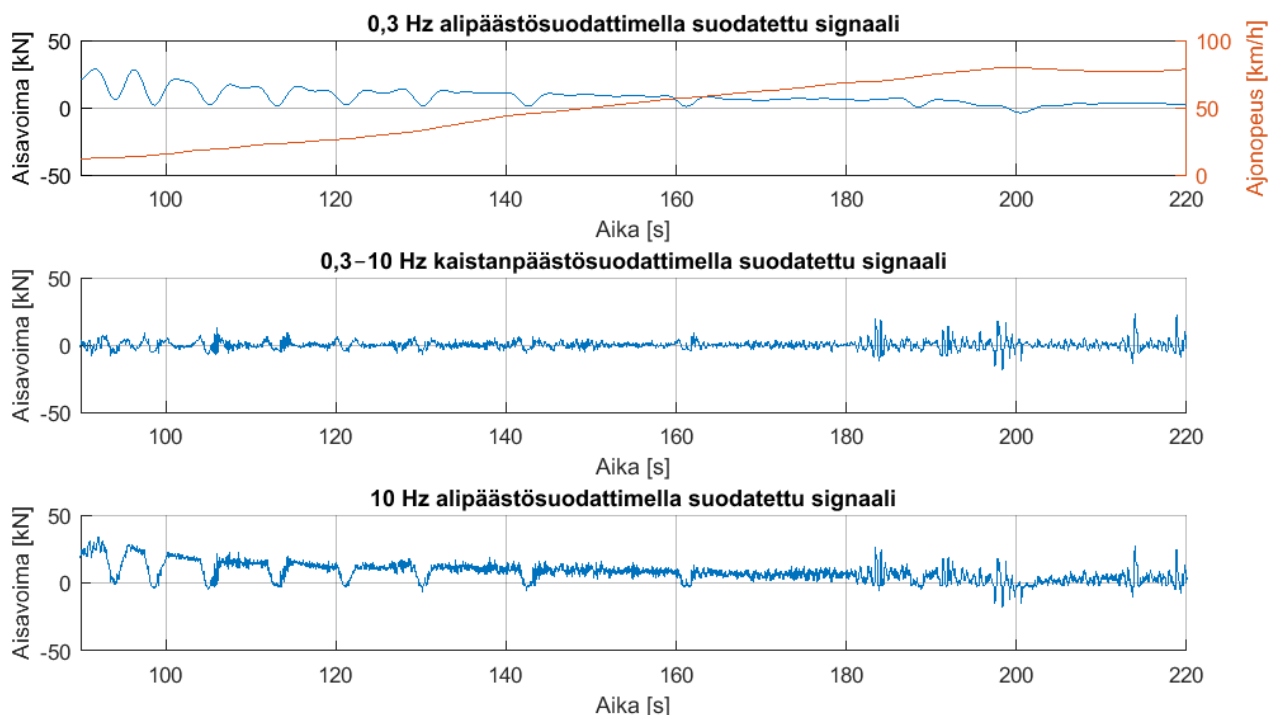
F_{kal}/u on kalibroinnissa saatu skaalauskerroin [kN/mV/V].

Skaalauskerroimet on esitetty edellisessä kappaleessa. Mittausten nollakohta vaihtelee, joten se on tarkastettu tuloksille erikseen. Siltajännitteinä on käytetty seuraavia arvoja:

Taulukko 3. Mittausten siltajännitteet.

Mittauskohde	Siltajännite
Ketosen Kuljetus 104-t. HCT-yhdistelmä, vetoaisa	4,77 V
P&A Trans 84-t. HCT-yhdistelmä, vetoaisa	5,00 V
Kuljetusliike O Malinen 84-t. HCT-yhdistelmä, vetoaisa	5,00 V
Kuljetusliike O Malinen 76-t. yhdistelmä, vetoaisa	5,00 V

Aisaan vaikuttavat yhdistelmän vetoauton veto- tai jarrutusvoimat, perävaunujen ajovastukset, sekä perävaunun ja vetoauton suhteellisesta liikkeestä aiheutuvat voimat (tärähdykset). Vetoauton vedosta tai jarrutuksesta aiheutuvat aisavoimat tapahtuvat pienellä taajuudella ja ajoneuvoyksiköiden välisestä suhteellisesta liikkeestä aiheutuvat voimat usein korkealla taajuudella. Täten mittaustuloksista on erotettu suodatuksella alle 0,5 Hz tapahtuvat aisavoimat ja 0,5–10 Hz taajuusalueella tapahtuvat aisavoimat toisistaan. Suodattimena on ollut 4. asteen Butterworth ali- tai kaistanpäästösuodatin. Suodattamisessa on käytetty vaihesiirrotonta suodatusta, jossa signaali suodatetaan molemmista suunnista, jolloin 4. asteen suodatin vastaa 8. asteen suodatinta. Alipäästösuodatin poistaa signaalista rajataajuutta (0,5 Hz) suuremmat taajuudet ja kaistanpäästösuodatin poistaa rajataajuuksien ylä- ja alapuoliset taajuudet. Rajataajuus 0,5 Hz on valittu vertaamalla ali- ja ylipäästösuodattimilla suodatettua ajan suhteen tulostettua signaalia alkuperäiseen signaaliin. Kyseisellä rajataajuudella vaihtenvaihdosta aiheutuva aisavoiman hetkellinen pienentyminen kirjautuu alle 0,5 Hz taajuudella tapahtuviin aisavoimiin.



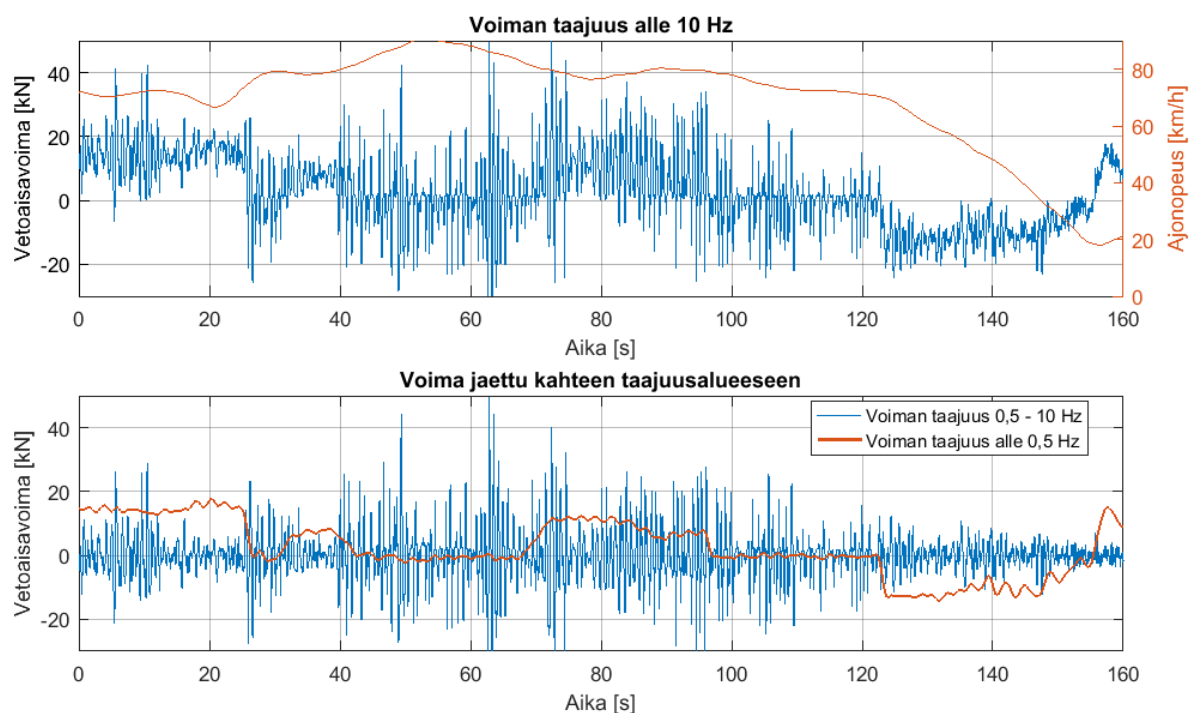
Kuva 8. Suodattimien vertailu.

Kuvassa 8 on havainnollistettu eri suodattimilla suodatettuja signaaleja ajan suhteen. Kuvassa on esitetty kiihdytystilanne. Havaitaan, että vaihtenvaihdon aikana alipäästösuodattimella suodatetussa signaalissa on selvä muutos ja kaistanpäästösuodattimella suodatetussa signaalissa puolestaan ei ole juurikaan muutosta. Korkeammalla ajonopeudella ajanhetken 180 s jälkeen on havaittavissa yli 0,3 Hz taajuisia värähtelyä, joka havaitaan kaistanpäästösuodattimella suodatetussa signaalissa, mutta ei 0,3 Hz alipäästösuodattimella suodatetussa signaalissa. Tässä esitetyssä esimerkissä käytetty 0,3 Hz rajataajuus on havaittu kuitenkin liian pieneksi taajuudeksi, jotta vaihtenvaihto selkeästi kirjautuisi rajan toiselle puolelle. Tulosten viimeisimmässä käsittelyssä onkin käytetty rajataajuutena 0,5 Hz.

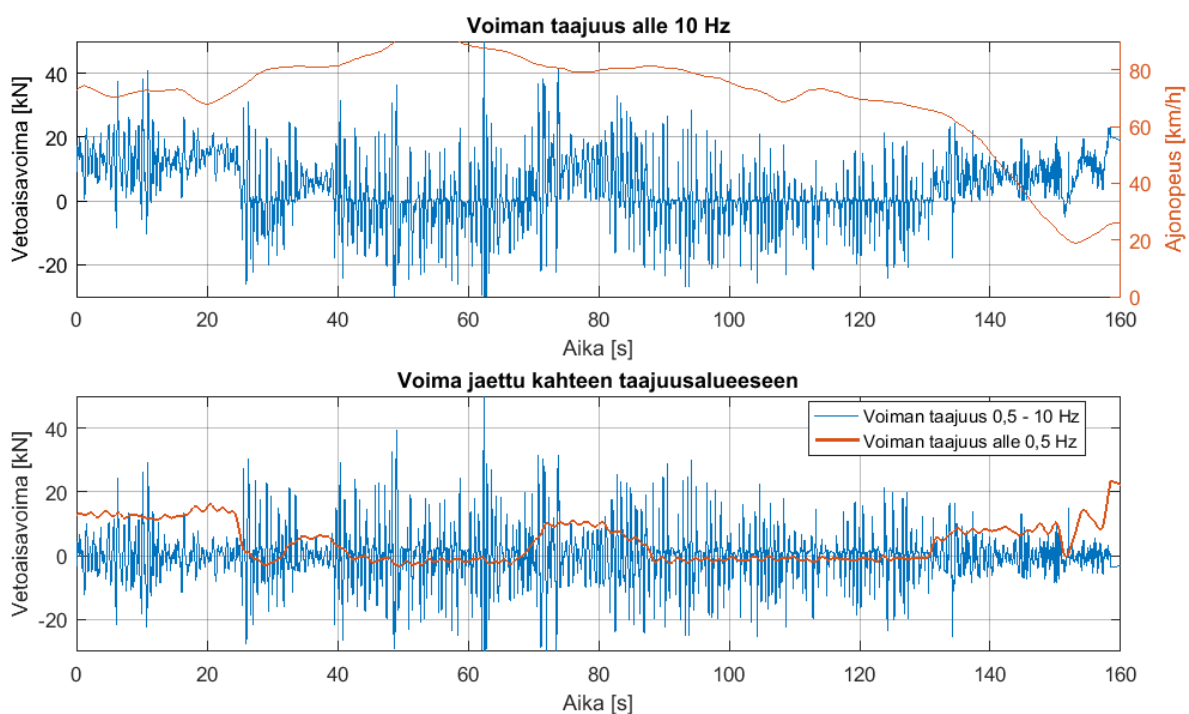
Suodatetuista tuloksista on laadittu histogrammit erikseen alle 0,5 Hz taajuisille voimille ja 0,5–10 Hz taajuisille voimille. Histogrammeissa yksi luokka (palkin leveys) on 1 kN suuruinen. Kuljetusliike O Malisen 76 tonnin yhdistelmän perävaunun vetoaisan rakenteen ja toteutetun venymäliuskoitustavan vuoksi kaarteissa mitattuja vetovoimatuloksia ei voida pitää luotettavana. Täten kyseisen yhdistelmän tuloksissa on huomioitu ainoastaan suoraan ajettaessa mitatut voimat. Tuloksia tarkastellessa on hyvä myös huomata, että yli 85 kN (karkea arvio) voimat ovat yksittäistapauksia.

Kuljetusliike O Malisen yhdistelmät

Kuljetusliike O Malisen 84 tonnin kokonaismassan HCT-yhdistelmän mittaustulokset ovat ajalta 22.12.2016–26.1.2017 ja 76 tonnin yhdistelmän 31.1.–3.3.2017.



Kuva 9. Kuljetusliike O Malisen 84-t. HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoima maantiellä ja hidastuksessa 25.1.2017 Uimaharjulla.



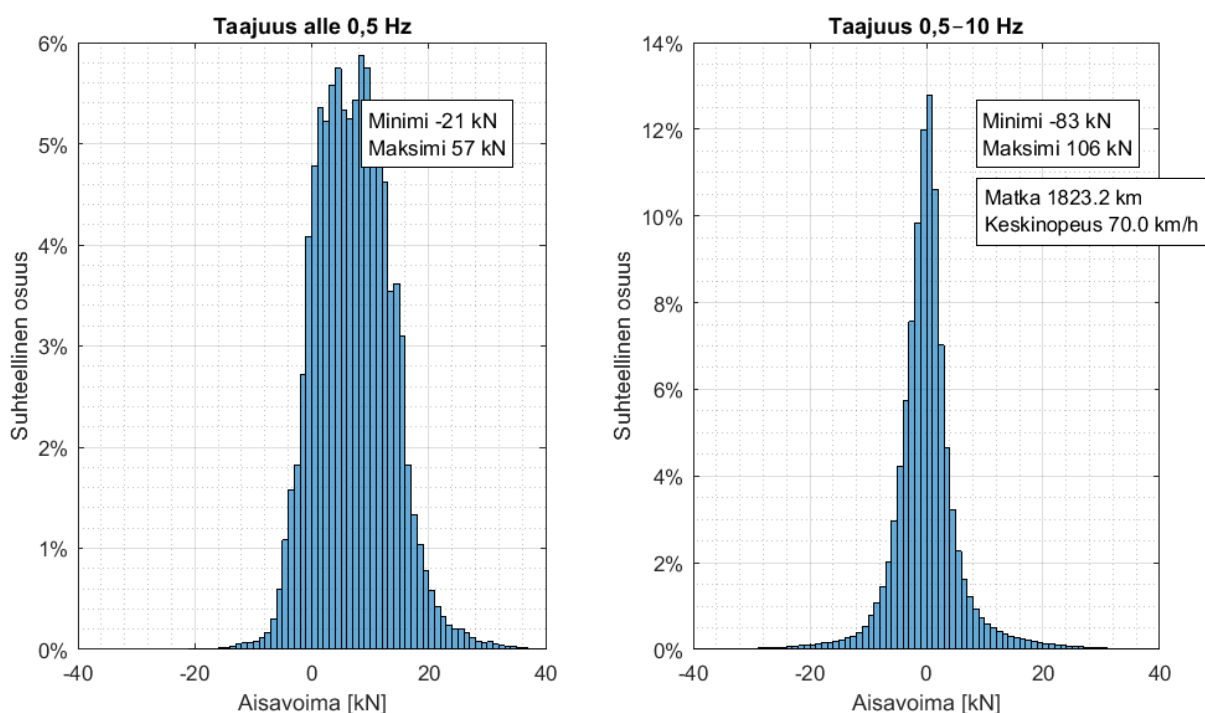
Kuva 10. Kuljetusliike O Malisen 84-t. HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoima maantiellä ja hidastuksessa 17.1.2017 Uimaharjulla.

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

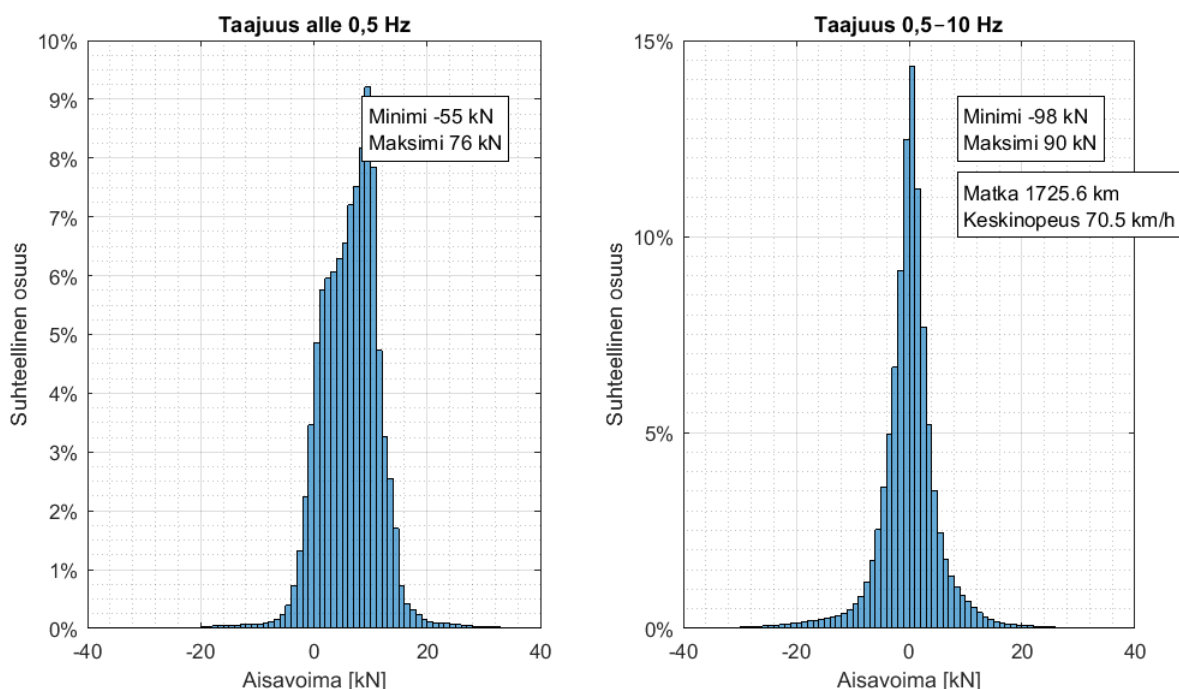
Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Kuvissa 9 ja 10 on havainnollistettu kaksi erilaista vetoaisavoiman tapausta hidastuksessa. Maantienopeudessa vetoaisavoima on ollut molemmissa tilanteissa lähes sama. Toisaalta hidastuksessa kuvan 9 tapauksessa vetoaisassa on ollut puristusta ja kuvan 10 tapauksessa vetoa n. 10 kN.

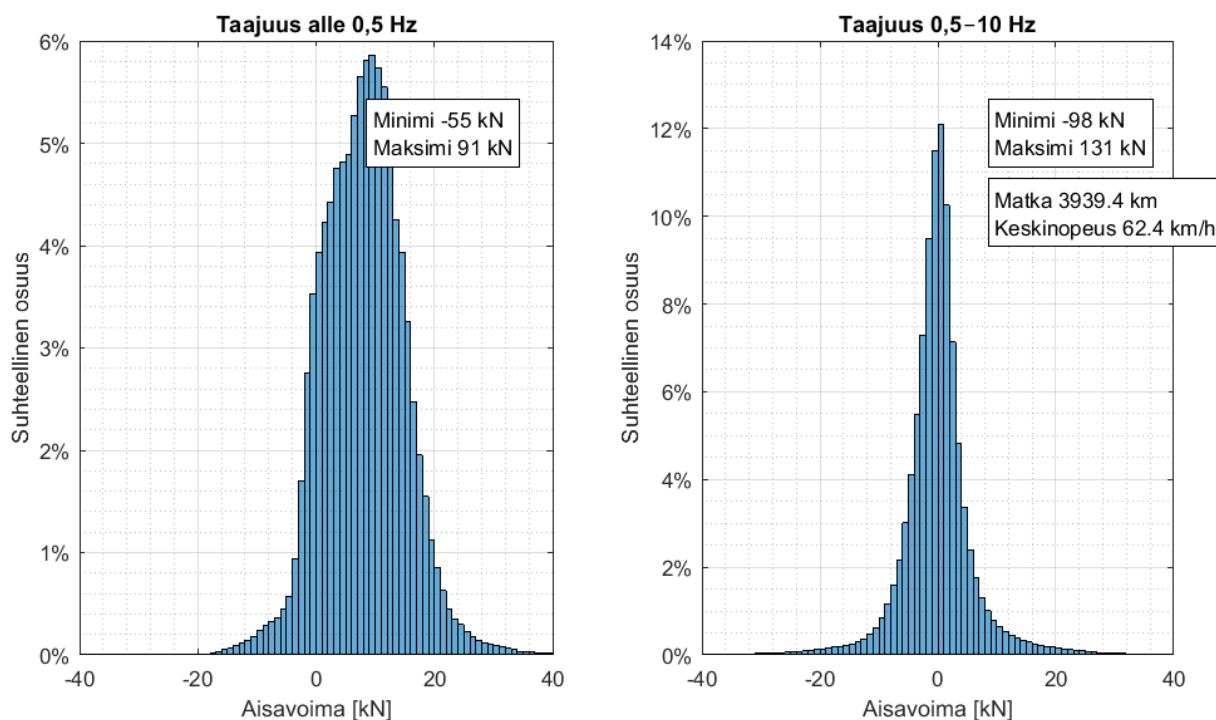


Kuva 11. Kuljetusliike O Malisen 84-t. HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat valta- ja kantateillä.

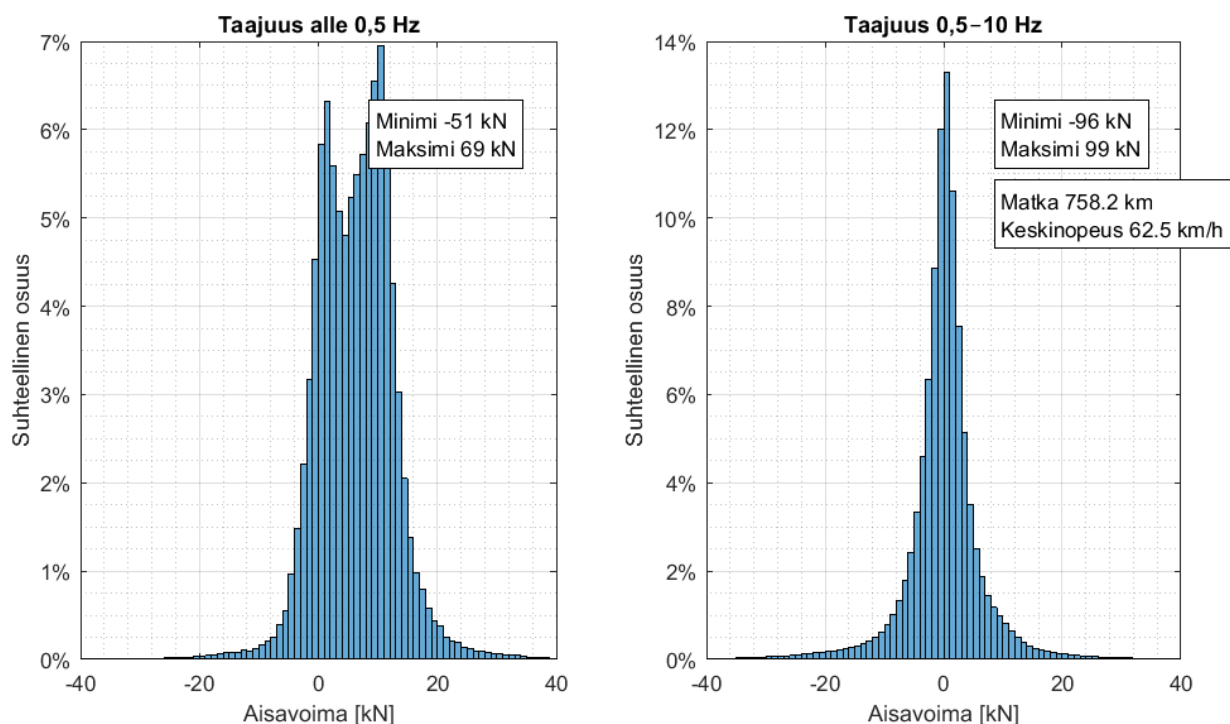


Kuva 12. Kuljetusliike O Malisen 76-t. yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat valta- ja kantateillä.

Kuvissa 11 ja 12 on esitetty Kuljetusliike O Malisen tutkimusyhdistelmistä mitatut pituussuuntaiset vetoaisavoimat valta- ja kantateillä. Havaitaan, että HCT-yhdistelmän vetoaisavoimat ovat jakaantuneet laajemmalle alueelle kuin tavanomaisen yhdistelmän. Suurimmat arvot esiintyvät taajuusalueella 0,5–10 Hz.

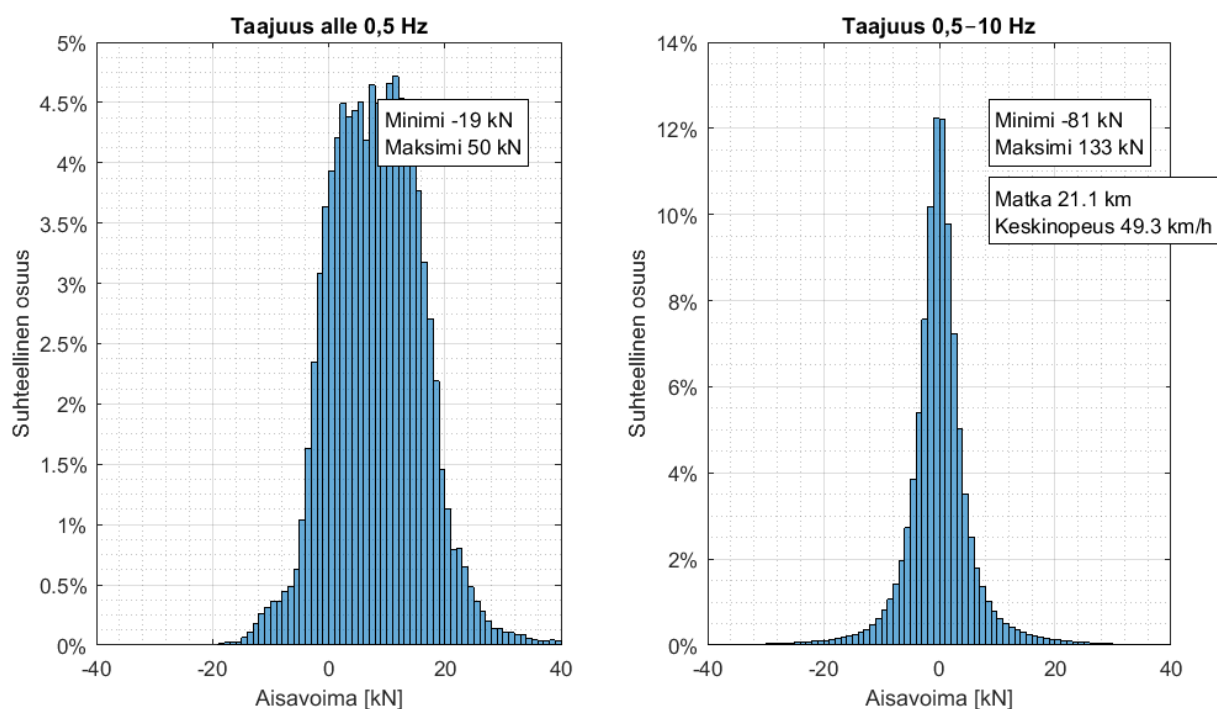


Kuva 13. Kuljetusliike O Malisen 84-t. HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat muilla yleisillä, päällystetyillä teillä.

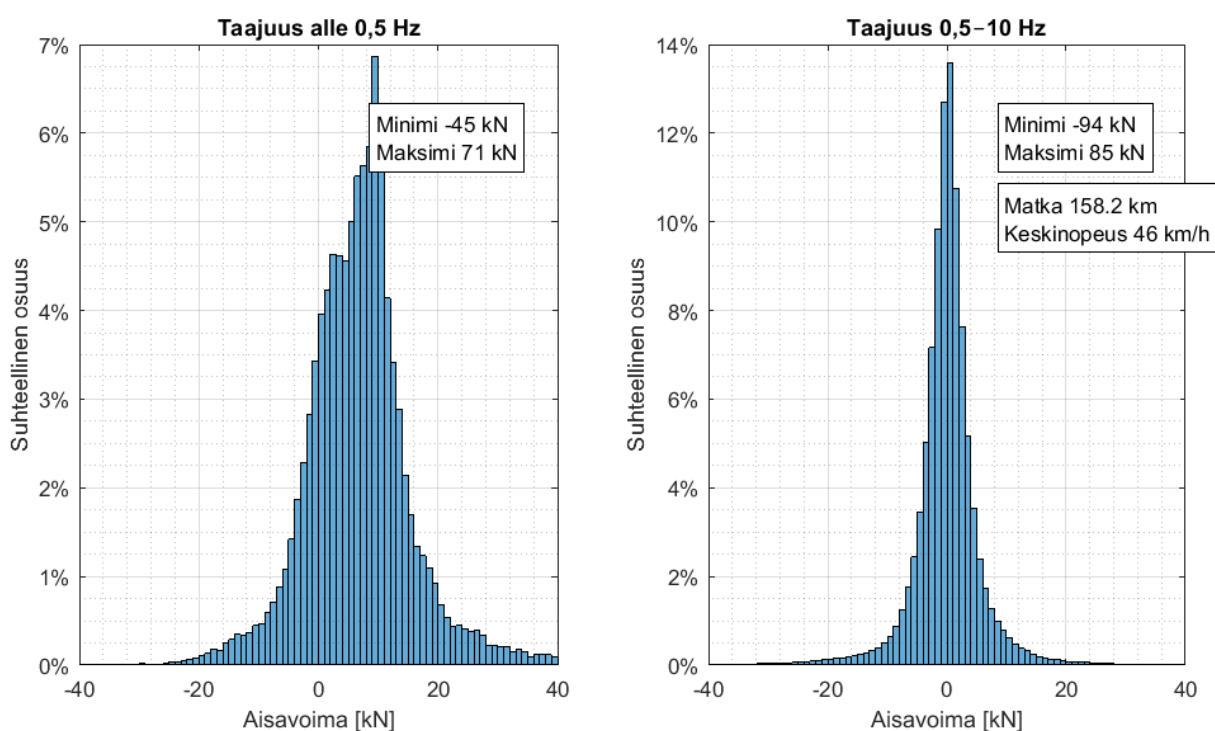


Kuva 14. Kuljetusliike O Malisen 76-t. yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat muilla yleisillä, päällystetyillä teillä.

Kuvissa 13 ja 14 on esitetty Kuljetusliike O Malisen tutkimusyhdistelmistä mitatut pituussuuntaiset aisavoimat muilla yleisillä (päällystetyillä) teillä, kuin valta- ja kantateillä. Molempien yhdistelmien voimajakaumat ovat samankaltaiset. HCT-yhdistelmässä on esiintynyt enemmän yli 12 kN voimia kuin 76-tonnin yhdistelmässä.



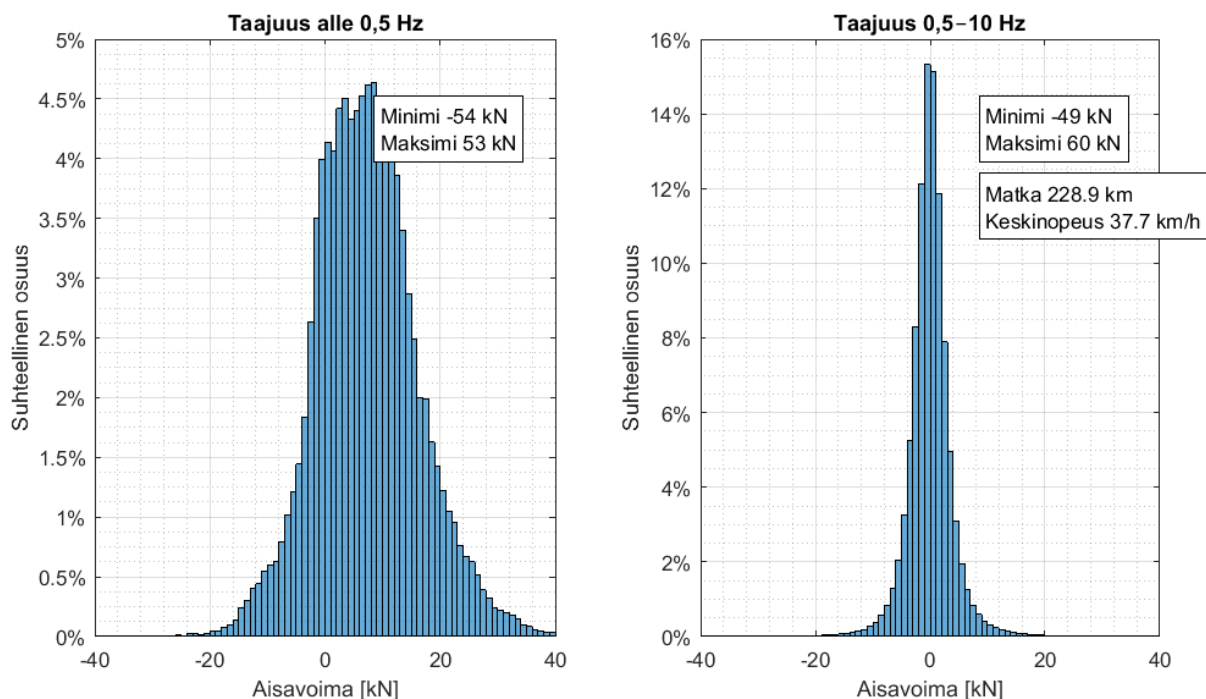
Kuva 15. Kuljetusliike O Malisen 84-t. HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat sorateilla (huomaa lyhyehkö mittausmatka).



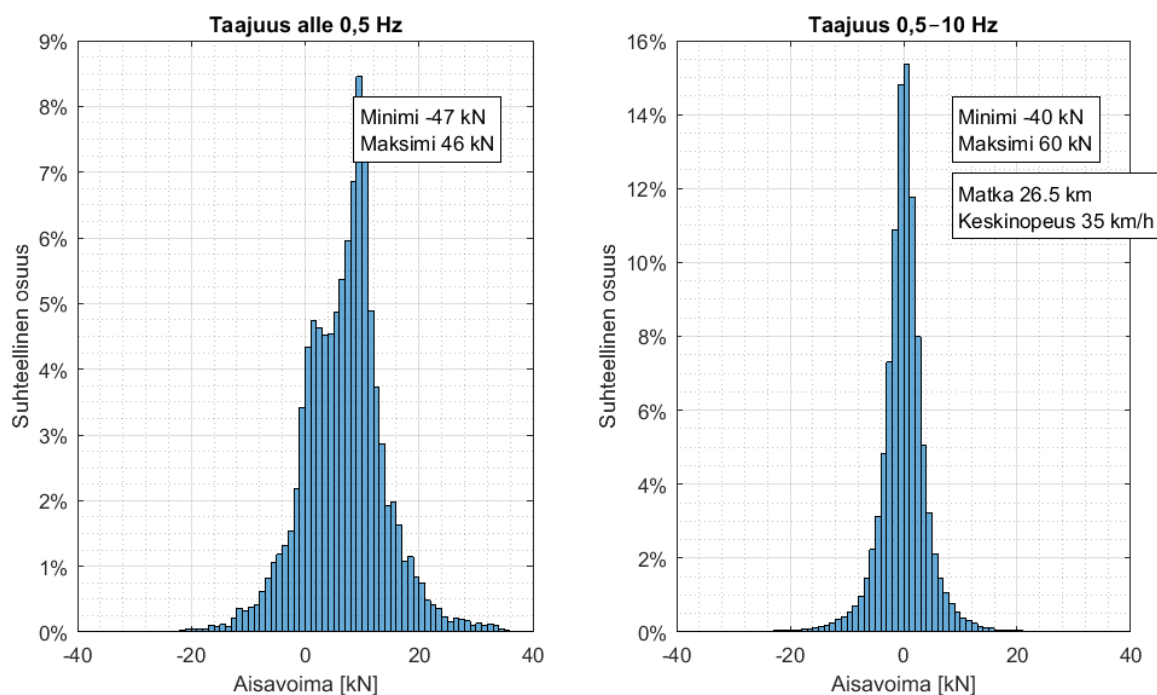
Kuva 16. Kuljetusliike O Malisen 76-t. yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat sorateilla.

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty Kuljetusliike O Malisen yhdistelmien pituussuuntaiset aisavoimat sorateilla. Sorateilla tarkoitetaan yleisiä, päällystämättömiä teitä. Metsäautoteiden tulokset on

esitetty erikseen. Havaitaan, että matalataajuiset voimat ovat HCT-yhdistelmässä jakautuneet suuremmalle alueelle kuin 76 t. yhdistelmässä.



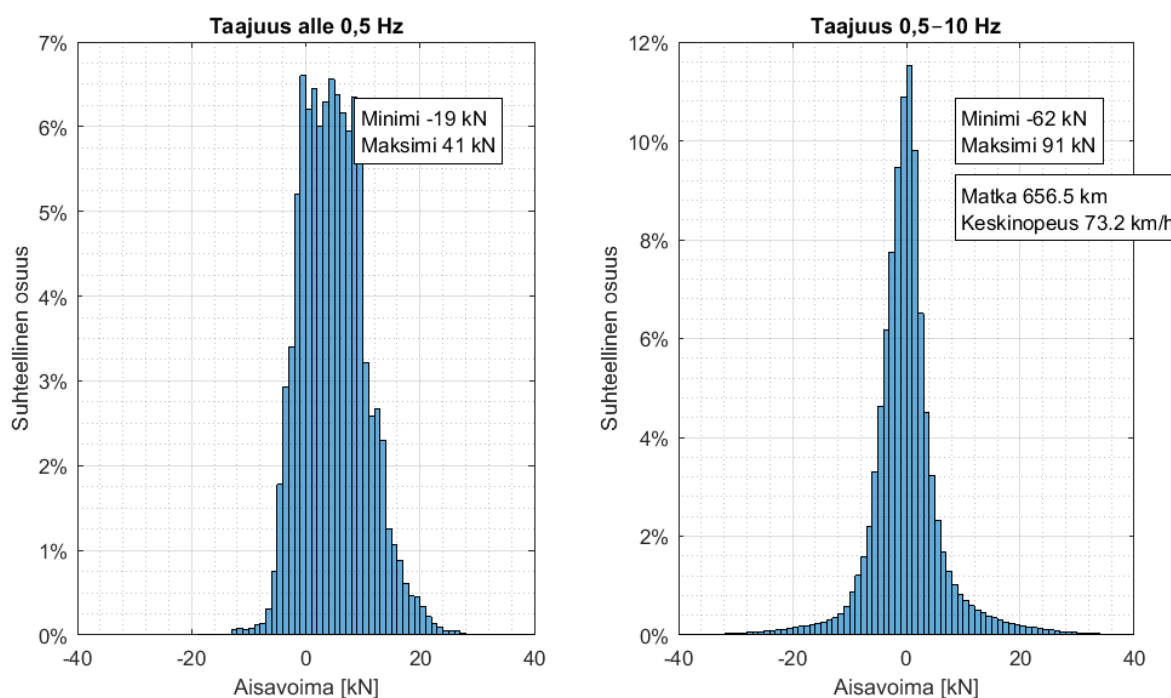
Kuva 17. Kuljetusliike O Malisen 84-t. HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat metsäautoteillä.



Kuva 18. Kuljetusliike O Malisen 76-t. yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat metsäautoteillä.

Kuvissa 17 ja 18 on esitetty metsäautotiellä mitattujen aisavaimien jakaumat. Kyseisillä ajokerroilla HCT-yhdistelmän voimat ovat jakaantuneet suuremmalle alueelle kuin 76-tonnin yhdistelmän. Alle 0,5 Hz taajuisissa voimissa jakaumat ovat huomattavan erilaiset.

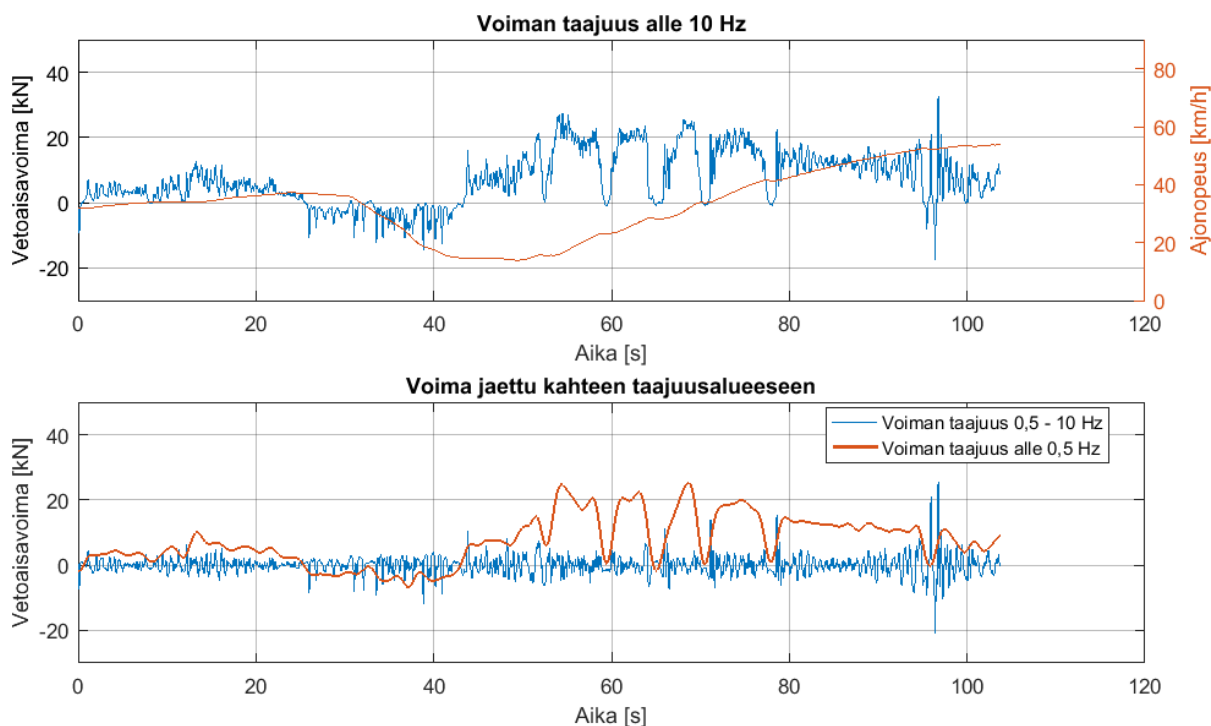
76 tonnin kokonaismassan yhdistelmän tuloksista esitettiin vain suoraan ajettaessa mitatut vetoaisavoimat. Täten myös 84 t HCT-yhdistelmän tuloksille kokeiltiin samaa tulosten käsittelyä, jossa huomioitiin vain suoraan ajatut osuudet. Kuvassa 19 on esitetty 84 t yhdistelmän tulokset valta- ja kantateillä vain suoraan ajettaessa mitatut tulokset huomioon otettuna. Havaitaan, että jättämällä käännökset huomioimatta, maksimi- ja minimivoimien itseisarvot pienenevät. Lisäksi havaitaan, että matalataajuisten voimien jakaumassa pienten voimien osuus kasvaa ja suurempi taajuuksien voimien jakaumassa pienten voimien osuus pienenee. Vastaavat muutokset olivat havaittavissa myös muilla tietyypeillä, paitsi metsäautoteillä, joilla jakaumat pysyivät ennallaan.



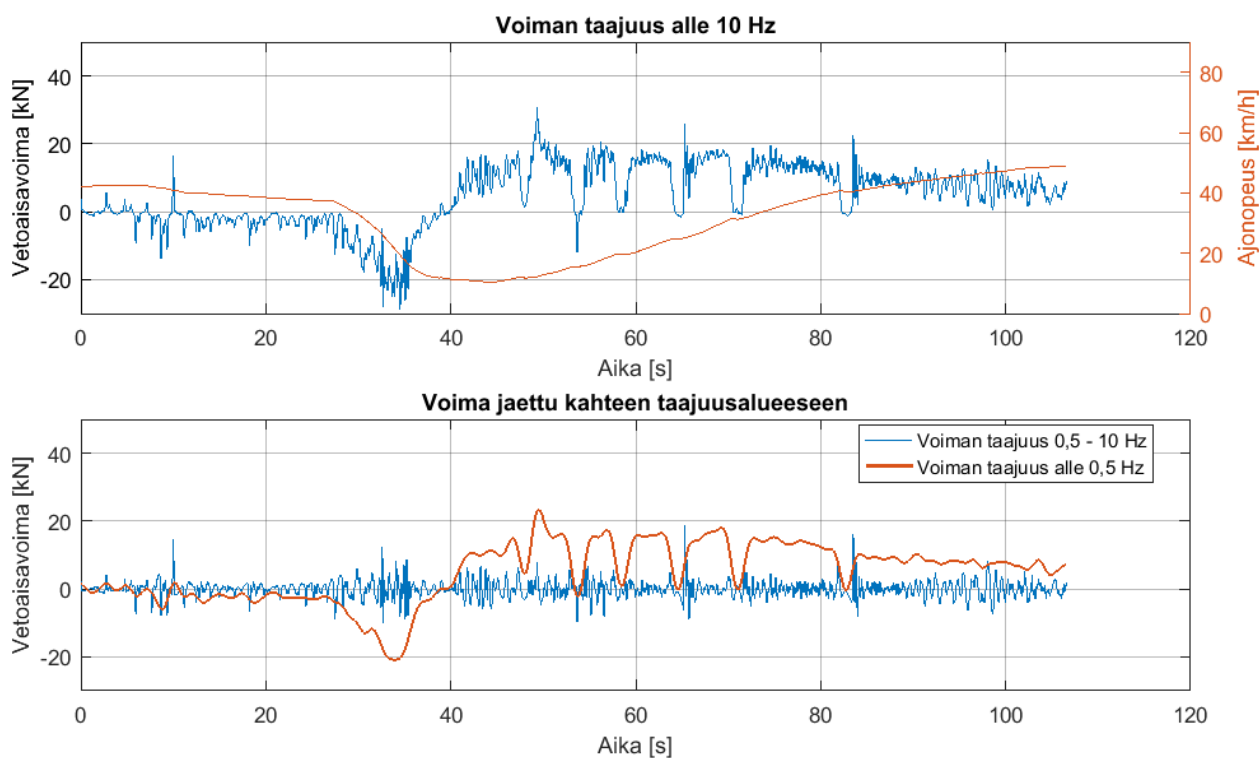
Kuva 19. Kuljetusliike O Malisen 84-t. HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat valta- ja kantateillä, vain suoraan ajatut osuudet.

Yhteenvedona Kuljetusliike O Malisen yhdistelmistä mitatuista aisavoimista voidaan todeta, että 0,5–10 Hz taajuuskaistalla esiintyvien aisavaimien jakaumat ovat samankaltaiset. Alle 0,5 Hz taajuiset voimat ovat jakaantuneet HCT-yhdistelmässä laajemmalle, mutta erot huippuarvoissa eivät ole kovin suuret.

P&A Trans Oy:n 84 tonnin kokonaismassan HCT-yhdistelmä



Kuva 20. P&A Trans Oy:n 84 t HCT-yhdistelmän aisavoima Sodankylässä 13.1.2017.



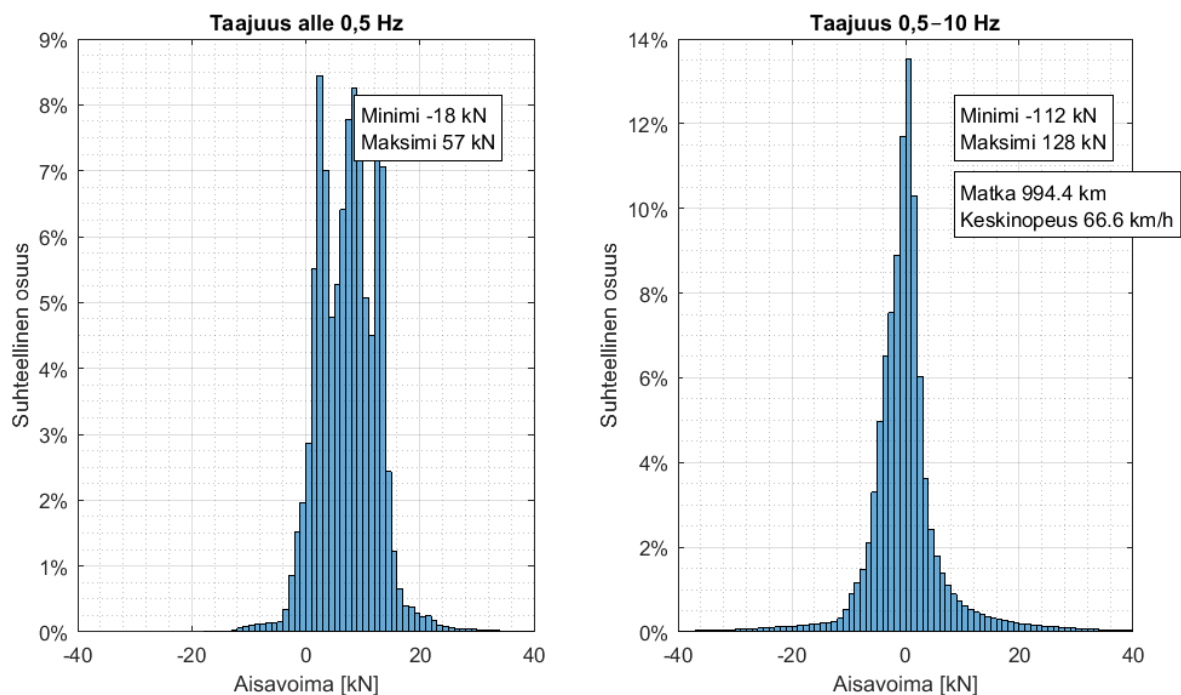
Kuva 21. P&A Trans Oy:n 84 t HCT-yhdistelmän aisavoima Sodankylässä 16.1.2017.

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

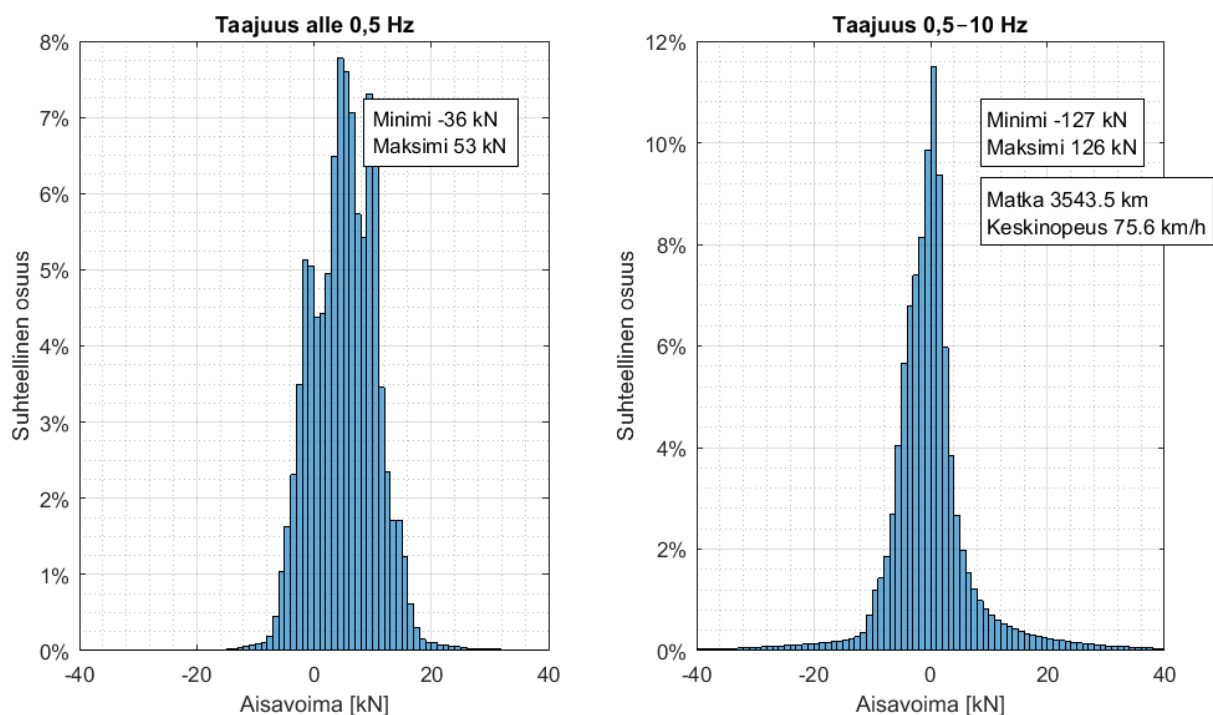
Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Kuvissa 20 ja 21 on esitetty kaksi jarrutus-kiihdytystilannetta Sodankylässä tammikuussa 2017. Kuvan 21 jarrutuksessa vetoaisassa on ollut puristusta huomattavasti enemmän kuin kuvan 20 tilanteessa.

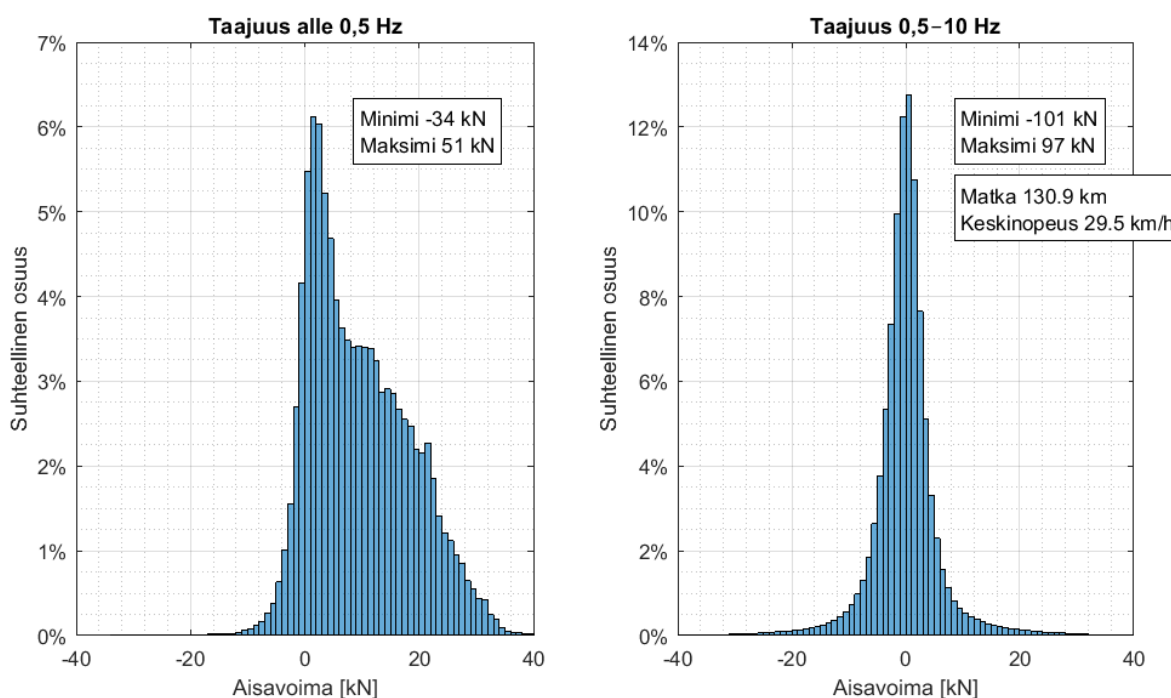


Kuva 22. P&A Trans Oy:n HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat valtateillä marras-joulukuussa 2016.

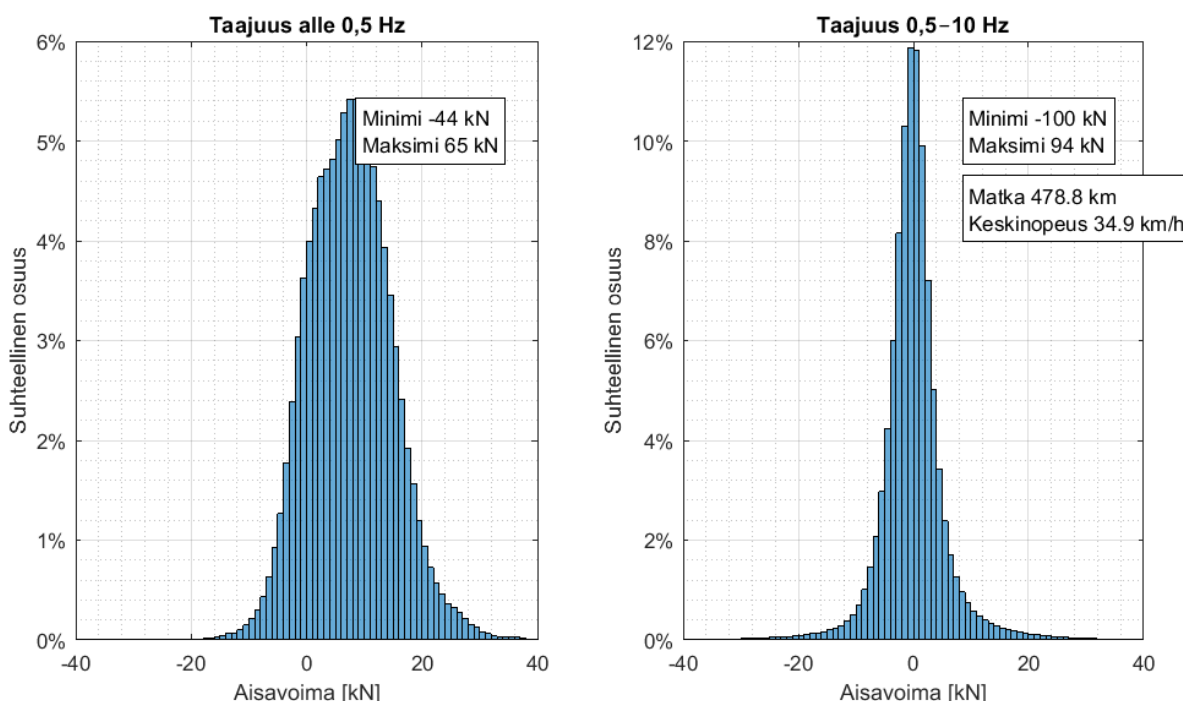


Kuva 23. P&A Trans Oy:n HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat valtateillä tammikuussa 2017.

Kuvissa 22 ja 23 on esitetty P&A Trans Oy:n HCT-yhdistelmästä valtateillä mitattujen vetoaisvoimien jakaumat. Alle 0,5 Hz taajuudella esiintyvät voimat ovat painottuneet vedon puolelle. 0,5–10 Hz taajuisia voimia on mitattu -127 ja 126 kN suuruisia yksittäisiä voimia. Suurin osa kyseisen taajuusalueen voimista on alueella -10–10 kN.



Kuva 24. P&A Trans Oy:n HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat metsäautoteillä marras-joulukuussa 2016.

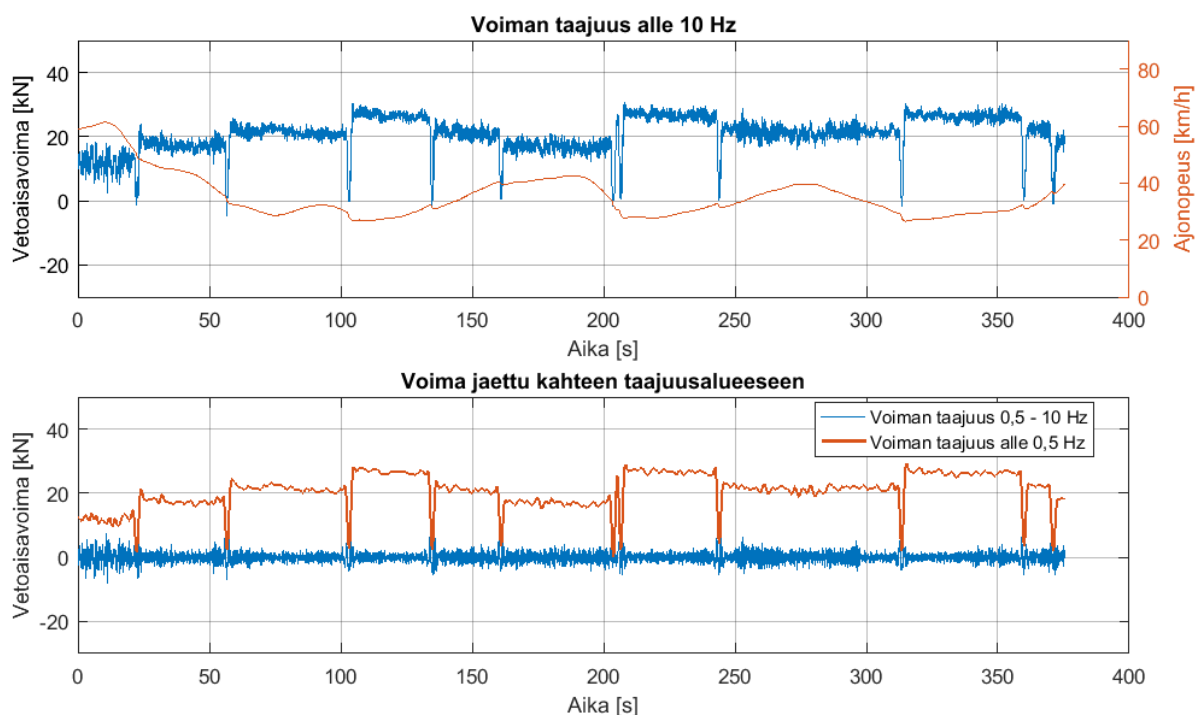


Kuva 25. P&A Trans Oy:n HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat metsäautoteillä tammikuussa 2017.

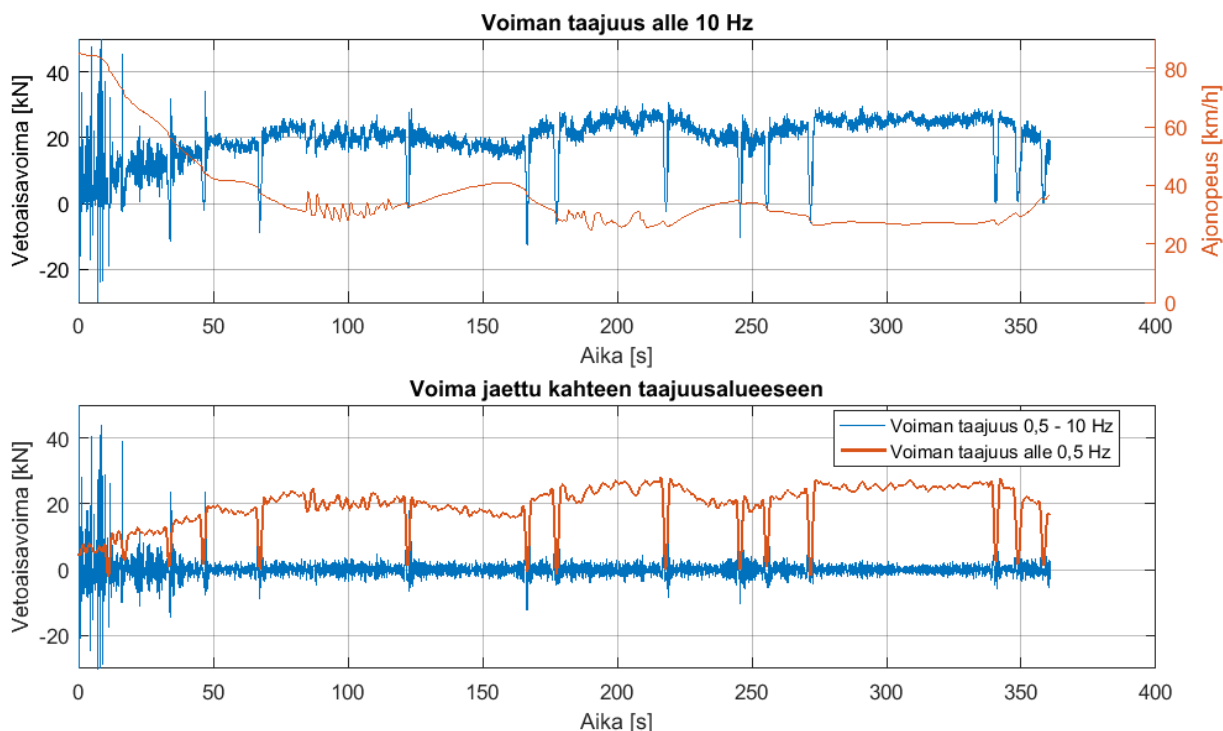
Kuvissa 24 ja 25 on esitetty P&A Trans Oy:n HCT-yhdistelmän pituussuuntaisten vetoaisvoimien jakaumat metsäautoteillä marras-joulukuussa 2016 ja tammikuussa 2016. Havaitaan, että matalataajuiset voimat ovat enimmäkseen vetovoimia. Korkeataajuisen voimien maksimit ja minimi ovat hyvin lähellä toisiaan molempina ajanjaksoina.

Ketosen Kuljetus Oy:n 104 tonnin kokonaismassan HCT-yhdistelmä

Ensimmäisessä alustavassa tulosten käsittelyssä keväällä 2016 todettiin, että täysperävaunun vetoaisvoimat ovat oletettua pienemmät. Tuolloin tulokset oli suodatettu alipäästösuodattimella, jonka rajataajuus oli 2,5 Hz. Lisäksi siltajännitteen arvona tulosten käsittelyssä käytettiin arvoa 5,0 V, joka on myöhemmässä vaiheessa todettu hieman todellista suuremmaksi. Tästä johtuen tuolloin esitetyt pituussuuntaiset voimat ovat 2–3 kN pienempiä ja poikittaissuunnan voimat 0,5–1 kN. Kyseisellä tulosten käsittelyllä talvikelillä tavallisessa maantieajossa kuormatulla yhdistelmällä vetoaisvoiman pitkittäissuuntainen voima vaihteli ± 45 kN välillä ja poikittaissuuntainen voima ± 2 kN välillä. Suurimmat voimat vetoaisaan maantieajossa aiheutuivat, kun ajettiin epätasaisen kohdan yli. Taajama-ajossa (risteyksissä ajoa ja kiihdytyksiä) pitkittäissuuntainen voima vaihteli ± 30 kN välillä ja poikittaissuuntainen voima ± 7 kN välillä. Suurin poikittaissuuntainen voima esiintyi risteyksissä. Magneettimäessä ei vetoaisaan kohdistunut tien epätasaisuudesta johtuvia voimia, vaan aisavoima muodostui perävaunujen mäennousu- ja vierintävastuksista. Suurin vetoaisvoiman pitkittäisvoiman arvo Magneettimäessä vaihteli 20–30 kN välillä. Vaihteiden vaihto aiheutti vetoaisaan 2 sekuntia kestävästä nykäyksestä, jossa aisavoima oli pienimmillään 8 kN puristusta.

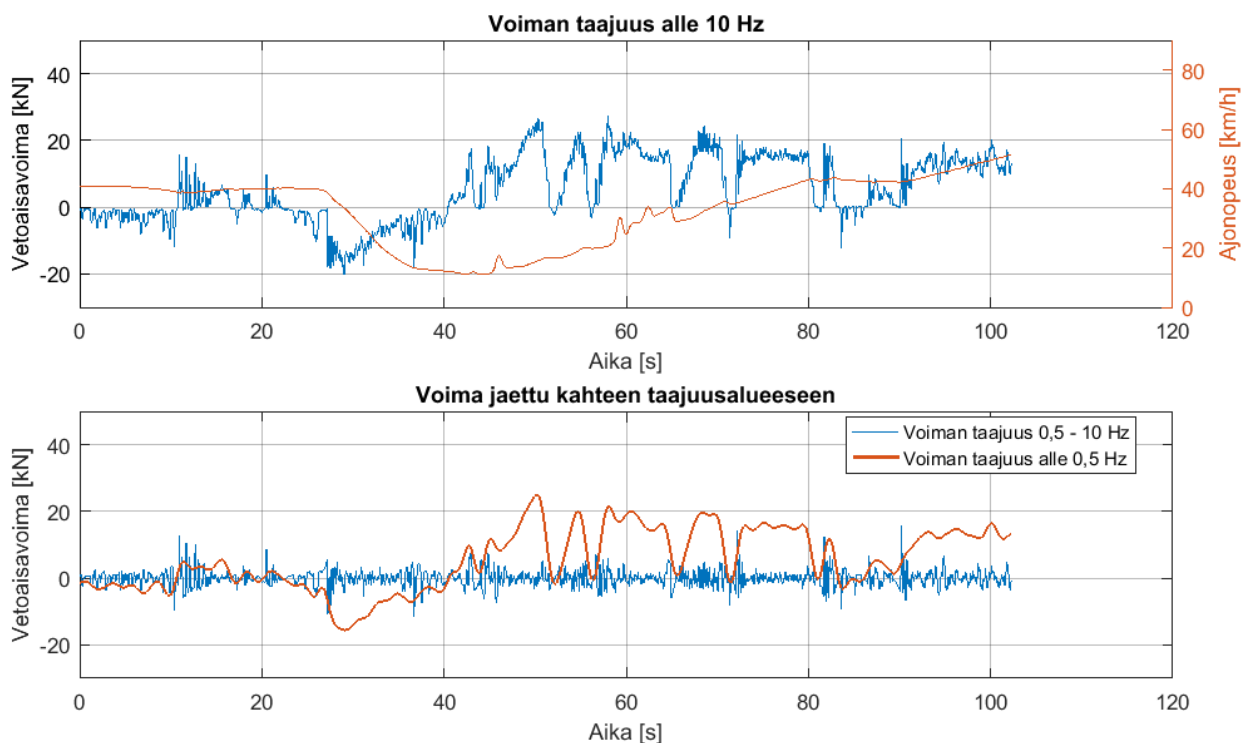


Kuva 26. Ketosen Kuljetuksen 104 t HCT-yhdistelmä Magneettimäessä 4.7.2016.



Kuva 27. Ketosen Kuljetuksen 104 t HCT-yhdistelmä Magneettimäessä 2.2.2017.

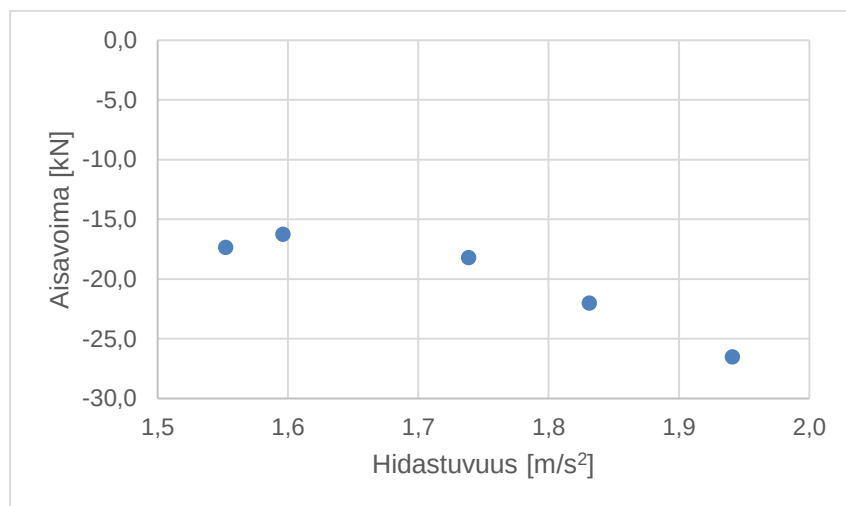
Kuvissa 26 ja 27 on esitetty Ketosen Kuljetuksen HCT-yhdistelmästä mitattu pituussuuntainen aisavoima Magneettimäessä kesällä ja talvella. Vetoaisavoimissa ei ole havaittavissa merkittäviä eroja talven ja kesän kesken. Suurin vetoaisavoima on n. 30 kN. Vaihteenvaihdon yhteydessä vetoaisavoima on lähes 0. Talviolosuhteissa ajonopeuden kuvaajassa on havaittavissa vetävän pyörän luistoa.



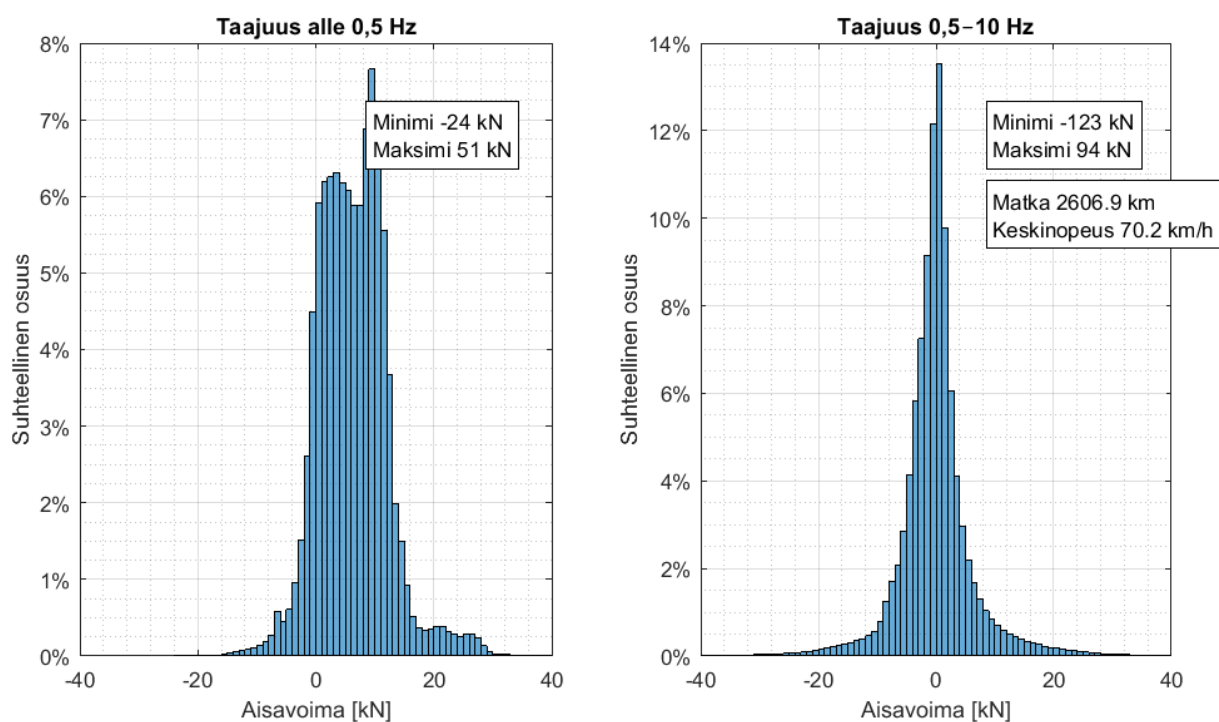
Kuva 28. Ketosen Kuljetuksen HCT-yhdistelmän vetoaisavoima Sodankylässä 3.2.2017.

Kuvassa 28 on esitetty Ketosen Kuljetuksen 104 t HCT-yhdistelmän jarrutus- ja kiihdytystilanne Sodankylässä 3.2.2017. Havaitaan, että jarrutuksessa vetoaisassa on hetkellinen 15 kN puristusvoima. Kiihdytystilanteessa suurin voima on n. 25 kN.

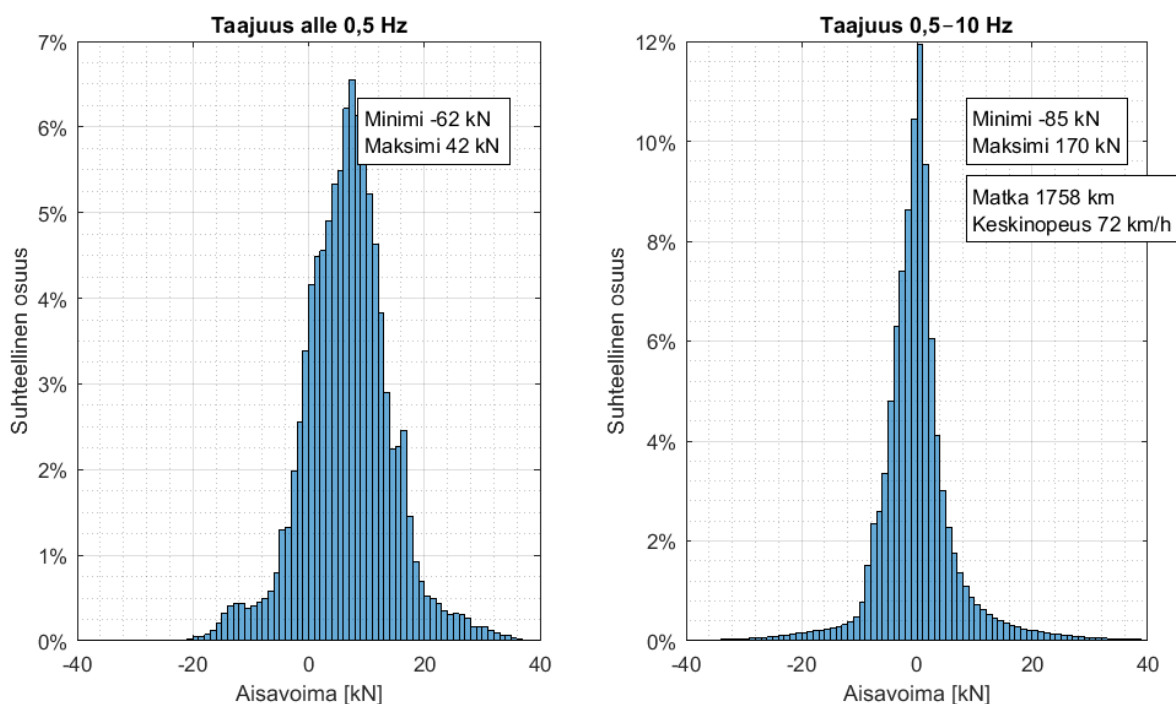
Jarrutuskokeissa 26.3.2016 havaittiin yhteys hidastuvuuden ja vetoaisavoiman kanssa. Vetoaisan puristusvoiman suuruus kasvoi hidastuvuuden kasvaessa. Tämä on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Aisavoima hidastuvuuden funktiona.



Kuva 30. Ketosen Kuljetuksen HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat kesäkuukausina 2016.



Kuva 31. Ketosen Kuljetuksen HCT-yhdistelmän (kuormattu) aisavoimat talvikuukausina 2017.

Kuvissa 30 ja 31 on esitetty Ketosen Kuljetuksen HCT-yhdistelmän pituussuuntaisen aisavaimien jakaumat kesäkuukausina 2016 (touko-syyskuu) ja talvikuukausina 2017 (tammi-helmikuu). Korkean taajuuden voima on jakautunut samalla tavalla molemmissa olosuhteissa. Huippuarvot ovat erilaiset, mutta kyseessä on yksittäistapaukset. Matalataajuisissa voimissa talvikuukausina voimat ovat jakautuneet suuremmalle alueelle kuin kesäkuukausina. Erityisesti puristusta on esiintynyt enemmän talvi- kuin kesäolosuhteissa.

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Yhteenveto

Täysperävaunun vetoaisavoimia mitattiin neljästä eri yhdistelmästä. Vetoauton ja varsinaisen perävaunun yhdistelmiä olivat P&A Trans Oy:n ja Kuljetusliike O Malisen 84 tonnin kokonaismassan HCT-yhdistelmät ja Kuljetusliike O Malisen 76 tonnin yhdistelmä. Ketosen Kuljetuksen 104 tonnin kokonaismassan HCT-yhdistelmä oli vetoauton, puoliperävaunun ja varsinaisen perävaunun yhdistelmä. Vetoaisavoimat mitattiin vetoaisoihin asennetuilla venymäliuskoilla. Kuljetusliike O Malisen 76 t yhdistelmän aisan rakenteesta ja toteutetun venymäliuskoituksen rakenteen vuoksi käännöksissä mitattuja tuloksia ei voi pitää luotettavina, joten kyseisen yhdistelmän osalta käsiteltiin vain suoraan ajettaessa mitatut tulokset.

Mitatut vetoaisavoimat jaettiin jälkikäsitellyssä digitaalisilla suodattimilla alle 0,5 Hz taajuiseen staattiseen osaan ja 0,5–10 Hz dynaamiseen osaan. Staattiset voimat ovat ajettavasta tietyypistä riippuvaisia. Dynaamiset voimat ovat suurimmat ajettaessa maantienopeuksilla. Dynaamisten voimien jakaumat olivat kaikissa yhdistelmissä samanmuotoisia. Tuloksissa esiintyvät maksimi- ja minivoimat olivat yksittäistapauksia.

Kuljetusliike O Malisen 84 t HCT-yhdistelmän matalataajuiset (alle 0,5 Hz) aisavoimat valta- ja kantateillä olivat karkeasti arvioiden pääasiassa välillä -4–18 kN (minimi -21 kN, maksimi 57 kN), muilla yleisillä teillä -4–18 kN (minimi -55 kN, maksimi 91 kN), 21 km matkalla sorateita -4–20 kN (minimi -19 kN, maksimi 50 kN) ja metsäautoteillä -4–20 kN (minimi -54 kN, maksimi 50 kN).

Kuljetusliike O Malisen 76 tonnin täysperävaunuyhdistelmästä mitatut matalataajuiset voimat valta- ja kantateillä olivat karkeasti arvioiden pääasiassa välillä -2–14 kN (minimi -55 kN, maksimi 76 kN), muilla yleisillä teillä -4–16 kN (minimi -51 kN, maksimi 69 kN), sorateilla -4–18 kN (minimi -45 kN, maksimi 71 kN) ja metsäautoteillä -4–20 kN (minimi -47 kN, maksimi 46 kN). Kun 84 t yhdistelmän tuloksissa otetaan huomioon ainoastaan suoraan ajettaessa mitatut vetoaisavoimat, lähentyvät tulokset 76 t yhdistelmän tuloksia. Siltikin HCT-yhdistelmän vetoaisavoimat ovat jakautuneet laajemmalle alueelle kuin 76 t yhdistelmässä.

Kuljetusliike O Malisen yhdistelmien 0,5–10 Hz taajuiset aisavoimat olivat pääosin -8 ja 8 kN välillä molemmissa yhdistelmissä kaikilla tietyypeillä. Minimiarvot (puristusvoima) korkeataajuisissa voimissa olivat molemmissa yhdistelmissä lähellä toisiaan, suurin mitattu puristus oli molemmissa yhdistelmissä -98 kN. Suurin korkeataajuinen vetovoima oli 84 t yhdistelmässä suurempi kuin 76 t yhdistelmässä.

P&A Trans Oy:n HCT-yhdistelmässä alle 0,5 Hz pituussuuntaiset aisavoimat valtatieolosuhteissa marras-joulukuussa 2016 olivat karkeasti arvioiden pääasiassa välillä -2–16 kN (minimi -18 kN, maksimi 57 kN), ja tammikuussa 2017 välillä -6–16 kN (minimi -36 kN, maksimi 53 kN). Metsäautoteillä matalataajuiset voimat marras-joulukuussa 2016 olivat karkeasti arvioiden pääasiassa välillä -2–22 kN (minimi -34 kN, maksimi 51 kN), ja tammikuussa 2017 välillä -4 – 20 kN (minimi -44 kN, maksimi 65 kN). Korkeataajuiset (0,5-10 Hz) voimat valtatieolosuhteissa marras-joulukuussa 2016 olivat pääasiassa välillä -6–4 kN (minimi -112 kN, maksimi 128 kN) ja tammikuussa 2017 -8–6 kN (minimi -127 kN, maksimi 126 kN). Metsäautoteillä vastaavat lukemat olivat molemmilla ajanjaksoilla -8–8 kN (minimi -101 kN, maksimi 97 kN).

Ketosen Kuljetuksen HCT-yhdistelmän matalataajuiset voimat kesäkuukausina 2016 olivat pääasiassa välillä -2–14 kN (minimi -24 kN, maksimi 51 kN) ja talvikuukausina 2017 -4–18 kN (minimi -62 kN, maksimi 42 kN). Dynaamiset voimat ovat kesäkuukausina 2016 pääasiassa olleet -6–6 kN

välillä (minimi -123 kN, maksimi 94 kN) ja talvikuukausina 2017 -8–8 kN (minimi -85 kN, maksimi 170 kN). Ketosen Kuljetuksen HCT-yhdistelmässä oli lisäksi havaittavissa muita tutkittuja yhdistelmiä enemmän puristusvoimia.

Kun tarkastellaan aluetta, jossa suurin osa voimista sijaitsee, niin kovin suuria eroja yhdistelmien välillä ei ole varsinkin 0,5–10 Hz taajuisissa voimissa. 84 tonnin HCT-yhdistelmissä matalataajuiset voimat ovat jakautuneet laajemmalle alueelle kuin 76 t yhdistelmässä.

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

