

# **TIERAKENTEEN RASITTUMINEN YLI 76 TONNIN HCT-YHDISTELMIEN KOEKUORMITUKSISSA VUOSINA 2015-2018**





Nuutti Vuorimies, Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin,  
Timo Saarenketo, Veikko Pekkala, Mauri Haataja

# **Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015-2018**

Yhteenvetoraportti

Väyläviraston tutkimuksia 21/2019

*Kannen kuva: Nuutti Vuorimies*

Verkkajulkaisu pdf ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-0982  
ISBN 978-952-317-745-1

Väylävirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. 0295 34 3000

**Nuutti Vuorimies, Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin, Timo Saarenketo, Veikko Pekkala ja Mauri Haataja: Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015-2018.** Väylävirasto. Helsinki 2019. Väyläviraston tutkimuksia 21/2019. 30 sivua. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-745-1.

**Avainsanat:** raskaat ajoneuvot, tierakenne, monitorointi, urautuminen, kosteus

## Tiivistelmä

Tässä yhteenvetoraportissa esitetään keskeiset tulokset Tampereen teknillisen yliopiston vuosina 2015-2018 ja Oulun yliopiston vuonna 2018 tekemistä tutkimuksista raskaiden ajoneuvojen kuormitusvaikutuksista tierakenteisiin. Erityisenä tarkastelun kohteena oli peräkkäisten akselien kuormitusvaikutuksesta mobilisoituvat kumulatiiviset muodonmuutokset ja mahdollinen tierakenteeseen suuntautuva veden pumppautuminen, kun tie sijaitsee pehmeällä pohjamaalla. Keskeiset mittausmenetelmät olivat RDSV-mittausauton maatutkaimittauksen MDI-analyysit (kosteusprofiilin muuttuminen) ja laserkeilaimella mitatut urasyvytykset sekä muodonmuutosten havainnointi tierakenteeseen asennetuilla päällysteen alapinnan siirtymäantureilla. Kuormitusajoneuvojen pysymistä ohjatulla ajouralla seurattiin esimerkiksi mittamatolla ja videokuvauksella, etäisyyslaserilla ja tarkkuus-GPS:llä.

Keskeisten koetulosten lisäksi yhteenvetoraporttiin on koottu tärkeitä havaintoja koekuormitusten toteuttamisesta ja koekohteiden valinnasta, koska kaikkien koekuormitusten tuloksia ei voitu hyödyntää kuormitusajoneuvoyhdistelmien vertailuissa esimerkiksi lähtöolosuhteiden ollessa liian erilaiset kuormitusajoneuvoyhdistelmien välisen luotettavan vertailun tekemiseksi.

Tutkimusten keskeisin tarkoitus oli vuosina 2017 ja 2018 tehtyjen lyhyiden kuormituskokeiden perusteella arvioida aiheuttavatko 14-akseliset yhdistelmät enemmän urautumista kuin 7-akseliset yhdistelmät, kun sama massa kuormittaa rakennetta samassa ajassa. Tutkimuksissa 14-akseliset yhdistelmät aiheuttivat enemmän urautumista kuin 7-akseliset yhdistelmät sorateilla ja ohutpäällysteisillä teillä, jotka sijaitsevat pehmeillä ja kosteilla pohjamailla. Paksupäällysteisillä teillä 14-akseliset yhdistelmät eivät aiheuttaneet sen enempää urautumista kuin 7-akseliset yhdistelmät.

Raskaiden ajoneuvojen ajolinjat vaikuttavat merkittävästi urien kasvunopeuteen. Keväällä 2018 ajolinjojen vaihtelulla kyettiin pienentämään urasyvyyttä Kyyjärven ja Simon koekohteilla. Täten automaattisen ohjauksen avulla osa ajoneuvoista voitaisiin ohjata pienentämään uria ainakin suorilla tieosuuksilla.

Lisäksi mittaukset osoittivat myös, että tierakenteen kohdissa, joissa havaittiin kosteuden kasvua MDI (moisture damage index) -analyysissä, muodostui selkeää urakasvua.

Nuutti Vuorimies, Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin, Timo Saarenketo, Veikko Pekkala och Mauri Haataja: **Belastning av vägkonstruktion i provbelastningar med HCT-kombinationer på över 76 ton under åren 2015–2018.** Trafikledsverket. Helsingfors 2019. Trafikledsverkets undersökningar 30/2018. 41 sidor. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-745-1.

## Sammanfattning

I den här sammanfattningsrapporten presenteras de viktigaste resultaten av de undersökningar som gjordes vid Tammerfors tekniska universitet åren 2015–2018 och Uleåborgs universitet år 2018 av hur belastningen från tunga fordon påverkar vägkonstruktioner. Föremål för särskild granskning var de kumulativa formförändringar som mobiliseras av successiva axlars belastningspåverkan och eventuell pumpning av vatten i riktning mot vägkonstruktionen, när vägen ligger på mjuk undergrund. De viktigaste mätmetoderna var MDI-analyser (förändringar i markvattenprofilen) av markradarmätning och laserskanning av spårdjup samt observation av formförändringar via förskjutningsgivare i nedre ytan av vägkonstruktionens beläggning som gjordes med en RDSV-mätbil. Man följde upp hur belastningsfordonen hölls i ett styrt körspår med till exempel mätmatta och videofilmning, avståndslaser och precisions-GPS.

I sammanfattningsrapporten ingår utöver de viktigaste testresultaten även viktiga observationer om genomförandet av testbelastningar och valet av testobjekt, eftersom resultaten av alla testbelastningar inte kunde utnyttjas i jämförelser mellan kombinationer av belastningsfordon till exempel när utgångsförhållandena var för avvikande för en tillförlitlig jämförelse mellan olika kombinationer av belastningsfordon.

Det viktigaste syftet med undersökningarna var att utgående från de korta belastningstest som gjordes åren 2017 och 2018 bedöma om 14-axlade kombinationer förorsakar mer spårbildning än 7-axlade kombinationer, när samma massa belastar en konstruktion under samma tid. I undersökningen förorsakade 14-axlade kombinationer mer spårbildning än 7-axlade kombinationer på grusvägar och vägar med tunn asfaltbeläggning på mjuk och fuktig undergrund. På vägar med tjock asfaltbeläggning förorsakade 14-axlade kombinationer inte mer spårbildning än 7-axlade kombinationer.

Tunga fordons körinjer inverkar på ett märkbart sätt på hur snabbt spårbildningen ökar. Våren 2018 lyckades man genom att variera körinjererna minska spårdjupet vid provobjekten i Kyyjärvi och Simo. En del av fordonen kunde således med hjälp av automatisk styrning styras att minska spårdjupen åtminstone på raka vägavsnitt.

Mätningarna visade dessutom att på de ställen i vägkonstruktionen där man märkte en ökning av fuktigheten i MDI (moisture damage index)-analyser, bildades en tydlig ökning av spårdjupet.

**Nuutti Vuorimies, Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin, Timo Saarenketo, Veikko Pekkala and Mauri Haataja: Road Structure Strain on Test Loads of More than 76 Tons HCT combinations in 2015–2018.** Finnish Transport Infrastructure Agency. Helsinki 2019. Research reports of the FTIA 21/2019. 30 pages. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-745-1.

## Abstract

This summary report presents the main results of the research conducted by Tampere University of Technology in 2015–2018 and the University of Oulu in 2018 on the loading effects of heavy vehicles to road structures. The specially examined issue has been the cumulative deformation and the possible pumping of water into the road structure caused by the loadings of consecutive axles when the road is located on a soft subsoil. The main measurement methods have been MDI-analyses (moisture damage index) from ground penetrating radar data and rut depth from laser scanner done by using RDSV survey van and the monitoring of deflections at the bottom of asphalt concrete layer using displacement transducers installed in the road structure. The loading vehicles keeping on the intended driving line have been monitored for example by using measuring mat with video shooting, laser distance sensors and high-accuracy GPS.

In addition to the main test results, the summary report contains main observations about carrying out the loading tests and selecting the test sites, as the results of all test loadings could not be utilized in the comparisons of the loading vehicles. Reason for that has been for example the too different initial conditions to make reliable comparison between the loading vehicles.

The main purpose of the researches have been to estimate whether the 14-axis loading vehicles cause more rutting than the 7-axis loading vehicles when the loading mass was equivalent in the same time based on the short loading tests carried out in 2017 and 2018. In the researches, the 14-axis loading vehicles did caused more rutting than the 7-axis loading vehicles on gravel and thin-paved roads located on soft, wet soils. On thick-paved roads, the 14-axis loading vehicles did not caused any more rutting than the 7-axis loading vehicles.

The driving lines of the heavy vehicles have a significant influence on the increase rate of rut depth. In spring 2018, rut depth could be reduced by varying of the driving lines at the Kyyjärvi and Simo test sites. Thus, with autonomous driving, part of vehicles could be steered to reduce rut, at least on straight road sections.

In addition, the measurements also showed that there was a clear increase in rut depth at the spots of the road structure where moisture increase has been observed in MDI (Moisture damage index) analyzes.

## Esipuhe

Tämä raportti kokoaa yhteen keskeiset tulokset Liikenneviraston vuosina 2015-2018 Roadscanners Oy:ltä ja Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksiköltä sekä vuonna 2018 Oulun yliopiston konesuunnittelun tutkimusyksiköltä tilaamista tutkimuksista HCT-yhdistelmien kuormitusvaikutuksista erilaisiin tierakenteisiin. Tutkimusten tavoitteena oli tuottaa taustatietoa raskaan ajoneuvokaluston säätelyä koskevien päätösten tekemiseen.

Yhteenvetoraportin on koostanut Nuutti Vuorimies nykyisestä Tampereen yliopistosta. TTY:n raportit on kirjoittanut pääosin Nuutti Vuorimies Altti Kurjen avustuksella ja Roadscanners Oy:n osalta mittaustulosten analysoinnin ja raportoinnin pääosin Petri Varin. TTY:stä tutkimusten ohjaukseen on osallistunut Pauli Kolisoja ja Roadscanners Oy:stä Timo Saarenketo. Oulun yliopiston osalta tutkimusten raportin ovat kirjoittaneet Veikko Pekkala ja Mauri Haataja. Yhteenvetoraportin koostamista ovat ohjanneet Pauli Kolisoja Tampereen yliopistosta ja Timo Saarenketo Roadscanners Oy:stä. Väyläviraston (entinen Liikennevirasto) puolesta tutkimusten raportointien etenemistä, tulosten analysointia sekä yhteenvetoraportin koostamista ovat ohjanneet Kari Lehtonen ja Sami Petäjä.

Helsingissä joulukuussa 2019

Väylävirasto  
Tekniikka- ja ympäristöosasto



## Sisältö

1	JOHDANTO .....	8
1.1	Tutkimuskokonaisuuden tausta.....	8
1.2	Tutkimusten tavoitteet.....	8
2	MITTAUSMENETELMÄT .....	10
2.1	Tierakenteesta ja tien pinnalta tehdyt pistemäiset mittaukset .....	10
2.2	Tien pinnalta tehdyt laaja-alaiset mittaukset.....	10
3	MITTAUSKOHTEET .....	12
4	HAVAINTOJA KOEKUORMITUSTEN JÄRJESTÄMISESTÄ .....	13
4.1	Muun liikenteen vaikutus.....	13
4.2	Roudan sulamisen seurauksena löyhäksi jäänyt tie .....	13
4.3	Kuormituskokeet soratiellä .....	14
4.4	Ajosuunta, koekohteen sijainti sekä kuljettajat .....	15
4.5	Kuormitusajoneuvot.....	16
5	7-AKSELISEN JA 14-AKSELISEN KUORMITUSAJONEUVOYHDISTELMÄN VERTAILU .....	17
5.1	Vertailusta hylätyt kuormituskokeet.....	17
5.2	Vertailussa hyödynnetyt kuormituskokeet .....	18
5.3	Vertailun tulokset.....	18
6	MUUT KESKEISET KOETULOKSET .....	21
6.1	Päällysteen alapinnan pysyvä siirtymä ajolinjan suhteen.....	21
6.2	Urasyvyyden pienentäminen ajolinjaa muuttamalla .....	22
6.3	Kosteuden pumppautuminen ja urasyvyyden kasvu .....	23
6.4	Osittain sulaneen tierakenteen herkkyys pysyville siirtymille.....	26
7	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	28
	LÄHTEET .....	30

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuskokonaisuuden tausta

Tässä yhteenvedoraportissa esiteltävän tutkimuskokonaisuuden taustana on uusi raskaiden ajoneuvojen massoja ja mittoja säätelevä ajoneuvoasetus, joka astui voimaan lokakuussa 2013. Asetuksen myötä raskaan ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu kokonaismassa kasvoi 60 tonnista 76 tonniin. Asetusmuutos ei muuttanut yhden akselin sallittua akselimassaa, mutta kaksiakselisen telin enimmäismassa kasvoi 19 tonnista 21 tonniin ja kolmiakselisen telin enimmäismassa 24 tonnista 27 tonniin. Lisäksi tieverkollamme on tietyillä pitkämatkaisten kuljetusten reiteillä otettu erikoisluvilla käyttöön kokonaismassaltaan jopa yli 100 tonnin ajoneuvoyhdistelmiä.

Vaikka raskaiden ajoneuvojen sallitut akselimassat eivät tuoreen asetusmuutoksen myötä kasvaneetkaan, erityisesti heikon pohjamaan päällä olevilla ohuesti rakennetuilla teillä on silti olemassa merkittävä riski raskaimmista ajoneuvoista tiestölle aiheutuvien rasitusvaikutusten kasvamiselle. Syynä tähän on yhtäältä se, että useamman peräkkäisen akselin muodostaman akseliryhmän kuormitusvaikutuksesta mobilisoituvat muodonmuutokset summautuvat pehmeässä pohjamaassa kasvattaen näin myös pohjamaan päällä olevaan tien päällysrakenteeseen kohdistuvia kokonaismuodonmuutoksia. Toisaalta aikaisempaa useampien peräkkäisten akseleiden kuormittaessa joustavan pohjamaan päällä olevaa tierakennetta, on myös suurempi mahdollisuus pohjamaasta tierakenteeseen suuntautuvalla veden pumppautumiselle. Tierakenteen vesipitoisuuden kasvaessa siihen voi pahimmillaan muodostua rakennekerros- materiaalien lujuutta ja sen myötä kuormituskestävyyttä merkittävästi heikentävää huokosveden ylipainetta. Erityisesti näin voi käydä, jos tierakenne on huonosti kuivatettu ja sen materiaalit ovat runsaan hienoainespitoisuuden ja epäedullisen mineralogian vuoksi voimakkaasti vettä itseensä pidättäviä. Luonnollisesti myös roudan sulamisvaiheen kostuttamassa tierakenteessa edellytykset huokosveden ylipaineen kehittymiselle ovat normaalia kuivatustilannetta otollisemmat.

## 1.2 Tutkimusten tavoitteet

Tutkimuskokonaisuuden keskeiseksi sisällöksi muodostui sarja kuormituskokeita, joiden avulla on pyritty havainnoimaan useamman peräkkäisen raskaan ajoneuvoakselin kuormitusvaikutuksen kumuloitumista rakennepaksuudeltaan ja pohjamaaolosuhteiltaan erilaisissa mittauskohteissa. Pelkistetysti keskeisenä tutkimuskysymyksenä on tällöin ollut, missä olosuhteissa ja kuinka paljon haitallisempaa tierakenteen kannalta on, jos tietty määrä rahtia kuljetetaan uuden ajoneuvoasetuksen mukaisella ajoneuvokalustolla verrattuna siihen, että sama tavaramäärä kuljetettaisiin aikaisemman ajoneuvoasetuksen mukaisella kalustolla. Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa syksyllä 2015 Inarissa tehdyissä mittauksissa selvitettiin, voisiko yhden päivän kuormituksilla tiessä tapahtuvia mitattavissa olevaa urakasvua. Inarin kohteen osoittauduttua suhteellisen urautumisherkäksi syksyllä 2016 mittauksia jatkettiin 9-akselisilla ajoneuvoyhdistelmillä kaikkiaan neljällä eri tyyppisellä mittauskohteella, jotka sijaittivat Simossa, Ranualla, Karstulassa ja Kyyjärvellä. Keväällä 2017

mittaukset toistettiin Simossa, Karstulassa ja Kyyjärvellä yhtenä päivänä roudan sulaessa ja kahtena peräkkäisenä päivänä roudan sulettua, jolloin tavoitteena oli mm. verrata 7-akselista ajoneuvoyhdistelmää 14-akseliseen ajoneuvoyhdistelmään, kun niissä kulkee mittausalueen yli sama massa samassa ajassa. Lisäksi vuonna 2017 tehtyjen mallinnustarkastelujen tavoitteena oli muodostaa käsitystä, millä keinoilla ja kuinka hyvin rakenteiden kosteusilassa eri ajankohtina valitsevien erilaisten olosuhteiden vaikutus rakenteiden mitattuihin vasteisiin saadaan kuvattua laskennallisesti.

Vuonna 2018 Tampereen teknillisen yliopiston yhdessä Roadscanners Oy:n kanssa kahdessa vaiheessa toteutettaman tutkimuskokonaisuuden tavoitteena oli toteuttaa ohjelmoitu sarja kuormituskokeita, joiden avulla pyrittiin täydentämään aiemman vuosina 2015-2017 toteutetun tutkimuksen yhteydessä tehtyjen koesarjojen havaintoja ja koesarjoissa havaittuja puutteita. Vuoden 2018 tutkimuksessa useamman peräkkäisen raskaan ajoneuvoakselin kuormitusvaikutuksen kumuloitumisen tutkiminen painottui tierakenteisiin, jotka olivat rakennepaksuudeltaan ohuimpia aiemman tutkimuksen mittauskohteista. Keskeisenä tavoitteena vuonna 2018 oli verrata 7-akselista yhdistelmää 14-akseliseen yhdistelmään, kun yhdistelmissä kulkee mittausalueen yli sama massa samassa ajassa. Toisena tavoitteena oli simuloida hallitusti raskaan ajoneuvoyhdistelmän ajolinjan vaikutusta urautumiseen.

Keväällä 2018 Oulun yliopiston toteuttamaa tutkimusta rahoitti Liikenneviraston lisäksi Metsäteho. Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää ajoneuvoyhdistelmien eri akselimäärien sekä erikoistelillä varustetun perävaunun vaikutuksia tien urasyvyyden kehitykseen ja kosteusprofiilin muutokseen soratiellä. Lisäksi erillisenä tavoitteena oli tutkia ajolinjojen vaikutusta urasyvyyden kehitykseen.

Tämän yhteenvetoraportin tarkoituksena on koota yhteen edellä mainittujen vuosina 2015-2018 tehtyjen tutkimusten keskeiset tulokset. Yksi oleellinen näkökohta tulosten käsittelyssä on ollut vertailusta poistettavien koekuormitusten perustelemineen. Tämän vuoksi raporttiin on koostettu tärkeimmät havainnot koekuormitusten toteuttamisesta opastamaan tulevaisuudessa vastaavia koekuormituksia tekeviä toimijoita. Tarkemmat yksityiskohdat tutkimuksista löytyvät kolmesta erillisestä raportista (Vuorimies et. al. 2018, Vuorimies et. al. 2019 ja Pekkala et. al. 2019)

Käsillä olevan yhteenvetoraportin luvussa 2 on esitelty luettelomaisesti mittausmenetelmät. Luvussa 3 on lyhyesti kuvattu mittauskohteet. Luvussa 4 on käsitelty havaintoja kuormituskokeiden järjestämisestä ja tuloksiin vaikuttavista tekijöistä vastaisuuden varalle. Luvussa 5 on esitetty 7-akselisen ja ns. 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän vertailun tulokset. Luvussa 6 on esitetyt tutkimuskokonaisuuden muut keskeiset tulokset. Viimeisessä luvussa 7 on kiteytetty tutkimuksen tuottamat päätelmät ja tehty ehdotus mahdolliseksi jatkotoimenpiteeksi.

## 2 Mittausmenetelmät

### 2.1 Tierakenteesta ja tien pinnalta tehdyt pistemäiset mittaukset

Tutkimuksissa asennettiin tierakenteeseen ja tien pinnalle erilaisia pistemäisesti mittaavia antureita. Useissa koekohteissa oli asennettuna Percoasema, jonka antureilla mitattiin pitkäaikaisessa seurannassa normaalisti kahden tunnin välein tien eri syvyyksiltä dielektrisyttä, sähkönjohtavuutta ja lämpötilaa. Kuormitusajoneuvon ylityksen aikana vain yhtä näistä vasteista pystyi mittaamaan kerrallaan. Alla on lueteltu pistemäiset mittausmenetelmät, joilla mitattiin kuormitusajoneuvojen vasteita mittauspäivinä, ja niillä tavoiteltu tieto sekä suluissa tieto mittausmenetelmän ajallista rajauksesta.

- Pystysiirtymäanturit: tien pinnan (päällysteen alapinnan) pystysiirtymä
- Kiihtyvyyssanturit (2018): tien pinnan taipuma ja ajoneuvon karkea sijainti
- Mittamatto ja videokamera (2016 ja 2017); ajoneuvon renkaan sivuetaisyys
- Etäisyyslaser (2017 ja 2018): ajoneuvon renkaan sivuetaisyys
- Mittanauha (Rovaniemi 2018): ajoneuvon renkaan sivuetaisyys
- Huokosvedenpaineanturit: huokosveden ylipaine tai muutokset huokosvedenpaineessa
- Percoanturit: dielektrisyys eli vapaan veden määrä kuormituskokeiden aikana.

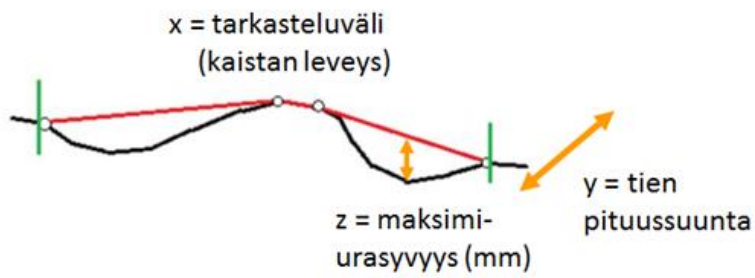
Kaikkia yllä mainittuja mittausmenetelmiä ei ollut käytössä kaikilla koekohteilla. Lisäksi Rovaniemen (Jaatila) koekohteella tehtiin pudotuspainolaitemittaukset keväällä 2018 ennen ensimmäistä kuormituspäivää ja viimeisen kuormituspäivän jälkeen.

### 2.2 Tien pinnalta tehdyt laaja-alaiset mittaukset

Koekohteilla tehtiin mittaukset Roadscanners Oy:n Road Doctor Survey Van (RDSV) -mittausajoneuvolla ennen kuormituksia ja heti kuormitusajoneuvon ajettua koekohteen yli. RDSV-mittausajoneuvolla tehtiin seuraavia mittauksia:

- Maatutkaluotaus: tien kosteustilan muutos ja rakennekerroksien paksuudet
- Laserkeilain: kaistan urakartat ja ns. lankamallilla määritetty maksimiurasyvyys ja sen kehittymisen perusteella laskettu urasyvyyden kasvu. Lankamallin periaate on esitetty kuvassa 1.
- Lämpökamera (2015): tien pinnan lämpötilan muuttuminen

Lisäksi tarkkuus-GPS-laiteilla pyrittiin selvittämään kuormitusajoneuvojen ajo-  
linjat keväällä 2018 Rovaniemen (Jaatila) koekohteella.



Kuva 1. Urasyvyyden laskennan periaate laserkeilauksessa. Tarkasteluvälille (vihreiden viivojen väli) asetetaan kuvitteellinen kiristetty lanka (punainen viiva). Maksimiurasyvyyys on suurin pystysuora etäisyys tien pinnasta tähän lankaan. (Vuorimies et. al. 2019)

### 3 Mittauskohteet

Kuvassa 2 on esitetty päällystettyjen koe kohteiden tierakenteet pistemäisten mittausantureiden kohdalla ja lähiympäristössä sekä mittauskohteiden pohjamaan laatu. Kuvassa 3 on esitetty vastaavat tiedot sorateiden koe kohteiden tierakenteista. Tarkemmat tiedot koe kohteista löytyvät yksityiskohtaisemmista raporteista (Vuorimies et. al. 2018, Vuorimies et. al. 2019 ja Pekkala et al. 2019).

Paras rakenne			Simo			Inari			Heikoin rakenne		
Karstula	Mittaus-pisteessä	Ympäristössä	Mittaus-pisteessä	Ympäristössä	Mittaus-pisteessä	Ympäristössä	Kyyjärvi	Mittaus-pisteessä	Ympäristössä	Mittaus-pisteessä	Ympäristössä
<b>Päällyste</b>	180 - 200 mm	160 - 200 mm	<b>Päällyste</b>	110 mm	90-130 mm	<b>Päällyste</b>	80 mm	50-100 mm	<b>Päällyste</b>	30-40 mm	30-50 mm
<b>Kantava</b>	200 - 300 mm	200 - 500 mm	<b>Kantava</b>	200 mm	150-250 mm	<b>Kantava</b>	200-250 mm	200-250 mm	<b>Kantava</b>	150 mm	150 mm
<b>Muut rakenne-kerrokset</b>	500 - 600 mm	400 - 800 mm	<b>Suodatin</b>	300 mm	250-500 mm	<b>Suodatin</b>	270-320 mm	150-700 mm	<b>Muut rakenne-kerrokset</b>	300 mm	150-350 mm
<b>Turve</b>			<b>Hiekka / siHk / hiHK</b>			<b>Kosteaa maasto</b>			<b>Turve</b>		

Kuva 2. Päällystettyjen koe kohteiden tierakenteet pistemäisten mittausantureiden kohdalla ja koe kohteiden alueella sekä pohjamaan laatu.

Rovaniemi (soratie)			Ranua (soratie)			Rovaniemi (soratie)					
Mittaus-pisteessä	Ympäristössä	Mittaus-pisteessä	Ympäristössä	Mittaus-pisteessä	Ympäristössä	Mittaus-pisteessä	Ympäristössä	Mittaus-pisteessä	Ympäristössä		
<b>Kulutusk.</b>	n.50 mm	50-200 mm	<b>Kulutusk.</b>	100 mm	60-110 mm	<b>Kulutusk.</b>	n. 50 mm	50-200 mm	<b>Kulutusk.</b>	n. 50 mm	50-200 mm
<b>Muu tie-rakenne</b>	350 mm	300-800 mm	<b>Kantava</b>	100 mm	70-130 mm	<b>Muu tie-rakenne</b>	450 mm	300-900 mm	<b>Muu tie-rakenne</b>	450 mm	300-900 mm
<b>Moreeni</b>			<b>Vanha kantava/jakava</b>	200 mm	100-300 mm	<b>Turve</b>			<b>Turve</b>		
			<b>Käsiteltyä pohjamaata/pengertä</b>	250 mm	Ei tietoa						
			<b>Turve + siMr</b>								

Kuva 3. Soratiekoe kohteiden tierakenteet pistemäisten mittausantureiden kohdalla ja koe kohteiden alueella sekä pohjamaan laatu.

## 4 Havainnot ja koekuormitusten järjestämisestä

### 4.1 Muun liikenteen vaikutus

Kun vertaillaan eri kuormitusajoneuvojen vasteita tierakenteessa ja varsinkin kuormitusten kumulatiivisia vaikutuksia, voi muu kohteen ohittava liikenne vaikeuttaa tai estää mittaustulosten analysoinnin. Jos tiellä on raskasta liikennettä, mittauskaistan sulkemista muulta liikenteeltä on harkittava vakavasti. Raskaan liikenteen määrät koekohteella saattavat muuttua merkittävästi mittauspäivien aikana esimerkiksi tietöiden myötä.

Jos mitattava tie on kapea, koko mitattavan kaistan sulkeminen muulta liikenteeltä ei ole välttämättä mahdollista. Mitä lähempänä muuta liikennettä suljettu mittauskaista on, sitä enemmän viereisen kaistan raskas liikenne voi vaikuttaa mittaustuloksiin. Tällöin olisi harkittava, voidaanko kapea mitattava tie sulkea muulta liikenteeltä esimerkiksi kiertotiellä. Vähäliikenteisillä teillä tulosten käsittelyä auttaisi suuresti, jos ainakin raskaiden ajoneuvojen kulkeminen mittauspäivien aikana voidaan estää esim. tiedottamalla. Vaikeutena on kuitenkin saada etukäteen luotettava tieto mahdollisista puu-, turve- ja sorakuormien ajoista. Vaikka riittävä tieto saadaan, sopivan ajankohdan sopiminen saattaa olla haasteellista, koska esimerkiksi tämän raportin käsittelemissä kuormituskokeissa monet oleelliset mittausmenetelmät vaativat lähes sateettomia kelejä. Jos kuormitukset pyritään ajoittamaan tiettyyn ajanjaksoon roudan sulaessa, liikkumavara ajan suhteen saattaa olla pieni.

Jos ei ole tietoa, saadaanko raskaan liikenteen vaikutus hallittua halutussa kohteessa, on mieltävä kannattaako kuormituskokeiden tekeminen kyseisellä kohteella ylipäätään.

### 4.2 Roudan sulamisen seurauksena löyhäksi jäänyt tie

Keväällä roudan sulamisen seurauksena tie on yleensä alttiimpi urautumiselle ja vaurioitumiselle, erityisesti jos tiealueelle on muodostunut talven aikana routalinssejä. Jos tiellä ei ole raskasta liikennettä keväällä, roudasta sulaneet kerrokset jäävät tiivistymättä. Tällöin ensimmäisten kuormitusten vertailulähtökohta on todennäköisesti huonompi kuin seuraavien kuormitussarjojen. Tilanne saattaa tosin muuttua, jos vesi ei pääse poistumaan tierakenteesta esimerkiksi jäätyneen kerroksen vuoksi, vaan se pumppautuu toistuvista kuormituksista johtuen ylemmäksi tierakenteessa heikentäen sitä.

Seuraavilla tavoilla voidaan saada tarkentavaa tietoa koekohteen rasituksesta ennen suunniteltuja koekuormituksia tai voidaan tasapuolistaa tehtävien vertailukuormitusten lähtöolosuhteita.

- Järjestetään seuranta liikenteelle esimerkiksi kameraseurannalla. Tällä voidaan saada tietoa myös raskaiden ajoneuvojen karkeista ajolinjoista, jolloin voidaan miettiä, ajatetaanko kuormitusajoneuvoja samoilla ajolinjoilla.

- Koekohteilla voidaan ajattaa esikuormituksia aiemmin, jotta tie tiivistyisi. Tässä tapauksessa on mietittävä, milloin esikuormitukset tehtäisiin ja mitä ajolinjoja pitkin ne ajettaisiin.
- Vertailtaessa erilaisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien vasteita toisiinsa kuormitussarjat voi tehdä useammassa eri järjestyksessä, jolloin kuormitusajoneuvoyhdistelmien järjestyksen merkitystä voidaan pienentää tai mahdollisesti jopa eliminoida. Tämän kaltaista menettelyä toteutettiin syksyn 2018 kuormitusten aikana.
- Jos on mahdollista, että vesi ei poistu tierakenteesta, vaan pumppautuu rakenteeseen heikentäen sitä, olisi syytä varautua kuormitussarjojen välissä pitkiin taukoihin. Toinen vaihtoehto on välttää kuormitusten järjestämistä peräkkäisinä päivinä pitämällä yhden mittauspäivän jälkeen ns. lepopäivä. Esimerkiksi keväällä 2018 Rovaniemen (Jaatila) koekohteella mittauspäivien välissä tiellä ei ajettu kuormitusajoneuvolla.

### 4.3 Kuormituskokeet soratiellä

Soratiellä tehtävät kuormitukset asettavat omat haasteensa järjestelyille ja mittausmenetelmille. Huomioon otettavat tekijät voitaneen jakaa soratien lähtöolosuhteiden tasapuolisuuteen ja sääolosuhteiden vaikutuksiin.

Soratien lähtöolosuhteiden tasalaatuisuuteen saattavat vaikuttaa esimerkiksi roudan sulamisen lisäksi seuraavat tekijät:

- Jos soratie lanataan tai sorastetaan tien pinnan tasaamiseksi ja vertailumittauksen hyvän lähtökohdan varmistamiseksi, se olisi myös tiivistettävä vähintään ajouralta ennen kuormituskokeiden ajamista. Tällöin vältetään löyhemmän pintakerroksen merkittävä tiivistyminen ensimmäisillä ylityksillä.
- Jos sorateilla on irtosoraa, se on saatava pääosin iskostumaan ajouralle, jotta irtosoran liikkuminen ei haittaisi urasyvyyden määrittystä. Irtosora voi kulkeutua tien reunalle tai keskelle, jolloin urasyvyyden muutos voi johtua suurelta osalta irtosoran liikkumisesta. Irtosoran liikkeillä voi olla erittäin suuri merkitys, jos välillä ajetaan eri ajolinjaa. Henkilöautot, joiden raideleveys on pienempi kuin raskaiden ajoneuvojen, voivat muokata merkittävästi tien pintaprofiilia ja urasyvyyttä ajaessaan irtosoran päällä.
- Sorateilla kuormituskokeita tehtäessä olisi mietittävä, mitkä ovat olleet soratiellä raskaan liikenteen käyttämät ajolinjat. Pitäisikö käyttää näitä samoja ajolinjoja kuormituksissa? Jos ei tiedetä raskaan liikenteen ajolinjoja tai kuormituksen ajolinjaa muutetaan, pitäisikö varmuuden vuoksi ajattaa neutralisointi- tai esikuormitus esimerkiksi 1,5 tuntia ennen varsinaisia kuormitusajoneuvoja?

Sorateilla sade haittaa mittauksia pääosin samoin kuin päällystetyillä teillä, erityisesti veden lammikoituessa tien uriin. Sorateilla tien pinta saattaa myös pehmentyä sateen ja raskaiden ajoneuvojen kuormitusten yhteisvaikutuksesta, jolloin soratien pinta voi plastisoitua ja tien pintamateriaalia saattaa kulkeutua renkaiden mukana. Tällöin myös tien pintaan merkityt ajolinjojen ohjausviivat häviävät ja ne vaativat toistuvaa uudistamista. Runsas sade voi myös muuttaa merkittävästi soratien kantavuutta kesken kuormituksen, jos vettä imeytyy tien rakennekerrokseen.



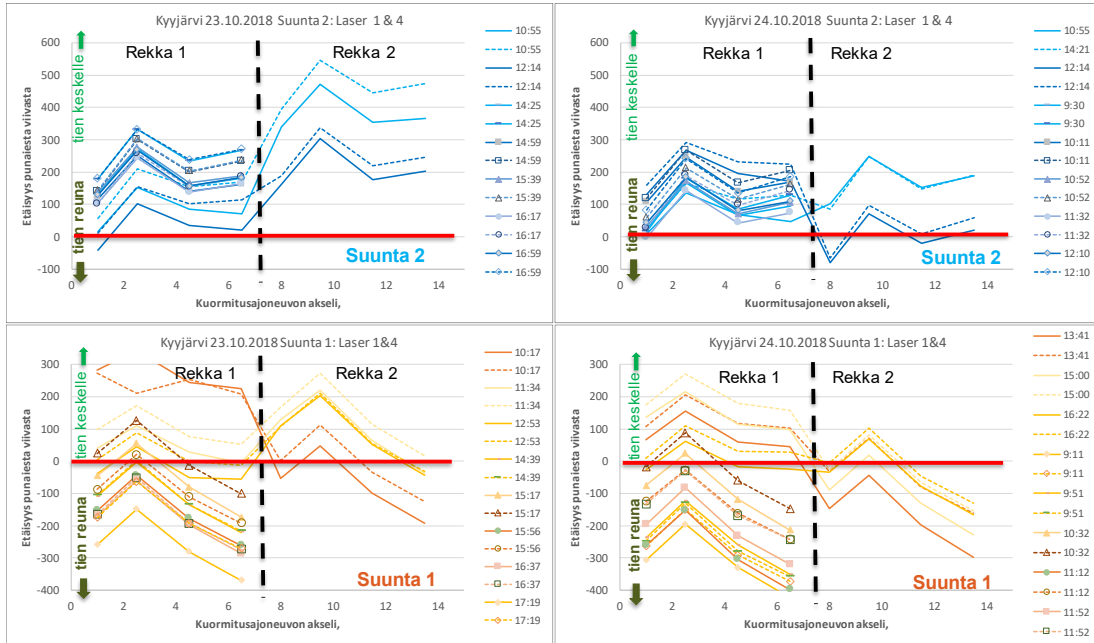
Kuivan soratien pinnan pölyäminen häytti joidenkin mittausmenetelmien tarkkuutta. Esimerkiksi keväällä 2018 Rovaniemen soratiekohteella urakarttojen mittauksessa käytetty laserkeilaimen tarkkuus kärsi pölyämisestä, kun mittausajoneuvo ajoi kuormitusajoneuvon perässä mitatessaan maatutkalla kuormituksen aiheuttamaa kosteuden muutosta. Tällaisessa tapauksessa mittausajoneuvolla voisi tehdä kaksi mittausajoa, joista ensimmäisellä mitataan kosteuden pumppautumista ja toisella pölyn laskeuduttua tehdään laserkeilaus urakarttoja varten. Tätä häytti piennettiin esimerkiksi Rovaniemellä keväällä 2018, kun tehtiin ylimääräinen välimittaus ennen kuormitusajoneuvojen ajolinjan muuttamista toisesta mittauspäivästä lähtien (Pekkala et. al. 2019).

## 4.4 Ajosuunta, koekohteen sijainti sekä kuljettajat

Kuormituskokeiden tuloksia analysoitaessa huomattiin, että ajolinjat vaihtelivat suhteessa tiehen piirrettyihin ajolinjoihin mittauspisteiden kohdalla. Seuraavat tekijät lisäsivät ajolinjojen hajontaa halutusta ajolinjasta:

- Ajettaessa mittauskaistan yli molempiin suuntiin ajolinjat erosivat enemmän kuin ajettaessa aina samaan suuntaan. Ajolinjat eroavat useimmiten ajosuunnasta riippuen (kuvassa 4 ajosuuntaa 2 vastaa sininen ja ajosuuntaa 1 kellertävä väri).
- Ajolinjojen ero on suurempi, jos koekohteella on kaarteista tietä (kuvassa 4 mittauspisteeseen tulla suunnassa 2 suoraa tietä pitkin ja suunnassa 1 kaarteesta). Kaarteeseen ei pitäisi tehdä koekohtetta, jos kuormitukset joudutaan ajamaan molempiin suuntiin.
- Eri kuljettajien ajolinjat eroavat jonkin verran toisistaan, vaikka ajolinjan merkintä on sama. Jos mahdollista, kuormitukset olisi tehtävä samoilla kuljettajilla.
- Kuljettajilla menee yleensä 1-2 ajoa vakiintuneemman ajolinjan hakemiseen. Erityisen selkeää tämä oli, jos kaksi rekkaa ajoi peräkkäin (kuvassa 4 rekan 2 ajolinjat). Täten harjoitusajo esi- tai neutralisointikuormituksena voisi olla hyvä menettelytapa.

Oleellisinta koekohteiden valinnassa olisi kuitenkin, että vältettäisiin koekohteita, joiden kuormittaminen yhteen ajosuuntaan on hankalaa. Jos joudutaan ajamaan koekohteella kuormitettavan kaistan yli kahteen suuntaan, olisi ylityksiä oltava parillinen määrä.



Kuva 4. Kyyjärvellä 23. ja 24.10.2018 kuormitusajoneuvojen telien ja yksittäisakselien renkaiden keskikohdan sijainnit ajouralinjaan eli punaiseen viivaan nähden kahdessa kohdassa noin 10 m etäisyydellä toisistaan. Yhtenäisellä viivalla on merkitty etäisyydet laser 1:n kohdalla ja katkoviivalla laser 4:n kohdalla. Laser 1 ja laser 4 olivat 10 metrin etäisyydellä toisistaan tien pituussuunnassa. (Vuorimies et. al. 2019)

## 4.5 Kuormitusajoneuvot

Jos kuormituskokeissa vertaillaan erilaisia kuormitusajoneuvoyhdistelmiä olisi varmistettava, että kuormittavissa ajoneuvoyhdistelmissä seuraavat tekijät olisivat mahdollisimman samankaltaiset:

- kokonaiskuorma, akselipainot ja telipainot
- samanlaiset rengasleveydet sekä mahdollisimman samanlaiset rengaspaineet
- yhdistelmän painon tasainen jakautuminen kummallekin renkaalle akselilla ja kuormitusajoneuvoyhdistelmällä hyvin samanlaisesti.

## 5 7-akselisen ja 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän vertailu

### 5.1 Vertailusta hylätyt kuormituskokeet

Kaikista koekohteista, joissa vertailu 7-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän ja kahden peräkkäin ajavan 7-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän välillä tehtiin, ei saatu edustavia mittaustuloksia vertailua varten. Syynä olivat joko mittaustekniset tekijät tai kuormitusajoneuvoyhdistelmien kesken erilaiset lähtöolosuhteet.

Kevään 2017 Simon koekohteen, jossa oli n. 110 mm paksuinen päällyste ja 0,6 m paksuinen tierakenne sekä pohjamaana hienoa hiekkaa tai silttistä hiekkaa, mittaustulokset jouduttiin hylkäämään. Syynä oli kuormituspäivien runsas muu raskas liikenne, joka esti luotettavan vertailun tekemisen eri kuormitusajoneuvoyhdistelmien välillä. Kumpanakin päivänä muuta raskasta liikennettä oli enemmän kuin omia kuormitusajoneuvoja ja jälkimmäisenä päivänä paljonkin enemmän lähialueella alkaneesta rakennustyöstä johtuen.

Keväällä 2018 Kyyjärven koekohteella tie, jossa oli 30–40 mm paksuinen päällyste ja 0,6 m paksuinen tierakenne sekä pohjamaana turve, ei ollut tiivistynyt roudan sulamisen jälkeen olemattoman raskaan liikenteen vuoksi. Tällöin tiivistymätön rakenne (tierakenne ja pohjamaa) aiheutti olosuhteiltaan eriarvoiset lähtökohdat vertailun tekemiselle. Myös erittäin lämpimät ja aurinkoiset olosuhteet kuivattivat tierakennetta ja pohjamaata parantaen osaltaan tien rasituskestävyyttä ensimmäiseen kuormituspäivään nähden. Lisäksi ensimmäisen kuormituspäivän aamupäivänä laserkeilaimen datan tallentumien ei onnistunut, jolloin oleellista mittaustuloksia luotettavan vertailun tekemiseen jäi saamatta.

Keväällä 2018 Rovaniemen (Jaatila) soratiekohteiden kuormituskokeiden tulokset jouduttiin hylkäämään vertailusta monesta syystä. Kohteilla kuormituspäivät olivat maanantai, keskiviikko ja perjantai jättäen yhden tasaantumispäivän kuormituspäivien väliin. Yhtenä syynä hylkäämiseen oli, että tien pinnan lanaus (tasaus) jätti tierakenteen pintaosaltaan heikosti tiivistyneeksi ja ajouriin irtosoraa, joka osin iskostui tiehen ja osin liikkui pois ajourilta. Lisäksi tierakenne saattoi olla myös huonosti tiivistynyt roudan sulamisen jäljiltä. Kuormitusten välisinä päivinä metsästä oli ajettu puuta pois, jolloin tierakenne oli edelleen tiivistynyt. Kuivan soratien pinnan pölyäminen häiritsi laserkeilaimen mittausta, kun mittaajajoneuvolla ajettiin kuormitusajoneuvoyhdistelmän perässä. Tätä häirtää ei ollut kuormitusten alku ja lopputilanteen välillä, kun tehtiin välimittaus ennen ajolinjan tai kuormitusajoneuvoyhdistelmän muuttamista. Välimittaus ei oltu kuitenkaan tehty ensimmäisenä mittauspäivänä. Tosin on huomioitava, että ensimmäisellä ylityksellä muodostuu yleensä suurin yksittäisen kuormituksen aiheuttama urasyvyyden kasvu tai pysyvä siirtymä.

## 5.2 Vertailussa hyödynnetyt kuormituskokeet

Koekuormitukset, joiden perusteella vertailu 7-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän ja kahden peräkkäin ajavan 7-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän välillä tehtiin, kun ajoneuvoyhdistelmissä kulki mittausalueen läpi sama massa samassa ajassa, olivat seuraavat:

- Keväällä 2017 Karstulassa, jossa oli noin 200 mm paksuinen päällyste ja 1,0 m tierakenne sekä pohjamaa turvetta, kuormitukset tehtiin roudan juuri sulettua. Pieni tihkusade haittasi hieman viimeisenä kuormituspäivänä laserkeilaimella tehdyn urasyvyysmittauksen tulkintaa
- Keväällä 2018 Simossa, jossa oli noin 110 mm paksuinen päällyste ja 0,6 m paksuinen tierakenne sekä pohjamaa hiekkaa, hienoa hiekkaa tai silttistä hiekkaa, kuormitukset tehtiin roudan juuri sulettua. Mittauskaista oli suljettu mittauspäivinä muulta liikenteeltä.
- Keväällä 2017 Kyyjärvellä, jossa oli 30-40 mm paksuinen päällyste ja 0,6 m paksuinen tierakenne sekä pohjamaa turvetta, kuormitukset tehtiin roudan juuri sulettua. Vertailussa oli vain urasyvyyden muutos, kun talvella 2016-2017 routanousu oli tuhonnut pystysuoruuksien.
- Syksyllä 2018 Kyyjärvellä, jossa oli 30-40 mm paksuinen päällyste ja 0,6 m paksuinen tierakenne sekä pohjamaa turvetta, kuormitukset tehtiin kahtena päivänä. Molemmilla kuormitusajoneuvoyhdistelmillä ajettiin molempina päivinä, mutta eri järjestyksessä.
- Syksyllä 2018 Ranualla soratiellä, jossa oli 0,6 m paksuinen tierakenne ja pohjamaa oli turpeen sekaista silttimoreenia, kuormitukset tehtiin kahtena päivänä. Molemmilla kuormitusajoneuvoyhdistelmällä ajettiin molempina päivinä, mutta eri järjestyksessä. Vertailussa oli vain urasyvyyden muutos, koska uutta pystysuoruuksien anturia ei asennettu oletettavasti roudan rikkoman pystysuoruuksien anturin tilalle.

## 5.3 Vertailun tulokset

Kuormitukset tehtiin kymmenen 7-akselisen tai viiden 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmän sarjoina. Taulukossa 1 on esitetty vertailussa mukana olleista koekohteista laserkeilaimella mitatut maksimiurasyvyyksien muutokset ja pystysuoruuksien antureilla mitatut tien päällysteen alapinnan pystysuoruuksien muutokset koekohteen yli ajaneiden kuormitusajoneuvoyhdistelmien massaa kohden. Tien päällysteen alapinnan pystysuoruuksien muutokset on laskettu joko ajouralinjalla sijainneesta pystysuoruuksien anturista (vuosi 2017) tai kahden pystysuoruuksien anturin välisestä siirtymäerosta (vuosi 2018), kun toinen pystysuoruuksien anturi sijaitsi ajouralinjalla ja toinen pystysuoruuksien anturi sijaitsi siitä 0,5 metriä tien keskiviivaa kohden. Taulukossa 1 urasyvyyden kasvu on määritetty pääsääntöisesti koekohteista pitkältä väliltä eli alueelta, jossa kuormitusajoneuvoyhdistelmät ajoivat merkittyä ajouralinjaa pitkin ja lyhyeltä väliltä eli 10–15 metrin alueelta pistemäisten antureiden ympäristöstä. Samat määritykset tehtiin vuonna 2018 myös poistamalla 14-akselisen ajoneuvoyhdistelmän ensimmäinen ylitys tuloksista sekä 7-akselisen ajoneuvoyhdistelmän kaksi ensimmäistä ylitystä laskennoista. Lisäksi syksyn 2018 mittaustuloksista laskettiin samoille suureille keskiarvot, jotka ovat taulukossa alimmaisina.

Taulukossa 1 on vihreällä merkitty kunkin vertailevan koekuormituksen pienin urasyvyyden kasvun tai siirtymäeron muutoksen arvo (urasyvyyden pieneneminen) ja punaisella suurin urasyvyyden kasvu. Mikäli arvo oli selkeästi suurempi kuin vertailtavan kuormitusajoneuvoyhdistelmä arvo, se on lihavoitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa urasyvyyden pienenemistä. Taulukosta 1 nähdään, että punaiset arvot ovat heikompi-rakenteisilla Ranuan ja Kyyjärven koekohteilla 14-akselisten ajoneuvoyhdistelmien kohdilla ja vihreät 7-akselisten ajoneuvoyhdistelmien kohdilla yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Simon ja Karstulan koekohteilla, joiden tien rakenne oli parempi, eroa ei muodostunut.

**Taulukko 1.** Vertailussa mukana olleista koekohteista laserkeilaimella mitatut urasyvyyden muutokset ja pystysiirtymäantureista mitatut tien päällysteen alapinnan pystysiirtymän muutokset koekohteen yli ajaneiden kuormitusajoneuvoyhdistelmien massaa kohden. Pitkä ja lyhyt väli edustavat eripituiselta matkalta määritettyä urasyvyyden kasvua.

Kuormitus	Urakasvu tai pysyvä siirtymäero, µm/tn					
	Kaikki ylitykset			Ensimmäiset ylitykset pois		
	Pitkä väli	lyhyt väli	siirtymäero*	Pitkä väli	lyhyt väli	siirtymäero*
Ranua 2.10.2018 ap 14-aks	1,4	<b>2,8</b>	--	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>	--
Ranua 2.10.2018 ip 7-aks	<b>0,6</b>	2,0	--	0,0	0,7	--
Ranua 3.10.2018 ap 7-aks	1,2	<b>1,1</b>	--	<b>-0,8</b>	<b>-2,3</b>	--
Ranua 3.10.2018 ip 14-aks	<b>1,5</b>	1,5	--	0,0	1,1	--
Kyyjärvi 30.5.2017 7-aks	<b>0,6</b>	--	--	--	--	--
Kyyjärvi 31.5.2017 14-aks	<b>1,1</b>	--	--	--	--	--
Kyyjärvi 23.10.2018 ap 14-aks	0,6	1,6	<b>1,2</b>	<b>-0,9</b>	0,3	<b>0,6</b>
Kyyjärvi 23.10.2018 ip 7-aks	0,1	<b>-1,1</b>	<b>0,1</b>	-0,1	<b>-1,5</b>	<b>0,0</b>
Kyyjärvi 24.10.2018 ap 7-aks	<b>-0,1</b>	-0,5	0,9	<b>-0,9</b>	0,2	0,4
Kyyjärvi 24.10.2018 ip 14-aks	<b>0,6</b>	<b>1,7</b>	0,4	<b>1,2</b>	<b>1,9</b>	0,4
Simo 5.6.2018 7-aks	0,1	--	--	--	--	--
Simo 6.6.2018 14-aks	0,0	--	--	--	--	--
Karstula 16.5.2017 7-aks	0,0	0,0	0,1 **	--	--	--
Karstula 17.5.2017 14-aks	0,0	0,0	0,1**	--	--	--
<b>Keskiarvo Ranua 14-aks</b>	<b>1,5</b>	<b>2,2</b>	--	<b>0,5</b>	<b>1,2</b>	--
<b>Keskiarvo Ranua 7-aks</b>	<b>0,9</b>	<b>1,5</b>	--	<b>-0,4</b>	<b>-0,8</b>	--
<b>Keskiarvo Kyyjärvi 2018 14-aks</b>	<b>0,6</b>	<b>1,6</b>	<b>0,8</b>	<b>0,1</b>	<b>1,1</b>	<b>0,5</b>
<b>Keskiarvo Kyyjärvi 2018 7-aks</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>-0,5</b>	<b>-0,7</b>	<b>0,2</b>

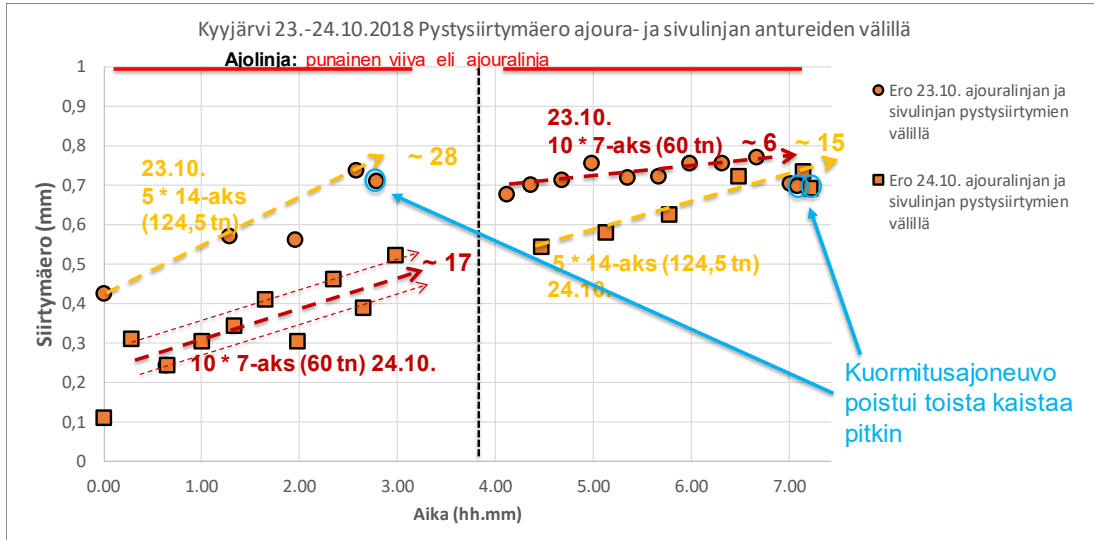
Kohteen suurin mittausarvo

Kohteen pienin mittausarvo

\* Pystysiirtymäanturien välinen siirtymäero eli tien pinnan painumaero 0,5 m matkalla

\*\* Pystysiirtymäanturin siirtymä

Kuvassa 5 on esitetty esimerkkinä Kyyjärven koekohteen tien päällysteen alapinnan pystysiirtymien eron muodostumista syksyn 2018 koekuormituksissa. Kumpanakin mittauspäivänä siirtymäero aloitettiin lukemasta nolla ja kumpanakin päivänä siirtymäero kasvoi 0,7–0,8 mm. Ensimmäisen mittauspäivän aamuna koekohtetta kuormitettiin 14-akselisella ajoneuvoyhdistelmällä ja ilta-päivällä 7-akselisella ajoneuvoyhdistelmällä. Toisena mittauspäivänä järjestys oli päinvastainen. Aamupäivänä ja ilta-päivänä 14-akselisella ajoneuvoyhdistelmällä pystysiirtymäeron kasvu oli selkeästi suurempi ensimmäisen kuormitussarjan ensimmäisen kuormituksen jälkeen kuin 7-akselisella ajoneuvoyhdistelmällä. Tilanne oli sama verrattaessa 23.10.2018 kuormituksia keskenään. Poikkeuksena oli 24.10.2018, jolloin muodostunut pystysiirtymäero oli 14- ja 7-akselisella ajoneuvoyhdistelmillä melkein sama.



Kuva 5. Kyyjärven kohteen syksyn 2018 mittauspäivinä ajoura- ja sivulinjalta mitattujen pysyvien siirtymien ero ensimmäisen kuormitusajoneuvon ylityksestä kuluneen ajan suhteen kyseisenä mittauspäivänä. (Vuorimies et al. 2019)

Kuormitusajoneuvoyhdistelmien vertailukokeissa 14-akseliset kuormitusajoneuvoyhdistelmät aiheuttivat selkeästi suuremman urasyvyyden kasvun mittauskohteen yli kulkenutta massaa kohden kuin 7-akseliset kuormitusajoneuvoyhdistelmät, kun sama massa kulki koekohteen yli samassa ajassa sekä Kyyjärven turvepohjamaalla sijainneella 30–40 mm päällysteellä olevalla noin 0,6 m paksuisella tierakenteella että Ranuan soratiellä. Lisäksi havaittiin seuraavaa:

- Kuormitusajoneuvojen ajolinjojen mittauksissa 14-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien ajolinjat jakautuivat hieman laajemmalle alueelle kuin 7-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien ajolinjat.
- Tämä on todennäköisesti pienentänyt 14-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien mitattua urasyvyyden kasvua verrattuna tilanteeseen, jossa 14-akselisen kuormitusajoneuvoyhdistelmien ajolinjat olisivat kulkeneet 7-akselisten ajoneuvoyhdistelmien ajolinjoja vastaavalla alueella.
- Siksi määritetyt erot 14- ja 7-akselisten ajoneuvoyhdistelmien välillä olisivat todellisuudessa olleet jonkin verran suurempia, jos kuormitusajoneuvoyhdistelmät olisivat ajaneet täsmälleen samoja ajolinjoja pitkin.

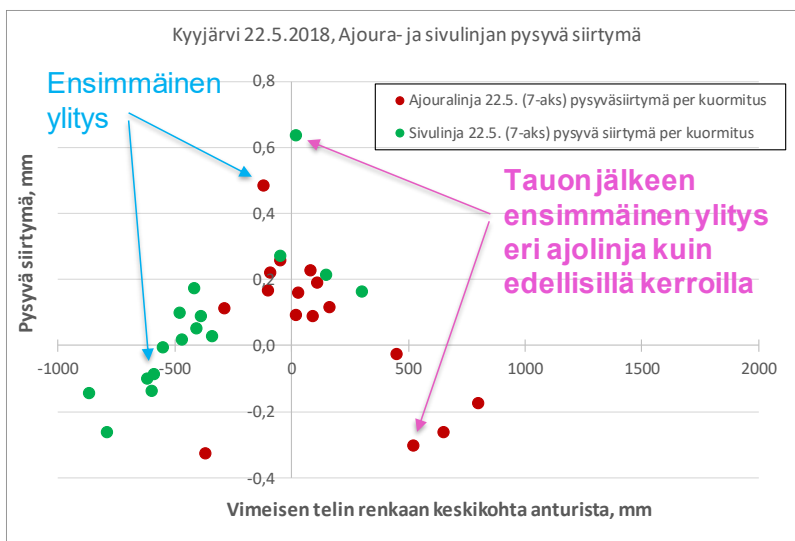
Tien rakenteiden ollessa parempia ei havaittu eroa urasyvyyden kasvun perusteella 7- ja 14-akselisten kuormitusajoneuvoyhdistelmien välillä, kun sama massa kulki koekohteen yli samassa ajassa. Tämä havaittiin roudan sulamisen jälkeen kahdessa koekohteessa, jotka olivat

- Simo, jossa oli noin 110 mm paksuinen päällyste ja 0,6 m paksuinen tierakenne sekä pohjamaa hiekkaa, siltistä hiekkaa tai hienoa hiekkaa;
- Karstula, jossa oli noin 200 mm paksuinen päällyste ja 1,0 m paksuinen tierakenne sekä pohjamaa turvetta.

## 6 Muut keskeiset koetulokset

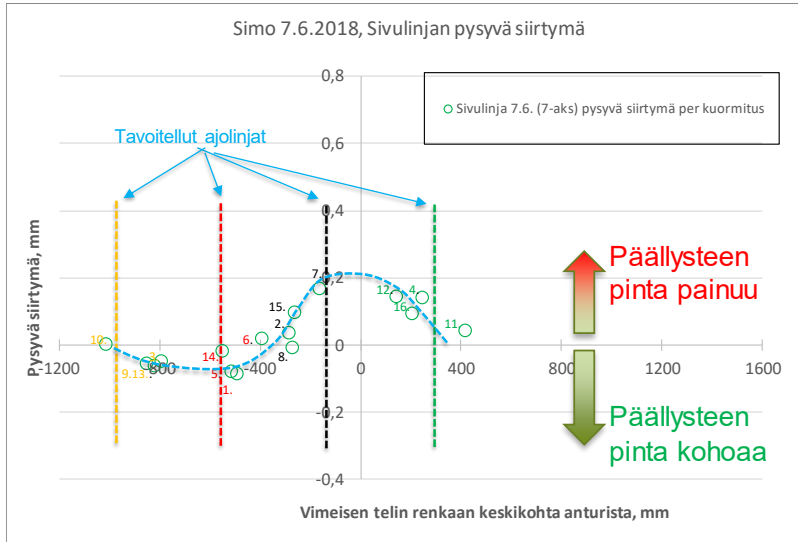
### 6.1 Päällysteen alapinnan pysyvä siirtymä ajolinjan suhteen

Kuvassa 6 on esitetty Kyyjärven koekohteella 22.5.2018 eri ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät kahdesta pystysiirtymäanturista mitattuna. Kuormitusajoneuvon ajaessa ensimmäisen kerran anturin yli muodostui tiehen anturin kohdalle suurin pysyvä siirtymä. Tie ei ollut tiivistynyt roudan sulamisen jäljiltä. Yli 0,5 m etäisyydellä paripyörärenkaiden keskikohdasta tien pinta kohosi.



Kuva 6. Kyyjärven kohteella 22.5.2018 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteessa kuormitusajoneuvon viimeisen telin renkaan sivusijaintiin. (Vuorimies et al. 2019)

Kuvassa 7 on esitetty Simon koekohteella 7.6.2018 eri ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät sivulinjan pystysiirtymäanturilta. Ylitykset ajettiin neljää eri ajolinjaa pitkin. Kuormitusajoneuvon renkaan keskikohdan kulkiessa noin 0,3 m etäisyydellä sivulinjan siirtymäanturista tien pinta painui sivulinjan anturin kohdalla. 0,5–0,8 m etäisyydellä paripyörärenkaiden keskikohdasta tien pinta kohosi.



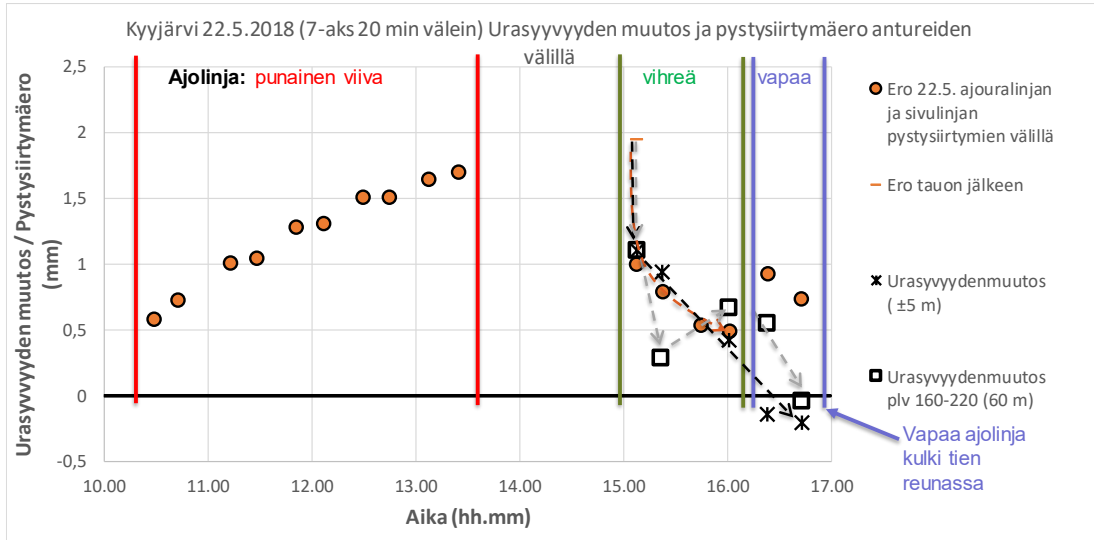
Kuva 7. Simon kohteella 7.6.2018 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteessa kuormitusajoneuvon viimeisen telin renkaan sivusijaintiin.

Sama ilmiö havaittiin myös vuonna 2017 Karstulan koekohteella, jossa päällysteen alapinnan pysyvää siirtymää palautui (tien pinta kohosi) muiden ajoneuvojen renkaiden keskikohdan kulkiessa yli 1,5 metrin etäisyydellä renkaan keskikohdasta. Täten raskaan liikenteen kuormitus aiheuttaa uraa renkaan alla, mutta myös nostaa tien pintaa renkaan viereisellä alueella. Tämä tarkoittaisi, että vastakkaisten kaistojen liikenne palauttaa pysyvää siirtymää ajokaistojen sisemmällä pyöräurilla eli pienentää ja loiventaa urasyvyyttä. Tämä selittäisi osaltaan, miksi ajokaistojen sisemmät pyöräurat ovat ulkouria matalampia.

## 6.2 Urasyvyyden pienentäminen ajolinjaa muuttamalla

Kuvassa 8 on esitetty ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäanturien välinen pysyvien siirtymien ero ja eri tarkasteluväleiltä mitatut urasyvyyden muutokset Kyyjärven koekohteelta 22.5.2018. Aamupäivällä laserkeilaimen data ei tallentunut ja tarkasteluväleillä urasyvyyden muutos on asetettu alkamaan samasta kohdasta kuin pystysiirtymäantureiden ero tauon jälkeen. Iltapäivän kuormituksesta nähdään  $\pm 5$  m etäisyydeltä pystysiirtymäantureista mitattujen urasyvyydenmuutosten olevan saman suuruisia kuin pystysiirtymäantureilla mitattu siirtymäero, kun kuormitusajoneuvot ajoivat sivulinjaa pitkin. Tarkasteluvälillä pvl 160–220 pysyvien siirtymien ero laserkeilaimella mitattuun urasyvyyden muutokseen verrattuna oli suurempi. Ajolinjan vaihtuminen 0,65 m keskeemmälle tietä pienensi urasyvyyttä. Kuormitusajoneuvojen ajaessa vapaata linjaa lähellä tien reunaa pysyvien siirtymien ero erosi urasyvyyden muutoksesta. Tämä johtunee siitä, että kuormitusajoneuvon ajaessa tien reuna-alueella, erityisesti tämä alue painuu alaspäin ja urasyvyyden määrityksen referenssilangan toinen reuna on alempana, mikä johtaa pienempään urasyvyyteen.



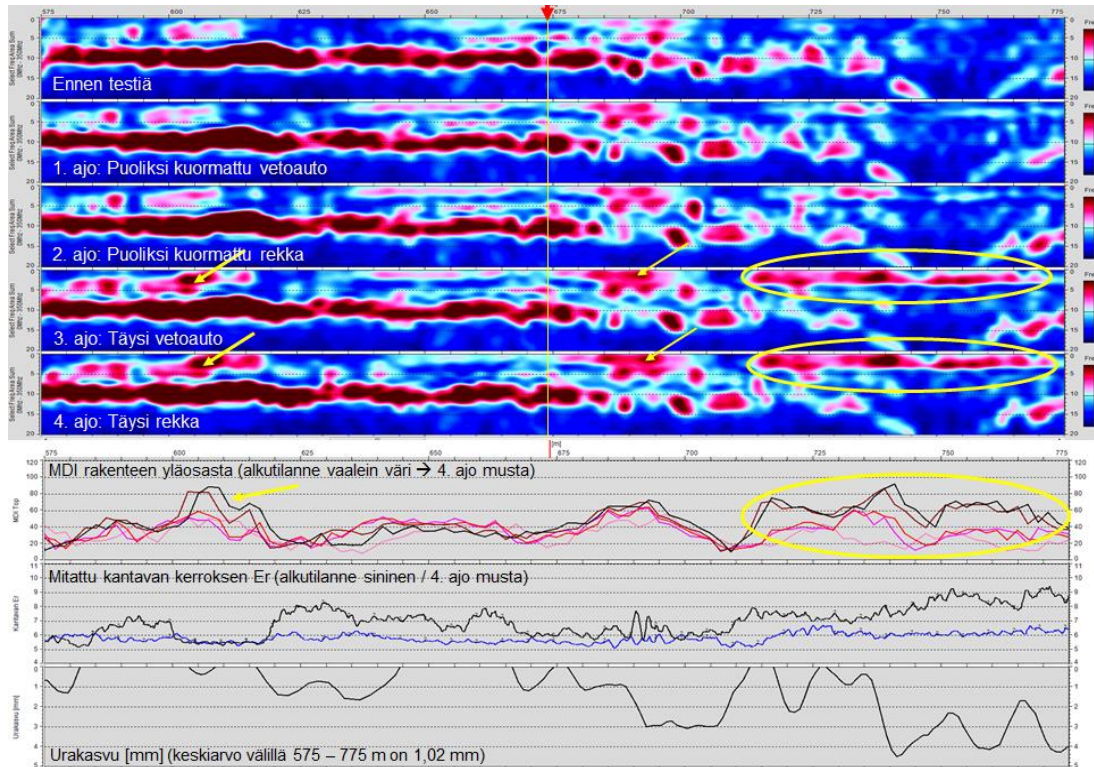


Kuva 8. Ajoura- ja sivulinjan pystysiirtymäantureiden ero ja laserkeilaimella määritetyt urasyvyyden muutokset 10 m ja 60 m pituisilta väleiltä ajan suhteen Kyyjärven kohteella 22.5.2018. Urasyvyydataa oli vain iltapäivältä. (Vuorimies et al. 2019)

Samankaltainen urasyvyyden pientyminen tapahtui myös seuraavana päivänä 14-akselisella ajoneuvoyhdistelmällä. Täten ajolinjaa muuttamalla voidaan pienentää uran syvyyttä tai hidastaa uran muodostumista.

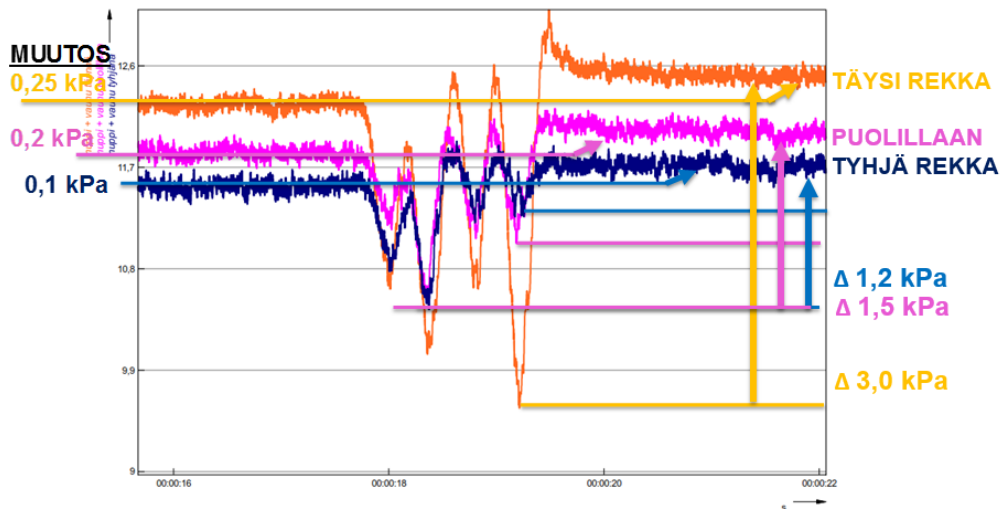
## 6.3 Kosteuden pumppautuminen ja urasyvyyden kasvu

Kuvassa 9 on esitetty maatutkan perusteella lasketut kosteusprofiilikuvat sekä laserkeilaimen perusteella laskettu urasyvyyden kasvu Inarin koekohteelta syksyiltä 2015. Koekohteella tien päällyste oli 70–90 mm paksuinen rakennekerrosten paksuuden ollessa 0,6 m kostella pohjamaalla. Kuvasta nähdään, että tien rakenteet Percoaseman kohdalla olivat muuten varsin kuivat ennen testiä, mutta anomalista kosteutta rakenteissa tavattiin vain paaluvälillä 600–615 m ja heti Percoaseman jälkeen paaluvälillä 680–700 m. Samoilla kohdilla pumppautumiseen viittaava yli 70 % kyllästysaste ylittyi selvästi kuormitusten aikana, sekä lisäksi edempänä paaluvälillä 715–770 m. Sama havaitaan myös rakenteen yläosan MDI-arvosta (moisture damage index), joka on noilla kohdilla kasvanut kuormitusten aikana noin 2–3-kertaiseksi alkutilanteeseen verrattuna. Näissä kohdissa tie myös urautui selvästi kuormituskokeiden aikana, mikä nähdään kuvassa 9 alimpana olevasta urakasvukuvaajasta. Samoin kantavan kerroksen dielektrisyys on kohonnut selvästi, mikä viittaa kosteuden lisääntymiseen. Pohjamaan rajapinnassa oleva kosteus näkyy selkeänä punamustana nauhana noin 10 nanosekunnin (500–600 mm) kohdalla, jonka alta menetelmällä ei vielä kyetty laskemaan signaalinvaimennuksen takia. Suurin urakasvu havaittiin siis samoilla kohdilla, missä maatutkamittauksissa havaittiin pumppautumiseen viittaavaa kosteuden lisääntymistä rakenteessa. Suurin kuormitusvaiheiden välinen urakasvu havaittiin puoliksi kuormatun rekan ja täyden vetoauton välillä, missä kohdassa muodostui lähes puolet kuormitusajojen aikana mitatusta keskimääräisestä urasyvyyden kasvusta. (Vuorimies et al. 2018)



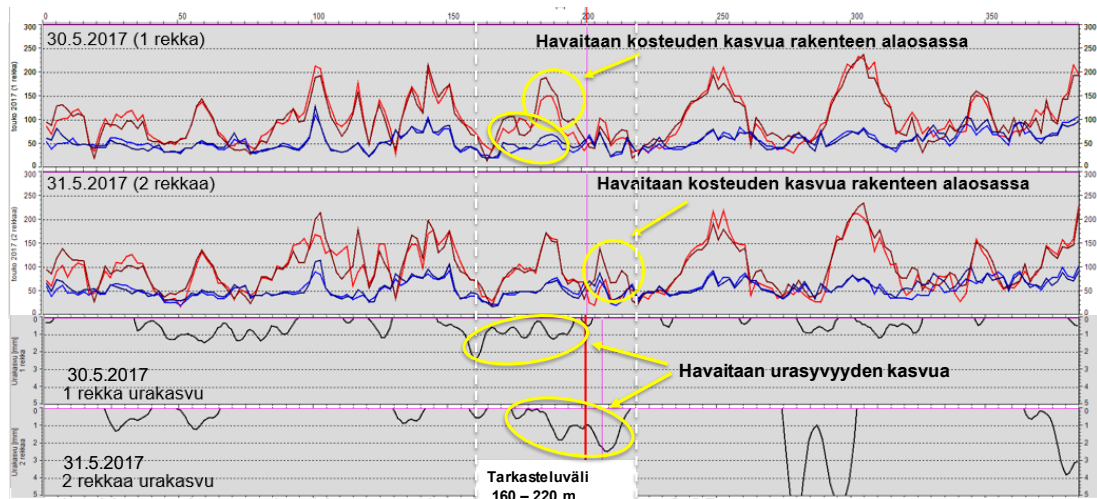
Kuva 9. Maatutkan MDI (moisture damage index) analyysitulokset Inarin koekohteen paaluväliltä 575-775 m. Pystymittakaava on nanosekunti (ns) ja yksi nanosekunti vastaa noin 60 mm paksuutta. Punaiset kohdat kuvaavat korkeampaa materiaalin kyllästysastetta. Keltaisella nuolella tai ympyröinnillä on merkitty paikat, joissa kyllästysaste on selvästi noussut. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja keltaisella pystyviivalla. Kosteusprofiilien alla on esitetty rakenteen yläosan MDI jokaisen ajon jälkeen, mitattu kantavan kerroksen dielektrisyys alku- ja lopputilanteissa sekä urakasvu. (Vuorimies et al. 2018)

Kuvassa 10 on esitetty huokosvedenpaineessa tapahtuneet muutokset koko rekan (vetoauto ja perävaunu) ylittäessä ensimmäistä kertaa anturin kyseessä olevalla kuormitusasteella anturin sijainnin ollessa 0,7 m syvyydellä ja 1,3 m ajo-uran keskeltä tien reunaan päin Inarin koekohteella. Kuvasta nähdään, että huokosvedenpaine kasvoi ylityksen jälkeen. Tyhjällä rekalla kasvu oli pieniä, mutta kuormituksen kasvaessa se oli selkeämpää ollen täyden rekan ylityksellä 0,25 kPa. Huomattavaa oli myös, että huokosvedenpaineen kasvu tapahtui vasta perävaunun osalla. Kun kuormitus tehtiin samalla kuormitusasteella pelkällä vetoautolla ennen perävaunun lisäämistä, huokosvedenpaineen taso ei muuttunut ylityksen jälkeen. Huokosvedenpaineen hetkellisen muutoksen arvot olivat kokonaisella rekalla suurempia kuin pelkällä vetoautolla. Huomattavaa on myös, että täydellä rekalla suurin ero muodostuu peräkärryn viimeisen telin ja ylityksen jälkeisen tilan välillä. (Vuorimies et al. 2018)



Kuva 10. Inarin kohteella huokosvedenpaineessa tapahtuneet muutokset vetoauton ja perävaunun ylittäessä ensimmäistä kertaa anturin kyseessä olevalla kuormitusasteella. Vaaka-akselilla on aika. Anturi sijaitsi 0,7 m syvyydellä ajouran pinnasta ja 1,3 m ajouran keskeltä tien reunaan päin. (Vuorimies et al. 2018)

Kuvassa 11 on esitetty Kyyjärven koekohteella keväällä 2017 havaittua korkean kosteuden tai kosteuden kasvun eli pumppautumisen ja urautumisen välistä yhteyttä. Kuvasta nähdään urasyvyyden kasvun muodostuneen alueille, joissa kosteus on ollut suuri tai se kasvaa selkeästi.



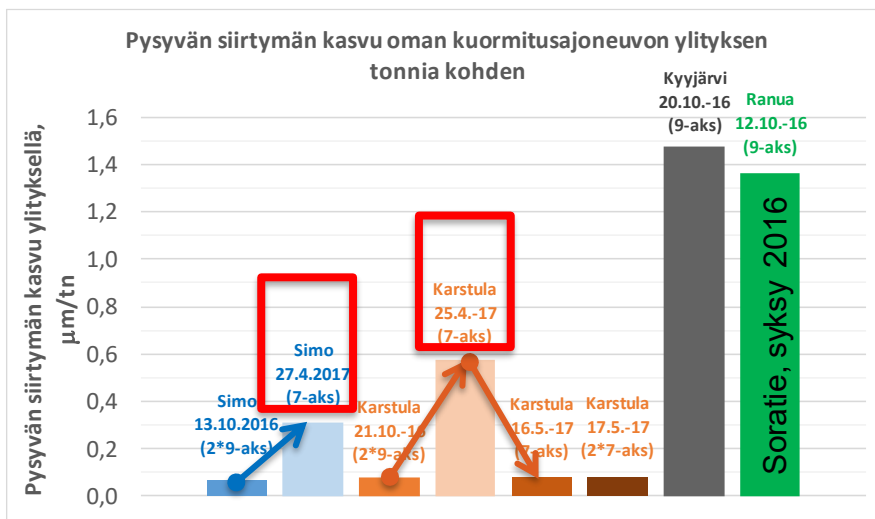
Kuva 11. MDI-arvojen kuvaajat Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) toukokuun lopussa 2017 yhden ja kahden rekan päiviltä ennen kuormitusajoja sekä niiden jälkeen. Punainen = rakenteen alaosa MDI / sininen = Total MDI ja vaaleampi väri = tilanne ennen kuormitus-ajoja / tummempi väri = tilanne viimeisen ajon jälkeen. Lisäksi alempana on urasyvyyden kasvut samalta ajalta. Percoaseman kohta on merkitty punaisella pystyviivalla.

Verrattaessa maatumkatadatasta laskettuja kosteusprofileja ja kyllästysastetta numeerisessa muodossa kuvaavia MDI-arvoja (Moisture Damage Index) urasyvyyden muutoksiin voitiin tutkimusaineiston perusteella havaita, että

- o Kun kosteus ei muuttunut, urasyvyyden muutokset olivat enintään pieniä.
- o Kohdissa, joissa kosteus (MDI) kasvoi, kasvoivat urasyvyydet.
- o Paikoissa, joissa kosteus (MDI) oli valmiiksi korkea, urasyvyydet muuttuivat herkemmin.

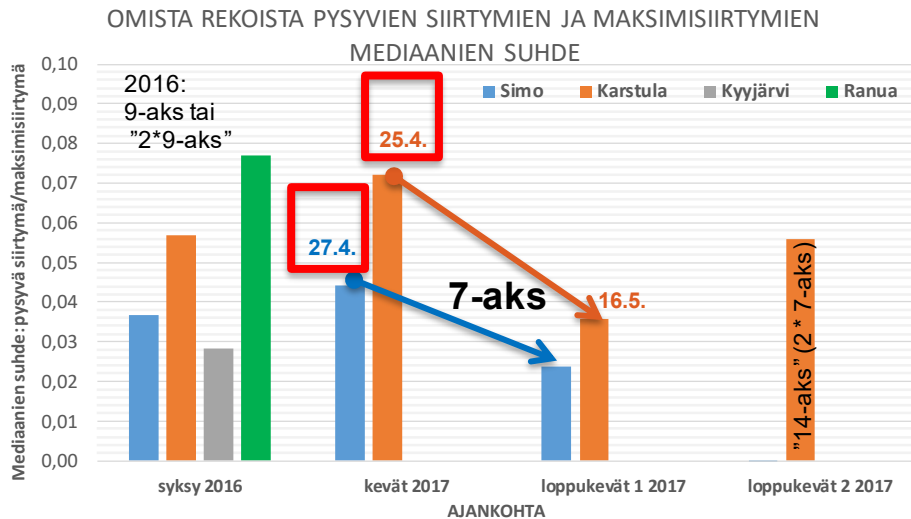
## 6.4 Osittain sulaneen tierakenteen herkkyys pysyville siirtymille

Keväällä 2017 kuormitukset toteutettiin Simon ja Karstulan koekohteilla huhtikuussa, kun tierakenne oli sulanut noin 0,5 m syvyyteen ja sen alla tierakenne oli vielä osittain jäässä. Saman kevään toisissa kuormituksissa routa oli jo sulanut tai lähes sulanut. Kuvassa 12 on esitetty tien päällysteen alapinnan pysyvän siirtymän kasvu ajouralinjalla syksyn 2016 ja kevään 2017 kuormituksissa. Ranualla ei tehty kuormituksia vuonna 2017 ja Kyyjärven pystysiirtymäanturin oli routanousu rikkonut talvella 2016–2017. Kuvasta havaitaan, että Simossa 27.4.2017 ja Karstulassa 25.4.2017 pysyvän siirtymän kasvu oli selkeästi suurempi kuormitusajoneuvon massaa kohden kuin syksyllä 2016. Karstulassa koekohteessa, jossa tien rakenne oli mittauskohteista paras, roudan sulamisen jälkeen vuonna 2017 pysyvän siirtymän kasvu oli samaa suuruusluokkaa kuin syksyllä 2016 eli selkeästi pienempi kuin pari viikkoa aiemmin tierakenteen ollessa sulanut noin 0,5 metrin syvyyteen. Kyyjärven ja Ranuan koekohteissa tien rakenne oli selkeästi heikompi kuin Simossa ja Karstulassa. Simossa ja Karstulassa keväällä 2017 mitattujen pysyvien pystysiirtymien perusteella molemmat tierakenteet vaikuttivat olevan alttiita urautumiselle kelirikon alkuvaiheessa.



Kuva 12. Vuosina 2016 ja 2017 koekohteista mitatut tien alapinnan pystysiirtymien kasvut kohteen yli kulkeneiden kuormitusajoneuvojen massa kohden.

Kuvassa 13 on esitetty kuormitusajoneuvojen eli omien rekkojen aiheuttamien pysyvien siirtymien ja maksimisiirtymien suhde vuosien 2016 ja 2017 kuormituksissa. Mitä suurempi suhde on, sitä suurempi pysyvä siirtymä on muodostunut suhteessa ylityksen aiheuttamaan maksimisiirtymään. Kevään 2017 mittauksissa, jolloin tierakenne oli sulanut noin 0,5 m syvyyteen 27. ja 25.4.2017, havaittiin koekohteiden suurimmat pysyvien siirtymien ja maksimisiirtymien suhteet, mikä indikoi tierakenteen alttiutta pysyville siirtymille pohjamaan ollessa jäässä.



Kuva 13. Omien rekkojen eli kuormitusajoneuvojen aiheuttamien pysyvien siirtymien ja maksimisiirtymien suhde vuosien 2016 ja 2017 kuormituksista.

Simon ja Karstulan koekohteiden pystysiirtymien perusteella molemmat tierakenteet olivat altteimmillaan urautumiselle kelirikon alkuvaiheessa. Selkeästi tämä näkyi Karstulan kohteessa, jossa tien rakenne oli mittauskohteista paras.

## 7 Johtopäätökset

Vuosina 2017–2018 tutkimuksissa verrattiin 7-akselisten yhdistelmien aiheuttamia urasyvyyden kasvuja 14-akselisten yhdistelmien aiheuttamiin urasyvyyksien kasvuihin, kun sama massa kuormitti rakennetta samassa ajassa. Vertailukelpoiset kuormitukset tehtiin roudan sulamisen jälkeen ja kuivana syksynä 2018 suhteellisen lyhyillä kuormitussarjoilla. Kuormitusten perusteella:

- Päällysteen paksuuden ollessa 180 mm ja tierakenteen paksuuden ollessa 1,0 m ja pohjamaan ollessa turvetta kuormitukset eivät aiheuttaneet mitattavaa urasyvyyden kasvua.
- Päällysteen paksuuden ollessa 110 mm ja tierakenteen paksuuden ollessa 0,6 m ja pohjamaan ollessa pääsääntöisesti hienoa hiekkaa kuormitukset eivät aiheuttaneet mitattavaa urasyvyyden kasvua.
- Päällyste paksuuden ollessa 40 mm ja pohjamaan ollessa turvetta 14-akseliset yhdistelmät aiheuttivat suuremmat urasyvyyden kasvut kuin 7-akseliset yhdistelmät, kun sama massa kuormitti rakennetta samassa ajassa. Sama havainto tehtiin soratiellä.

Tutkimusten perusteella tierakenteet olivat herkimmillään urautumiselle pohjamaan ollessa turvetta tai muuta erityisen pehmeää pohjamaata ja lisäksi roudan sulamisen aikana pohjamaan ollessa silttiä tai hienoa hiekkaa. Tämän tutkimuksen yhteydessä ei vastaavissa olosuhteissa tehty vertailevia kuormituskokeita 7-akselisten ja 14-akselisten yhdistelmien välillä kohteissa, joissa päällysteen paksuus olisi ollut 100–150 mm. Päällysteen paksuuden lisäksi tierakenteen kokonaispaksuus ja tien kerrosrakenteiden materiaalit vaikuttavat myös tien urautumiseen. Tehtyjen lyhyiden kuormituskokeiden ja aiempien kokemusten perusteella voidaan arvioida, että

- A. Ohutpäällysteisillä teillä, joiden päällysteen paksuus on alle 150 mm, nk. neljännen potenssin sääntö (AASHO-teoria) ei todennäköisesti pidä paikkaansa kaikissa olosuhteissa, vaan 9–14-akseliset yhdistelmät aiheuttanevat enemmän urautumista kuin 7-akseliset yhdistelmät, kun sama massa kuormittaa rakennetta samassa ajassa, jos pohjamaana on
  - turve tai erityisen pehmeä savi maan ollessa sulana tai
  - siltti tai hieno hiekka roudan sulamisen aikana
- B. Kantavilla pohjamailla sijaitsevilla päällystetyillä teillä sekä paksupäällysteisillä teillä, joiden päällysteen paksuus on yli 200 mm, AASHO-teoria pitää paikkansa, jolloin 9...14-akseliset yhdistelmät eivät todennäköisesti aiheuta sen enempää urautumista kuin 7-akseliset yhdistelmät, kun kuljetettava massa on saman suuruinen samassa ajassa.

Raskaiden ajoneuvojen ajolinjat vaikuttavat merkittävästi urien kasvunopeuteen. Keväällä 2018 ajolinjojen vaihtelulla kyettiin pienentämään urasyvyyttä Kyyjärven ja Simon koekohteilla. Automaattisen ohjauksen avulla osa ajoneuvoista voitaisiin ohjata pienentämään uria ainakin suorilla tieosuuksilla. Jos automaattisella ohjauksella kulkevia ajoneuvoja ei ohjata ajamaan eri ajolinjoja vaan ne kulkevat täsmälleen samaa ajolinjaa pitkin, poistuu ajolinjojen vaihtelun urakasvua pienentävä vaikutus, jolloin urat syvenevät nopeammin ja urien reunat tulevat jyrkemmiksi. Ajolinjojen automaattisen ohjaukseen liittyen pitäisi tutkia, kuinka lähellä tien reunaa raskaita ajoneuvoja voidaan ajattaa tierakenteen vaurioiden nopeutumatta raskaan ajoneuvon tyyppillisen ajolinjan aiheuttamiin vaurioihin verrattuna.

---

Simossa ja Karstulassa muiden mitattujen ajoneuvojen ylitykset palauttivat pysyvää muodonmuutosta niiden kulkiessa jopa 1,5–2,0 m etäisyydellä anturista. Tämä tarkoittaisi, että vastakkaisten kaistojen liikenne palauttaa pysyvää siirtymää ajokaistojen sisemmillä pyöräurilla eli pienentää ja loiventaa urasyvyyttä. Tämä selittäisi osaltaan, miksi ajokaistojen sisemmät pyöräurat ovat ulkouria matalampia.

Mittaukset osoittivat myös, että tierakenteen kohdissa, joissa havaittiin kosteuden kasvua MDI (moisture damage index) -analyysissä, muodostui selkeää urakasvua.

Tierakenteen ollessa vielä osittain jäässä Simossa ja Karstulassa keväällä 2017 mitattujen pysyvien pystysiirtymien perusteella molemmat tierakenteet olivat alttiita urautumiselle kelirikon alkuvaiheessa. Erityisen selkeästi tämä näkyi Karstulan kohteessa, jossa tien rakenne oli mittauskohteista paras.



## Lähteet

Pekkala, V. ja Haataja, M. 2019. HCT-yhdistelmien vaikutus soratien urautumiseen. Raportti n:o 10. Oulun yliopisto. Koneensuunnittelun yksikkö. 68 s ja 42 liites.

<http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526224817.pdf>

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. 115 s ja 13 liites.

[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2018-63\\_tierakenteen\\_rasittuminen\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-63_tierakenteen_rasittuminen_web.pdf)

Vuorimies, N., Kurki, A., Kolisoja, P., Varin, P. & Saarenketo, T. 2019. Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuonna 2018. Väyläviraston tutkimuksia 17/2019. 102 s ja 8 liites.

[https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt\\_2019-17\\_tierakenteen\\_rasittuminen\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt_2019-17_tierakenteen_rasittuminen_web.pdf)







ISSN 2490-0982  
ISBN 978-952-317-745-1  
[www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)