

Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin
HCT-yhdistelmien koekuormituksissa
vuosina 2015–2017



Nuutti Vuorimies, Antti Kalliainen, Jonna Rossi,
Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin, Timo Saarenketo

Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015–2017

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 63/2018

Liikennevirasto

Helsinki 2018

Kannen kuva: Nuutti Vuorimies

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-652-2

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Nuutti Vuorimies, Antti Kalliainen, Jonna Rossi, Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin ja Timo Saarenketo: Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015–2017. Liikennevirasto, tekniikka- ja ympäristöosasto. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 63/2018. 115 sivua ja 4 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-652-2.

Avainsanat: raskaat ajoneuvot, tierakenteet, monitorointi, urautumat, kosteus

Tiivistelmä

Tässä raportissa esitetään tulokset vuosina 2015–2017 tehdyistä tutkimuksista raskaiden ajoneuvojen kuormitusvaikutuksista tierakenteisiin. Erityisenä tarkastelun kohteena oli peräkkäisten akselien kuormitusvaikutuksesta mobilisoituvat kumulatiiviset muodonmuutokset ja mahdollinen tierakenteeseen suuntautuva veden pumpautuminen, kun tie sijaitsee pehmeällä pohjamaalla. Vaiheittain tilattujen kolmen tutkimuksen mittauskohteet valikoituivat suurelta osalta kosteutta kuvaavien dielektrisyyssarvojen mittauksen mahdollistavien Percoasemien sijainnin pohjalta. Dielektrisyyssarvojen lisäksi kosteuden muutoksia seurattiin tierakenteeseen asennettujen huokospaineantureiden ja tien pinnalta tehtyjen maatumittauksien MDI-analyysien (kosteusprofiilin muuttuminen) avulla. Muodonmuutoksia havainnoitiin tierakenteeseen asennetuilla päällysteen alapinnan siirtymäantureilla ja RDSV-mittausauton laserkeilaimella mitatuilla urasyvyyksillä. Kuormitusajoneuvojen pysymistä ohjatulla ajouralla seurattiin vuonna 2016 mittamatolla ja videokuvauksella ja vuonna 2017 lisäksi etäisyyslaserilla.

Ensimmäinen hyvin nopeasti Inarissa (Mt 9553) syksyllä 2015 mobilisoitu mittaus poikkesi kuormitustavaltaan muista, koska kuormittavan ajoneuvon kuormitusta muutettiin tyhjästä ajoneuvosta osittain lastatun kautta täyteen lastatutuksi. Toisessa vaiheessa syksyn 2016 neljässä mittauskohteessa, joista yksi oli Ranuan soratiekohde (Mt 18824), noin 76 tn 9-akselisilla rekoilla kuormitettiin tierakennetta säännöllisin väliajoin. Kolmannessa vaiheessa keväällä 2017 mittaukset tehtiin kolmessa kohteessa ja jokaisessa niistä kolmena päivänä. Mittauspäivistä ensimmäinen oli roudan sulamisvaiheessa ja kaksi viimeistä peräkkäisinä päivinä roudan sulettua tierakanteesta ja pohjamaasta. Kahden peräkkäisen mittauspäivän tarkoituksena oli verrata yhden 64 tn 7-akselisen ajoneuvon aiheuttamia vasteita mittauskohteessa kahden peräkkäin ajaneen 64 tn 7-akselisen ajoneuvon vasteisiin, kun samassa ajassa mittauskohteen yli kulkenut kokonaisuudessa oli yhtä suuri.

Mittaustuloksia analysoitaessa havaittiin raskaiden ajoneuvojen ajolinjojen vaikuttaneen merkittävästi pysyvään pystysiirtymään ja uran kasvuun. Uran vieressä ajaminen pienensi uraa. Myös henkilöautolla oli vaikutusta mitattuun päällysteen alapinnan pysyvään pystysuuntaiseen siirtymään sen ajaessa lähellä raskaan ajoneuvon perässä.

Inarin syksyn 2015 ja Kyyjärven kevään 2017 kuormituksissa havaittiin kosteuden lisääntymistä ja kohdissa, joissa kosteus lisääntyi, tapahtui myös uran kasvua. Kyseiset kohdat eivät kuitenkaan sijainneet pistemäisten mittausantureiden kohdalla. Ainoalla soratiekohteella Ranualla syksyllä 2016 kahden sateettoman viikon jälkeen tehdyissä kuormituksissa muodostui selkeää urautumista, jonka kasvunopeus hidastui ylitysten lukumäärän lisääntyessä.

Vahvarakenteisimmalla tiellä Kt 77 Karstulassa sijainneen kohteen vuosien 2016 ja 2017 mittausten perusteella rakenne kesti odotusten mukaisesti erittäin hyvin ja selkeätä uran kasvua tai kosteuden muutoksia tierakenteessa ei havaittu. Simon ohutpäällysteisellä Mt 924 kohteella hiekkaisella pohjamaalla sijainnut tierakenne kesti vuosina 2016 ja 2017 kuormitukset hyvin, mutta kahden peräkkäisen mittauspäivän odottamattoman suuri muun raskaan liikenteen määrä esti luotettavan vertailun 7-akselisen ja kahden peräkkäin ajaneen 7-akselisen rekan välillä. Vuosina 2016 ja 2017 Kyyjärven mittauskohteella (Mt 16863), joka oli heikkorakenteisin päällystetyistä mittauskohteista ja jonka päällysteen paksuus oli vain noin 30 mm, muodonmuutokset olivat selvästi suuremmat kuin Karstulan ja Simon kohteissa. Kyyjärvellä keväällä 2017 kahtena peräkkäisenä päivänä tehtyjen kuormituskokeiden perusteella heikolla pohjamaalla sijaitsevalla tiellä 14-akselinen yhdistelmä aiheutti keskimäärin kaksi kertaa suuremman uran kuin yksittäinen 7-akselinen yhdistelmä kuormittavan massa ollessa samassa ajassa yhtä suuri.

Nuutti Vuorimies, Antti Kalliainen, Jonna Rossi, Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin och Timo Saarenketo: Belastning av vägkonstruktioner i provbelastningar med HCT-kombinationer på över 76 ton under perioden 2015–17. Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2018. Trafikverkets undersökningar och utredningar 63/2018. 115 sidor och 4 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-652-2.

Sammanfattning

I denna rapport presenteras resultat från undersökningar gjorda 2015–2017 av hur belastningen av 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 tre mätpunkterna som hade beställts för undersökningen valdes fasvis till stor del utifrån de platser där det finns Perco-stationer som möjliggör mätning av kapacitetsvärden som beskriver fuktigheten. Utöver kapacitetsvärdena följde man ändringar i fuktigheten via portrycksgivare placerade i vägkonstruktionen och med MDI-analyser från markradarmätningar på vägytan (förändringar i markvattenprofilen). Formförändringar observerades via förskjutningsgivare i nedre ytan av vägkonstruktionens beläggning och via de spårdjup som en RDSV-mätbil mätte upp med laserskanner. Hur belastningsfordonen hölls i ett styrt körspår följde man upp med mätmatta och videofilmning 2016 och dessutom med avståndslaser 2017.

Den första mätningen som mobiliserades mycket snabbt i Enare (Lv 9553) hösten 2015 avvek från de övriga vad gäller belastningssätt, eftersom det lastade fordonets belastning gick från tomt fordon via delvis lastat till fullt lastat. I den andra fasen hösten 2016 belastades vägkonstruktionen med regelbundna intervall på fyra mätpunkter med cirka 76 ton tunga 9-axlade bilar. En mätpunkt var en grusväg i Ranua (Lv 18824). I den tredje fasen våren 2017 utfördes mätningar på tre punkter och under tre dagar på var och en. Av mät dagarna var den första när tjälen håller på att släppa och de två senare, på varandra följande dagarna, när tjälen var borta från vägkonstruktionen och undergrunden. Syftet med två på varandra följande mät dagar var att jämföra responsen från ett 64 tons 7-axlat fordon på mätpunkten med responsen från två efter varandra körande 64 tons 7-axlade fordon, när totalvikten som färdades över mätpunkten under samma tid var lika stor.

När mätresultaten analyserades framkom att de tunga fordonens körlinjer hade inverkat signifikant på tillväxten av den permanenta vertikalkräkningen och spåret. Spåret minskade när man körde bredvid det. Även en personbil hade effekt på den uppmätta permanenta vertikalkräkningen i beläggningens nedre yta när personbilen körde nära efter ett tungt fordon.

Vid belastningarna i Enare hösten 2015 och i Kyyjärvi våren 2017 observerades ökad fuktighet och att på de punkter där fuktigheten ökade, växte även spåret. De aktuella punkterna fanns ändå inte vid de punktformiga mätgivarna. Vid de belastningar som gjordes på den enda grusvägspunkten i Ranua hösten 2016 uppstod tydlig spårbildning efter två veckor utan regn. Spårbildningens tillväxttakt minskade när antalet överkörningar ökade.

Utifrån mätningarna 2016 och 2017 vid den punkt som fanns på den starkaste vägen, dvs. Sv 77 i Karstula, höll och motsvarade konstruktionen förväntningarna mycket bra och i vägkonstruktionen observerades ingen tydlig spårtillväxt och inte heller förändringar på grund av fukt. Vägkonstruktionen vid mätpunkten i Simo (Lv 924) med tunn beläggning på sandig undergrund tålde belastningarna bra 2016 och 2017, men en överraskande stor övrig tung trafik under två på varandra följande mättdagar hindrade en tillförlitlig jämförelse mellan en 7-axlad och två efter varandra körande 7-axlade bilar. Vid mätpunkten Kyyjärvi (Lv 16863) 2016 och 2017, som var den svagaste konstruktionen bland de belagda mätpunkterna och vars beläggningstjocklek var endast cirka 30 mm, var formförändringarna klart större än vid mätpunkterna i Karstula och Simo. Utifrån de belastningsprov som gjordes två på varandra följande dagar i Kyyjärvi våren 2017 orsakade en 14-axlad kombination i genomsnitt ett dubbelt större spår på en väg på svag undergrund än en enskild 7-axlad kombination när den belastande massan var lika stor under samma tid.

Nuutti Vuorimies, Antti Kalliainen, Jonna Rossi, Altti Kurki, Pauli Kolisoja, Petri Varin and Timo Saarenketo: Road Structure Strain on Test Loads of More than 76 Tons HCT combinations in 2015–2017. Finnish Transport Agency, Engineering and Environment Department. Helsinki 2018. Research reports of the Finnish Transport Agency 63/2018. 115 pages and 4 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-652-2.

Abstract

In this report is presented the results from studies of loading effects of heavy vehicles to the road structures carried out between 2015 and 2017. The specially examined issue was 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 studies were commissioned in three phases and the selection of the test sites were mainly based on the locations of the Percostations, which enable the measurement of the dielectric values indicating amount of moisture. In addition to the dielectric values, moisture changes were monitored by the water pore pressure transducers installed into the road structure and by the results of MDI analyses (change in moisture profile) from GPR measurements made from the road surface. Deformations were measured using displacement transducers installed in the road structure for measuring movement of the road surface and using laser scanner of the RDSV survey van measuring the rut depths. In 2016, the loading vehicles keeping on the guided track were monitored using measuring mat with video recordings and additionally using laser distance meters in 2017.

The first very quickly mobilized measurement session in Inari (Mt 9553) in the autumn of 2015 differed from the others by the loading practice because the load of the loading vehicle was changed from an empty vehicle to a partly loaded and finally to a fully loaded vehicle. In the second phase at four test sites 9-axle trucks weighing about 76 tons were used to load the road structure at regular intervals in the autumn of 2016. One of the four test sites was a gravel road site (Mt 18824) at Ranua. In the final phase, in spring 2017, the measurements were done on three test sites and in each of them during three days. In 2017, the first measurement day was when the frost was thawing and the last two consecutive measurement days were as the frost was thawed from road and subsoil. The purpose of the two consecutive measurement days was to compare the responses caused by a 64-ton 7-axle vehicle passing over the test site to the responses caused by two consecutive 64-ton 7-axle vehicles when the total mass transported over the same time was equal.

When analysing the measurement results, wheel paths of heavy vehicles were discovered to have significant effect on the development of permanent vertical displacement and rut depth. Driving beside the rut reduced the rut depth. Even a passenger car also had an impact on measured permanent vertical displacement of the road surface when it was driving close behind the heavy vehicle.

In the autumn of 2015 at Inari and in the spring of 2017 at Kyyjärvi increase of moisture content was observed and in the spots where moisture increased the rut depths were also increasing. However, those spots were not located in the position of the measuring sensors. On the only gravel road site at Ranua the measurements were carried out after two rainless weeks in the fall of 2016. The loadings caused a marked amount of rutting, which rate decreased as the number of overruns increased.

On basis of the measurements made in 2016 and 2017 the most strongly-build road structure located in Kt 77 at Karstula carried loadings very well as expected and clear increase in rut depth or moisture content changes in the road structure were not observed. On Simo's thinly paved test site of Mt 924 road locating on a sandy subsoil carried loadings well in 2016 and 2017, but the unexpectedly high number of other heavy vehicles during the two consecutive measurement days prevented reliable comparison between the loading effects of 7-axle and two 7-axle trucks driving one behind the other. In 2016 and 2017 at the Kyyjärvi measurement site (Mt 16863), which has the weakest road structure of the paved test sites and on which AC layer thickness was only about 30 mm, deformations were much greater than on the test sites of Karstula and Simo. On basis of the loading tests at Kyyjärvi on two consecutive days in spring 2017, the 14-axis combination caused on an average twice greater rut depth as the 7-axle combination, when the loading mass was equivalent in the same time and the test site was situated on a weak subsoil.

Esipuhe

Tämä raportti kokoaa yhteen Liikenneviraston vuosina 2015–2017 Roadscanners Oy:ltä ja Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksiköltä tilaamat tutkimukset HCT-yhdistelmien kuormitusvaikutuksista erilaisiin tierakenteisiin. Tutkimusten tavoitteena oli tuoda taustatietoa raskaan ajoneuvokaluston säätelyä koskevien päätösten tekemiseen.

Raportin pääkirjoittajana on toiminut Nuutti Vuorimies ja luvun 6 osalta Antti Kalliainen TTY:ltä. Lisäksi TTY:ltä Jonna Rossi osallistui vuoden 2016 mittaustulosten analysointiin ja kirjoittamiseen sekä Altti Kurki vuoden 2017 mittauksiin ja mittaustulosten käsittelyyn. Roadscanners Oy:n osalta mittaustulosten analysoinnin ja niiden kirjoittamisen on tehnyt pääosin Petri Varin. TTY:ltä tutkimusten ohjaukseen on osallistunut Pauli Kolisoja ja Roadscanners Oy:stä Timo Saarenketo. Tutkimusten raportointien etenemistä ja tulosten analysointia ovat ohjanneet Kari Lehtonen ja Sami Petjäjä Liikennevirastosta.

TTY:ltä mittauslaitteiden asennuksiin ja mittauksiin osallistuivat myös laboratoriomestari Marko Hoppo ja Ville Haakana sekä käyttöinsinööri Antti Akkanen. Roadscanners Oy:n Tampereen ja Rovaniemen toimistoista mittauksiin osallistui myös useita muita henkilöitä.

Vuoden 2015 tutkimuksessa Inarin koekohteelle vuokrattiin P & A Trans Oy:n tukkirekka. Vuonna 2016 Simon ja Ranuan koekohteita kuormitti Kuljetus Sampo Puurunen Oy:n tukkirekka ja vuonna 2017 Simon koekohteella ajoivat Koneurakointi Tapani Koukkula Oy:n rekka-autot. Kyyjärven ja Karstulan mittauskohteelle kuormitusajoneuvojen vuokraus Kuljetus Villman Oy:stä. Lämpimät kiitokset manituissa yrityksissä mittausten toteuttamisesta edesauttaneille henkilöille ja niihin osallistuneille kuljettajille.

Helsingissä joulukuussa 2018

Liikennevirasto
Tekniikka- ja ympäristöosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	12
1.1	Tutkimuksen tausta.....	12
1.2	Tutkimuksen tavoitteet.....	12
2	MITTAUSMENETELMÄT	14
2.1	Tierakenteesta tehtyt pistemäiset mittaukset	14
2.1.1	Dielektrisyys ja Percoaseman pitkäaikaiset seurantamittaukset.....	14
2.1.2	Huokosvedenpaine.....	14
2.1.3	Päällysteen tai kulutuskerroksen alapinnan pystysiirtymä.....	15
2.1.4	Kuormitusajoneuvon ajolinjan sijainti	16
2.1.5	Tiedonkeruu mittausantureista	17
2.2	Tien pinnalta tehtyt mittaukset.....	17
2.2.1	Rakennepaksuudet ja kosteus maatutkamittauksella	17
2.2.2	Urakasvu laserkeilauksella	18
2.2.3	Lämpökameramittaus.....	18
2.3	Kuormitustavat ja kuormitusajoneuvot.....	19
3	MITTAUSKOHTEET	21
3.1	Mittauskohteiden valintaperusteet	21
3.1.1	Vuoden 2015 mittaukset	21
3.1.2	Vuoden 2016 mittaukset	21
3.1.3	Vuoden 2017 mittaukset.....	22
3.2	Mittauskohteet ja niissä käytetyt mittausmenetelmät	22
3.2.1	Mt 9553 Inari.....	22
3.2.2	Mt 18824 Ranua	25
3.2.3	Mt 924 Simo	27
3.2.4	Kt 77 Karstula.....	29
3.2.5	Mt 16863 Kyyjärvi.....	31
4	MITTAUSTULOKSET	33
4.1	Mittauksetulosten esittelyssä käytettyä terminologiaa	33
4.2	Mt 9553 Inari – syksy 2015.....	34
4.2.1	Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet	34
4.2.2	Dielektrisyysmittaukset	35
4.2.3	Huokosvedenpaineen mittaukset	36
4.2.4	Urautuminen laserkeilauksella	38
4.2.5	Kosteuden muutokset maatutkamittauksella	39
4.2.6	Lämpökameramittaus.....	40
4.2.7	Yhteenvedo Inarin kokeista	41
4.3	Mt 18824 Ranua (soratie) – syksy 2016.....	42
4.3.1	Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet	42
4.3.2	Dielektrisyysmittaukset	42
4.3.3	Huokosvedenpaineen mittaukset	43
4.3.4	Kulutuskerroksen alapinnan pystysiirtymät.....	43
4.3.5	Urautuminen laserkeilauksella	45
4.3.6	Kosteuden muutokset maatutkamittauksella	47
4.3.7	Yhteenvedo Ranuan soratiella tehdyistä kokeista	47
4.4	Mt 924 Simo – syksy 2016 ja kevät 2017	48
4.4.1	Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet	48
4.4.2	Dielektrisyysmittaukset	49

4.4.3	Huokosvedenpaineen mittaukset.....	50
4.4.4	Päällysteen alapinnan pystysiirtymät	52
4.4.5	Urautuminen laserkeilauksella	61
4.4.6	Kosteuden muutokset maatutkamittauksella.....	63
4.4.7	Yhteenveto Simon kohteen kokeista	65
4.5	Kt 77 Karstula – syksy 2016 ja kevät 2017	65
4.5.1	Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet.....	65
4.5.2	Dielektrisyysmittaukset	66
4.5.3	Huokosvedenpaineen mittaukset.....	67
4.5.4	Päällysteen alapinnan pystysiirtymät	68
4.5.5	Urautuminen laserkeilauksella	77
4.5.6	Kosteuden muutokset maatutkamittauksella.....	79
4.5.7	Yhteenveto Karstulan (kt77/1/4845) mittauksista	80
4.6	Mt 16863 Kyyjärvi – syksy 2016 ja kevät 2017	80
4.6.1	Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet.....	80
4.6.2	Päällysteen alapinnan pystysiirtymät	81
4.6.3	Urautuminen laserkeilauksella	84
4.6.4	Kosteuden muutokset maatutkamittauksella.....	87
4.6.5	Yhteenveto Kyyjärven mittauksista	88
5	JOHTOPÄÄTÖKSIÄ JA POHDINTAA MITTAUSTULOKSISTA	89
5.1	Kosteus (dielektrisyys, huokosvedenpaine ja kosteus maatukalla)	89
5.2	Pysyvät siirtymät ja urat	89
5.2.1	Miten pysyvien siirtymien mittaustuloksiin vaikuttavat muut ajoneuvot?	89
5.2.2	Kohteilla mitatut siirtymät	91
5.2.3	Akselimäärien vaikutus uran kasvuun.....	96
6	KOEKOHTEIDEN MALLINTAMINEN	98
6.1	Mallinnuksen tavoite.....	98
6.2	Mallin rakenne.....	98
6.2.1	Mallin periaate	98
6.2.2	Rakenteiden mallintamisessa käytetyt materiaalmallit ja laskentaparametrit	100
6.3	Laskentatulokset	101
6.3.1	Mallin verifiointi	101
6.3.2	Päällystelaatan jäykkyyden vaikutus.....	102
6.3.3	Pohjamaan jäykkyyden vaikutus	103
6.3.4	Rakenteen kosteustilan vaikutus	104
6.3.5	Ajoneuvon ajolinjan vaikutus.....	106
6.3.6	Kyyjärven koekohteen simulaatiot.....	107
6.3.7	Laskentatulosten analyysi	109
6.4	Mallinnusten yhteenveto.....	112
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	113
	LÄHTEET	115
	LIITTEET	
Liite 1	Kuormitusajoneuvojen tiedot	
Liite 2	Asennettujen antureiden sijainnit	
Liite 3	Simon näytteiden laboratoriotulokset	
Liite 4	Koekohteella teiden poikkileikkaukset	

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Tässä raportissa esiteltävän tutkimuskokonaisuuden taustana on uusi raskaiden ajoneuvojen massoja ja mittoja säätelevä ajoneuvoasetus, joka astui voimaan 1.10.2013 alkaen. Asetuksen myötä raskaan ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu kokonaismassa kasvoi 60 tonnista 76 tonniin, kaksiakselisen telin enimmäismassa 19 tonnista 21 tonniin ja kolmiakselisen telin enimmäismassa 24 tonnista 27 tonniin. Lisäksi tiiverkollamme on tietyillä pitkämatkaisten kuljetusten reiteillä otettu erikoisluvilla käyttöön kokonaismassaltaan jopa yli 100 tonnin ajoneuvoyhdistelmiä.

Raskaiden ajoneuvojen kuormitusvaikutuksia on asetusmuutokseen liittyen selvitetty sekä paksupäällysteisen päätien että kevyemmin rakennetun ohutpäällysteisen tien olosuhteissa tehdyillä kenttämittauksilla ja näitä tukevilla mallinnustarkasteluilla (Kolisjoja et al. 2015, Kalliainen et al. 2015). Myöhemmissä tutkimuksissa on keskitytty tarkastelemaan raskaiden ajoneuvojen aiheuttamia rasituksia matalahkolla asennussyvyydellä sijaitseviin teräs- ja muovirumpuihin (Haakana et al. 2015) sekä teräsrumpujen korjausrakenteisiin (Kalliainen et al. 2016).

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 kuormittamassa joustavan pohjamaan päällä olevassa tierakenteessa on 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 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuskokonaisuuden tavoitteena on ollut toteuttaa vaiheittain ohjelmoitu 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. Tutki-

muksen ensimmäisessä vaiheessa syksyllä 2015 Inarissa Mt9553:lla tehdyissä mittauksissa selvitettiin voisiko yhden päivän kuormituksilla saada tiestä mitattavissa olevaa urakasvua. Inarin kohteen osoittauduttua suhteellisen urautumisherkäksi syksyllä 2016 mittauksia jatkettiin 9-akselisilla yhdistelmillä kaikkiaan neljällä eri tyyppisellä mittauskohteella, jotka sijaitsivat Simossa (Mt 924), Ranualla (Mt 18824), Karstulassa (Kt 77) ja Kyyjärvellä (Mt 16863). 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 yhdistelmää 14-akseliseen yhdistelmään, kun yhdistelmissä kulkee mittausalueen läpi sama massa samassa ajassa. Lisäksi vuoden 2017 mallinnustarkasteluiden tavoitteena oli muodostaa käsitystä, millä keinoilla ja kuinka hyvin rakenteiden kosteustilassa eri ajankohtina valitsevien erilaisten olosuhteiden vaikutus rakenteiden mitattuihin vasteisiin saadaan kuvattua laskennallisesti.

Käsillä olevan raportin luvussa 2 on esitelty mittausmenetelmät ja kuormituskokeiden toteutustavat. Luvussa 3 on kuvattu vastaavasti valitut mittauskohteet ja niiden valintaperusteet. Luvussa 4 on esitetty kohteittain mittausten tulokset ja luvussa 5 on vedetty yhteen johtopäätöksiä ja pohdintoja keskeisimmistä mittaushavainnoista. Luvussa 6 on käsitelty kohteiden FEM-mallinnusta ja niiden tuloksia. Viimeisessä luvussa 7 on kiteytetty tutkimuksen tuottamat päätelmät ja tehty ehdotukset mahdollisiksi jatkotoimenpiteiksi.

2 Mittausmenetelmät

2.1 Tierakenteesta tehdyt pistemäiset mittaukset

2.1.1 Dielektrisyys ja Percoaseman pitkäaikaiset seurantamittaukset

Käytännössä dielektrisyys kuvaa vapaan veden määrää mittausanturin ympärillä eli kuinka suuri osa materiaalin huokosista on kyllästynyt vapaalla vedellä, jolloin materiaalien tiivysaste vaikuttaa dielektrisyteen (Saarenketo 2001).

Mittauksissa käytettiin joko erityisesti näitä mittauksia varten asennettuja antureita tai Percoaseman mittausantureita. Uusilla Percoasemilla tiehen asennettiin viisi anturia Percoasemaa varten ja kolme syksyn 2016 nopeita mittauksia varten. Anturit asennettiin tai oli jo asennettu ajokaistan ulomman ajouran linjalle. Percoasemalla mitataan eri syvyyksille asennetuista antureista määrävällein dielektrisyttä, sähköjohtavuutta tai lämpötilaa. Adek Ltd:n rakentamalla mittauslaitteella ja yhdellä modifoidulla Percometrillä voitiin nopeissa mittauksissa samaan aikaan mitata enintään neljää anturia ja kustakin anturista vain yhtä suuretta (kuva 1). Nopeissa mittauksissa mitattiin dielektrisyttä.



Kuva 1. Adek Ltd:n rakentama mittauslaite ja modifioitu Percometri nopeita mittauksia varten.

2.1.2 Huokosvedenpaine

Huokosvedenpaineantureita asennettiin veden kyllästäämään pohjamaahan. Anturit olivat Tokyo Sokki Kenkyujo Co:n valmistamia venymäliuskatomisia paineantureita tyypiltään KPD-200KPA. Niiden tarkoitus oli havaita raskaiden ajoneuvojen mahdollisesti aiheuttama huokosveden ylipaine tai muutokset huokosvedenpaineessa. Inarin kohteessa huokosvedenpaineanturi asennettiin myös pohjavedenpinnan yläpuolelle tierakenteeseen mahdollisen pohjaveden pumppautumisen havainnoimiseksi.

Huokosvedenpaineanturit pyrittiin asentamaan ajokaistan ulomman ajouran linjalle. Aluksi rakenteeseen porattiin iskuporakoneella alkureikä, josta asennusputki ja sen sisällä oleva terästanko juntattiin vinosti tierakenteen läpi pohjamaahan (kuva 2). Terästangon poistamisen jälkeen anturi työnnettiin asennusputken läpi asemaansa ja asennusputki vedettiin pois rakenteesta. Antureita asennettiin myös yhtä käyttö-

kertaa varten liittämällä anturi toisenlaisen asennusputken päähän ja työntämällä anturi asennusputken kanssa esiporattuun reikään, jolloin anturin poistaminen mittausten jälkeen oli mahdollista. Joissakin kohteissa anturin nollakohta on saattanut muuttua asennuksen yhteydessä.



Kuva 2. Huokosvedenpaineanturin asennusta tierakenteen alla olevaan pohjamaahan Simossa.

2.1.3 Päällysteen tai kulutuskerroksen alapinnan pystysiiirtymä

Raskaiden ajoneuvojen aiheuttamien tien pinnan pystysiiirtymien mittaamiseksi mittauskohteille asennettiin siirtymäantureita päällysteen tai kulutuskerroksen alapintaan. Anturit asennettiin ulomman ajouran oletetulle keskilinjalle. Siirtymäanturit kiinnitettiin kairatankoihin, jotka ankkuroitiin alapäästään kantavaan pohjamaahan. Antureiden päälle asennettiin teräslevy, joka kohteesta riippuen liimattiin joko suoraan päällysteeseen kiinni bitumilla tai levyn päälle tiivistettiin ohut kerros täyttömateriaalia (KaM 16), jonka päälle päällyste asennettiin. Soratiekohteelle asennettiin muita kohteita selkeästi suurempi kuormituslevy luotettavampien mittaustulosten saamiseksi. Kuvassa 3 on esitetty Kyyjärvelle asennettu siirtymäanturi.

Siirtymäantureiden tavoitteena oli mitata kuormitusajoneuvon ylityksen aiheuttama maksimisiirtymä ja pysyvä siirtymä. Antureiden todellinen mittausalue oli noin 30–40 mm tierakenteeseen asentamisen jälkeen.



Kuva 3. Siirtymäanturin asentamista Kyyjärvellä.

2.1.4 Kuormitusajoneuvon ajolinjan sijainti

Vuosien 2016 ja 2017 mittauksissa tavoitteena oli varmistaa kuormitusajoneuvon ajolinjan sijainti. Kohteilla omia kuormitusajoneuvoja ohjattiin ajamaan antureiden päältä samaa ajolinjaa tienpintaan tehtyjen merkkiviivojen avulla. Vuonna 2016 kuormitusajoneuvojen ajolinjat varmistettiin kuvaamalla videokameralla jokainen ylitys siirtymäanturin kohdalle asetetulla mittamatolla (kuva 4).

Vuonna 2017 asennettiin tien reunaan siirtymäanturin linjalle etäisyyslaser mittaamaan ajoneuvon etäisyyttä anturin kohdalta (kuva 4). Laserin suurin mittauasetäisyys oli asetettu 2,0 metriin ja suunnattu mittaamaan ajoneuvon etäisyys anturin kohdalta noin 0,5 m tien pinnan yläpuolelta. Lisäksi videokameralla varmistettiin suurin osa mittauksista samalla tavalla kuin vuonna 2016.



Kuva 4. Mitattujen ajoneuvojen ajolinjojen varmistaminen mittausmatolla ja etäisyyslaserilla Karstulassa.

2.1.5 Tiedonkeruu mittausantureista

Ajoneuvoylitysten aikana mittausantureiden antamia signaaleita rekisteröitiin TTY:n käytössä olevalla korkean näytteenottotaajuuden mahdollistavalla rekisteröintilaitteistolla, johon anturit liitettiin erillisten National Instrumentsin kytkentäyksiköiden välityksellä. Kytkentäyksikköön sondit liitettiin adaptereilla joko mittausantureiden vahvistimilta tai suoraan. Nopeissa mittauksissa käytettiin tyypillisesti 2 kHz näytteenottotaajuutta.

2.2 Tien pinnalta tehdyt mittaukset

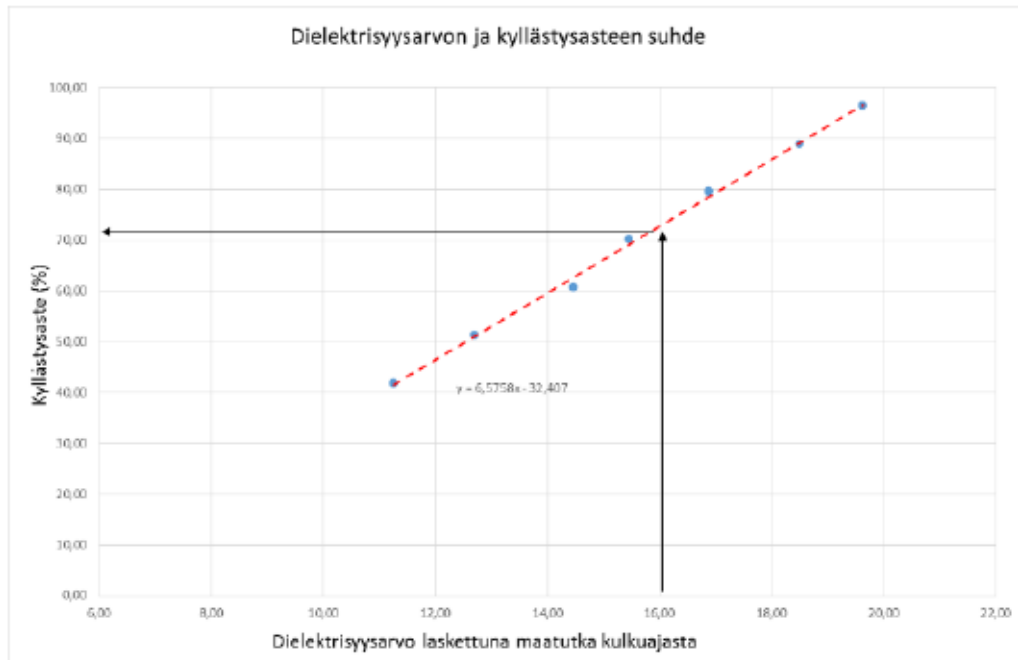
2.2.1 Rakennepaksuudet ja kosteus maatukamittauksella

Maatutkaluotaukset tehtiin Roadscanners Oy:n Road Doctor Survey Van (RDSV) -mittausajoneuvolla (kuva 5) GSSL:n SIR30 -tutkakalustolla käyttäen 2,0 GHz ilmavasteantennia ja 400 MHz maavasteantennia. Mittaukset tehtiin ajokaistan ulkourasta ennen kuormituksia ja jokaisen kuormitusvaiheen jälkeen.



Kuva 5. Roadscanners Oy:n Road Doctor Survey Van (RDSV) -mittausajoneuvo.

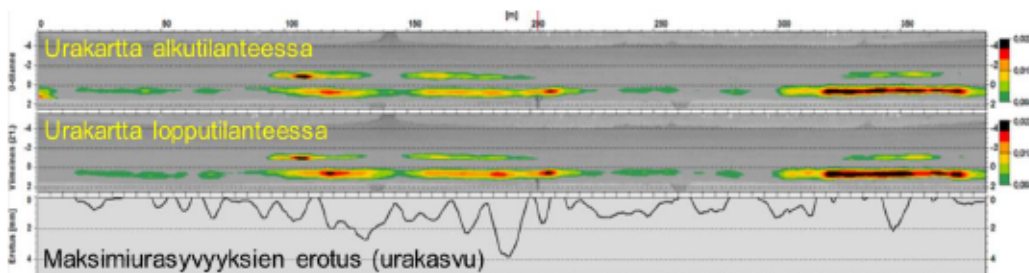
Yhdestä maatukamittauksesta tulkittiin tien rakennepaksuudet. Kosteustilan muutoksia seurattiin Roadscanners Oy:n rakenteiden kuivatuksen seurantaan kehittämällä menetelmällä, jossa 400 MHz datasta lasketaan taajuusspektri ja sen muutokset. Idea perustuu siihen, että materiaalin kyllästysasteen ylittäessä 70–80 % materiaali alkaa suodattaa tiettyjä sähkömagneettisia taajuuksia ja tämä voidaan laskea/esittää maatukaprofiilissa. Tämä 70–80 % kyllästysaste vastaa materiaalin dielektrisyyden arvoa 16 (kuva 6). (Arnold et al 2017) Kyllästysasteen noustessa yli 70 % materiaalin herkkyys nopeasti kehittyville pysyville muodonmuutoksille kasvaa selkeästi. Ehrolan mukaan tien sitomattomien rakennekerrosten kriittinen kyllästysaste olisi 80–85 %, jonka yläpuolella rakenteiden stabiilisuus heikkenee oleellisesti ja ne vaurioituvat nopeasti toistuvan kuormituksen alaisena. (Ehrola 1996 s. 127) TTY:llä tehdyt kolmiaksiaalikoeket ovat osoittaneet routasyklin jälkeen mitatun dielektrisyyden ja nopeasti kehittyvien pysyvien muodonmuutosten välisen yhteyden (Kolisoja et al 2002).



Kuva 6. Dielektrisyysarvon ja kyllästysasteen suhde kantavan kerroksen murskeessa. (Arnold et al 2017)

2.2.2 Urakasvu laserkeilauksella

Kohteiden urasyvyysmittaukset tehtiin niin ikään RDSV-kalustolla. Ajourata keilattiin ennen kuormituskokeita ja aina kunkin kuormitusvaiheen jälkeen. Mittausten jälkeen laserkeilaustiedoista laskettiin urakartat ja myös maksimiurasyvyys ja sen kehittyminen (urakasvu). Laseraineistosta voitiin määrittää myös tien poikkileikkaustiedot. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki urakartoista.



Kuva 7. Esimerkki urakartoista alku- ja lopputilanteessa sekä urakasvusta

2.2.3 Lämpökameramittaus

Lämpökameramittaukset tehtiin ainoastaan Inarin kohteella. Ideana oli testata näkyisikö mahdollinen veden pumppautuminen mittaustuloksissa. Mittaus tehtiin tien pinnasta Roadscanners Oy:n RDTD-järjestelmällä kunkin kuormitusvaiheen jälkeen. Mittaustulokset analysoitiin Road Doctor Thermal Diagnostics -ohjelmistomodulilla.

2.3 Kuormitustavat ja kuormitusajoneuvot

Taulukossa 1 on esitetty tutkimukseen kuormitusajoneuvoksi tilattujen peräkkäin kulkevien rekkojen lukumäärät ja niiden akselien lukumäärät sekä arvioidut tai mitatut yhteispainot ja suurimmat akselipainot kullakin mittauskerralla. Liitteessä 1 on esitetty kuormitusajoneuvojen yhteispainot mittauskerroittain, ylitysten lukumäärät ja suurimmat akselipainot- ja välit sekä rengastiedot. Kohteilla ajonopeus oli ylityksissä noin 50 km/h.

Syksyllä 2015 tehdyissä Inarin kohteen kuormituskokeissa käytettiin 10-akselista noin 76 tonnin yhdistelmäajoneuvoa, jonka kuormitusastetta nostettiin kuormitusten edetessä tyhjältä puoliksi täyteen ja edelleen täyteen kuormaan. Samalla tarkkailtiin tierakenteeseen mahdollisesti syntyviä vaurioita, jotta koe olisi voitu keskeyttää, jos nopeaa vaurioitumista olisi alkanut esiintyä. Kuormitusportaita oli yhteensä kuusi, kun huomioidaan kullakin lastausasteella olleen kuormitukset pelkällä vetoautolla sekä vetoauton ja perävaunun yhdistelmänä. Kullakin portaalla tehtiin kaksi ylitystä paitsi lopuksi täydellä rekalla neljä ylitystä. Mittauspiste ylitettiin kumpaankin suuntaan ajettaessa.

Kaikissa vuoden 2016 kuormituskokeissa käytettiin 9-akselisia noin 76 tonnin kuormitusajoneuvoja, joista yksi on Ranuan kohteella (kuva 8). Karstulassa ja Simossa mittauspiste ylitettiin aina samaan suuntaan ja rekkoja oli kaksi peräkkäin. Kyyjärvelä ja Ranualla mittauspiste ylitettiin kumpaankin suuntaan ajettaessa ja rekkoja oli yksi.

Taulukko 1. Tutkimukseen kuormitusajoneuvoksi tilattujen rekkojen arvioidut tai mitatut tiedot: peräkkäin kulkevien rekkojen lukumäärä, niiden yhteispaino ja akselien lukumäärä ylityksessä sekä niistä suurin akselipaino ja ylitysten lukumäärä.

	rekkoja	akseleita	suurin akselipaino, (tn)	yhteispaino (tn)	ylityksiä
Inari 16.10.2015	1	10	9,5	79	14 ¹⁾
Ranua 12.10.2016	1	9	11,4	78	30
Simo 13.10.2016	2	18	11,3	152	8
Simo 27.4.2017	1	7	10	64,5	8
Simo 13.6.2017	1	7	10	64,5	10
Simo 14.6.2017	2	14	10	129	5
Karstula 20.10.2016	2	18	9,5	151	10
Karstula 25.4.2017	1	7	10	62,5	10
Karstula 16.5.2017	1	7	10,8	64,5	10
Karstula 17.5.2017	2	14	10,8	128,5	5
Kyyjärvi 21.10.2016	1	9	9	71	21
Kyyjärvi 25.&26.4.2017	1	7	10	62,5	2 & 4
Kyyjärvi 30.5.2017	1	7	9,5	63	10
Kyyjärvi 31.5.2017	2	15	9,5	127,5	5+1 ²⁾

¹⁾ vain 4 ylityksistä täydellä rekalla

²⁾ ajoi pois mittauspisteen kautta varsinaisen kuormitussarjan jälkeen

Vuoden 2017 kuormituskokeissa käytettiin 7-akselisia noin 64 tonnin kuormitusajoneuvoja. Poikkeuksena oli Kyyjärvi 31.5.2017, jolloin toinen paikalle tullut ajoneuvo oli 8-akselinen ja tässä tapauksessa ylimääräinen akseli oli vetoautossa toisena akselina ja sillä oli selkeästi kevyin akselimassa. Mittauspiste ylitettiin samoihin suuntiin kuin syksyllä 2016. Roudan sulaessa oli tarkoitus ajaa yhdellä rekalla 30 minuutin välein mittauspisteen yli, mutta Kyyjärvellä ei kuormitusta mittausten kanssa ei voitu toteuttaa suunnitellusti runsaan lumisateen vuoksi. Roudan sulettua 1. mittauspäivänä ajettiin kohteella yhdellä rekalla 30 min välein ja seuraavana päivänä kahdella rekalla peräkkäin 60 min välein.



Kuva 8. Vuoden 2016 kuormituskokeissa Ranualla käytetty kuormitusajoneuvo

3 Mittauskohteet

3.1 Mittauskohteiden valintaperusteet

3.1.1 Vuoden 2015 mittaukset

Yhden keskeisen lähtökohdan syksyllä 2015 tehtyjen mittausten toteutustavan ja -paikan valinnalle muodosti mittausten nopea mobilisointiaikataulu. Paljolti tästä johtuen vuoden 2015 mittauskohteessa käytettäviksi mittausmenetelmiksi valikoituivat Percostation®-mittausaseman (jatkossa: Percoasema) avulla tapahtuvat rakenteen ja pohjamaan dielektrisyysarvon ja sähkönjohtavuuden mittaukset sekä huokosvedenpaineen mittaaminen. Näistä ensinnä mainitusta tutkimuksen toteuttaneella tutkijaryhmällä oli aikaisempaa kokemusta kumuloituvan kuormitusvaikutuksen mittaamisessa (Vuorimies et al. 2002, Saarenketo et al. 2002). Jälkimmäinen taas on tarkasteltavassa tilanteessa keskeisen mielenkiinnon kohteena olevan fysikaalisen suureen suoraan havainnointiin tähtäävä mittaustapa, johon soveltuvia mittausantureita oli myös heti saatavilla.

Ensimmäistä tutkimusvaihetta ohjelmoitaessa Suomen tieverkolle asennettuna olleista toimintakuntoisista Percoasemista vain kaksi sijaitsi päällystetyillä teillä, joihin tutkimuksen päämielenkiinto ensisijaisesti kohdentui. Percoasemien asennuskohteista toinen sijaitsi Tervolassa (Mt 9271) ja toinen Inarissa (Mt 9553, Angelintie). Koska Tervolan asennuskohteella osa rakenteessa olevista mittausantureista oli kuitenkin vioittuneita ja kohde oli sijainniltaan muutenkin mittausten toteutuksen kannalta epätarkoituksenmukainen, oli mittauskohteeksi luonteva valita Angelintiellä Inarissa sijaitseva Percoasema. Ratkaisua puolsi myös se, että kyseisellä kohteella tierakenne on varsin ohut ja rakenteen alla oleva pohjamaa oli mittausajankohtana hyvin märkä, käytännössä veden kyllästämä.

3.1.2 Vuoden 2016 mittaukset

Syksyllä 2016 toteutetun toisen tutkimusvaiheen yhteydessä mittauskohteiden valinta päästiin tekemään huomattavasti väljemmällä aikataululla. Koska Mt 9553:n mittauskohteella Inarissa tierakenteen paksuus oli vain puolisen metriä, osalla seuraavan tutkimusvaiheen mittauskohteista rakennekerrosten kokonaispaksuuden haluttiin olevan jonkin verran tätä suurempi. Toisena varoitavana muuttujana ohjelmitaviin mittauksiin haluttiin sisällyttää pehmeän pohjamaan laatu, eli osan mittauskohteista haluttiin sijaitsevan turvepehmeiköllä ja osan silttisellä tai savisella pohjamaalla.

Edellä mainittujen reunaehtojen puitteissa yhdeksi vuoden 2016 mittauskohteeksi valikoitui Simojoen laaksoa myötäilevä Mt 924, jolta oli käytettävissä mittauskohteen tarkan sijaintipaikan valinnassa hyödynnettävissä olevaa tierakenteen parantamissuunnitteluun liittyvää mittausaineistoa. Valitulla mittausten totutuspaikalla tierakenteen kokonaispaksuus on noin 0,8–0,9 m ja tie on rakennettu hienorakeisten kivennäismaakerrosten varaan.

Yksi keskeinen näkökohta toisen Lapin ELY-keskuksen alueelle sijoittuneen mittauskohteen valinnalle oli se, että yhden kohteista haluttiin sijoittuvan soratieverkolle. Tähän sopiva mittauskohde löytyi Ranualta Mt 19924:ltä, jossa oli jo valmiiksi asennettuna Percoasema ja joka sijaitsi myös koekuormitusjärjestelyjen käytännön toteutuksen kannalta kohtuullisella etäisyydellä Mt 924:n mittauskohteelta. Tierakenteen kokonaispaksuus Ranuan mittauskohteella on noin 0,5 m pohjamaan ollessa silttimoorenia, johon on Percoaseman asennustöiden yhteydessä tehtyjen havaintojen perusteella sekoittuneena myös jonkin verran turvetta.

Toiseksi mittauskohteiden sijaintialueeksi valikoitui Karstulan tienhoitoalue Keski-Suomessa mm. siksi, että siellä sijaitsevalta tiestöltä oli käytettävissä kohtuullisen runsaasti PEHKO-projektiin liittyviä mittausaineistoja. Lisäksi Keski-Suomen alueella on lähitulevaisuudessa odotettavissa myös merkittävää puutavarakuljetusten uudelleenreitittymistä Äänekoskelle valmistuvan uuden sellutehtaan valmistumisen myötä. Yhtenä näkökohtana mittauskohteiden valinnassa oli lisäksi se, että osan kohteista haluttiin sijoittuvan Lappia eteläisempään Suomeen.

Keski-Suomen tiestöltä järeämmin rakennettua tietä edustavaksi mittauskohteeksi valikoitui Töyrinsuon kohta Kt 77:ltä Karstulassa. Valitulla kohdalla turpeen varaan perustetun tierakenteen kokonaispaksuus on noin 1,4 m.

Koska myös Keski-Suomen mittauskohteista toisen haluttiin edustavan rakennekerospaksuudeltaan ohuempaa tiestöä, valinta kohdistui alempiluokkaiseen päällystettyyn tiehen. Näillä perusteilla mittauksen kannalta sopiva kohde tunnistettiin Kyyjärveltä Mt 16863:lta, joka sijaitsi jälleen myös koekuormitusten käytännön toteutuksen kannalta kohtuullisella etäisyydellä Kt 77:n mittauskohteesta. Kyyjärven mittauskohteella tierakenteen kokonaispaksuus on noin 0,6 m ja tie sijaitsee turvepohjamaan päällä. Kyyjärvi oli ainoa mittauskohde, jossa ei ollut Percoasemaa.

3.1.3 Vuoden 2017 mittaukset

Päätös toteuttaa mittaukset keväällä 2017 syntyi talvella 2016–2017. Kevään mittaukset haluttiin ajoittaa ajankohtaan, jolloin tierakenne on osittain sulanut roudasta ja jolloin tierakenne ja pohjamaa ovat juuri vapautuneet roudasta. Täten mittauskohteet valikoituivat luontevasti vuoden 2016 kohteista, joihin mittausanturit oli asennettu. Koska tutkimusta suunnattiin päällystettyihin teihin ja roudan sulaessa Ranuan soratiekohteen kuormittaminen olisi voinut aiheuttaa herkästi sen vaurioitumista, jäljelle jäivät Simon, Karstulan ja Kyyjärven kohteet, joiden valintaperusteet on kuvattu kappaleessa 3.1.2.

3.2 Mittauskohteet ja niissä käytetyt mittausmenetelmät

3.2.1 Mt 9553 Inari

Percoaseman sijaintipaikan perusteella valikoitunut mittauskohde sijaitsee Ivalossa osoitteessa Angelintie 423 (Tie 9553, tieosa 1, paalu 4100). Kohteen sijainti on esitetty kuvassa 9. Kohteella keskimääräinen vuorokausiliikenne on ollut noin 200 ajoneuvoa vuorokaudessa. Mittauskohdetta ympäröi pääosin tasainen varsin kostea maasto, kuten kuvasta 10 hyvin ilmenee.

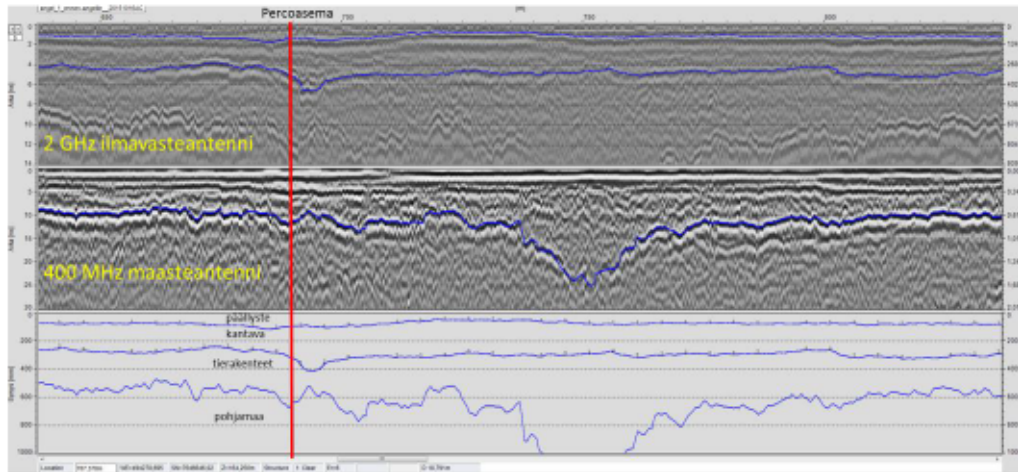


Kuva 9 Inarin kohteen sijainti (Liikenneviraston Tiemappi karttapalvelu)

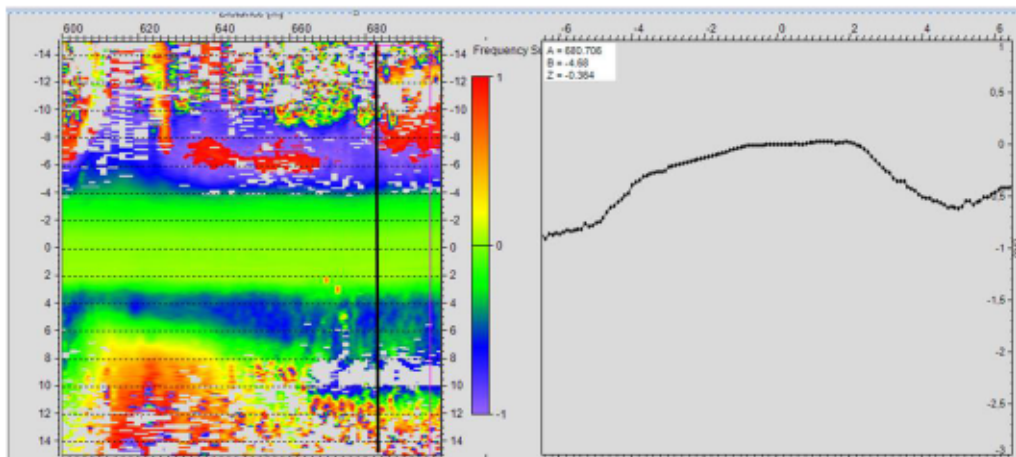


Kuva 10 Näkymä Angelintien Percoaseman sijaintipaikalle Inarin suuntaan 16.10.2015. Percoasema on kuvassa tien vasemmalla puolella rekan etupuolessa.

Angelintien Percoaseman kohdalla tien päällyste oli melko uusi ja hyväkuntoinen. Tie oli uudelleen päällystetty vuonna 2011. Päällysteen paksuus mittauskohteen kohdalla oli noin 70–90 mm, kantavan kerroksen paksuus noin 0,20–0,25 m ja tien päällysrakennerakenteiden kokonaispaksuus noin 0,6 m (Kuva 11). Tien leveys oli vastaavasti 5,8–6,0 m ja tien tasausviiva oli suunnilleen päällysrakennerakenteiden paksuuden verran ympäröivän maaston yläpuolella (Kuva 12). Alueen kuivatusolosuhteista saa hyvän mielikuvan kuvasta 10, josta näkyy, että muutaman metrin etäisyydellä tien sivuilla oleva vasemmanpuoleinen ojassa on runsaasti vettä.



Kuva 11 Maatutkamittausdata ja tulkinnat Angelin Percoaseman kohdalta. Kuvassa ylimmässä kentässä on 2,0 GHz ilmapöytäantennin ja keskellä 400 MHz maapöytäantennin datat ja alimpana näistä tehdyt paksuus-tulkinnat.



Kuva 12 Laserkeilaindatan pohjalta laadittu tien poikkileikkausprofiili Angelin-tien Percoaseman sijaintipaikalla paalulla 680 m.

Inarissa mitattiin pistemäisesti dielektrisyyttä 0,35 m, 0,55 m ja 0,85 m syvyyksiltä uran keskeltä asennettuna olleen Percoaseman antureista ja huokosvedenpainetta kuormitusta edeltävänä päivänä asennetuista antureista. Tiehen ulomman ajouran keskelle asennettiin huokosvedenpainanturi 0,65 m syvyyteen, mutta hieman syvemmälle asennettu anturi vaurioitui asennuksessa. Kuormituskokeiden ajaksi asennusputkiin liitettynä asennetuista huokospaineantureista toinen jäi tavoitetta pinnemmälle 0,7 m syvyyteen ja uran keskeltä 1,3 m tien reunaan päin. Viimeinen huokospaineanturi asennettiin tien penkereeseen pystysuunnassa 1,25 m syvyyteen uran keskeltä mitattuna 2,4 m tien reunaan päin. Antureiden sijainnit on esitetty liitteessä 2 olevassa taulukossa.

Inarin kohteella mitattiin tienpinnalta laserkeilaimella urasyvyyttä, maatutkalla kosteuden muutoksia ja lämpökameralla lämpötilan muutoksia.

3.2.2 Mt 18824 Ranua

Mittauskohde sijaitsee Ranualla tieosoitteessa Telkkäläntie 77 (Tie 18824, tieosa 2, paalu 7525). Kohteen sijainti on esitetty Kuva 13. Kohteella keskimääräinen vuorokausiliikenne on ollut noin 50 ajoneuvoa vuorokaudessa. Kuvasta 14 nähdään tien olevan suora ja maaston tasainen. Kohteen Percoasema on ollut kauan toiminnassa.

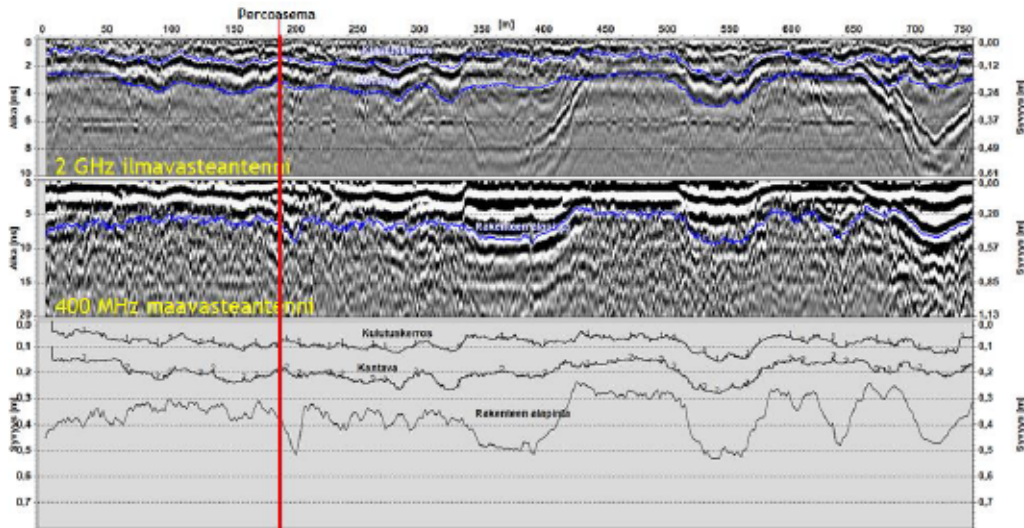


Kuva 13 Ranuan (18824/2/7525) ja Simon (924/5/5900) kohteiden sijainnit. (Liikenneviraston Tiemappi karttapalvelu)

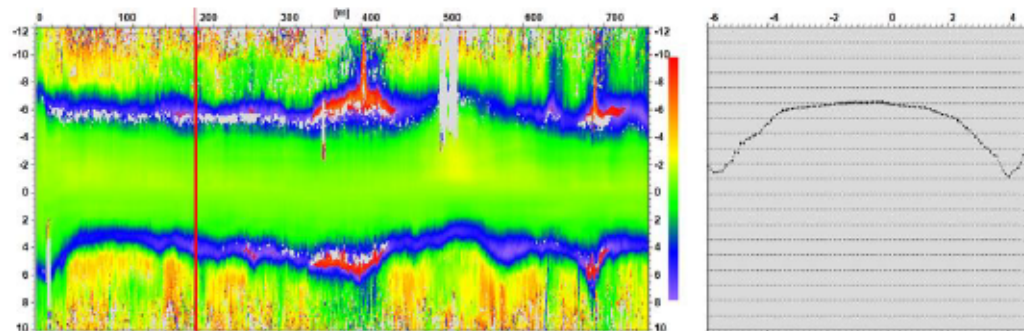


Kuva 14 Näkymä Ranuan Percoaseman kohdalta Kokkokylään päin 10.10.2016.

Tierakenne oli hieman alle 0,5 m paksuinen (Kuva 15). Soratien kulutuskerros oli noin 0,1 m paksuinen, tien uusi kantava kerros oli noin 0,1 m paksuinen ja vanha kantava/jakava kerros oli noin 0,25 m. Rakenteen alapuolella oli noin 0,25 m paksuinen kerros käsiteltyä pohjamaata/pengertä. Pohjamaa kohteella oli turpeen sekaista siltti-moreenia, joka oli käytännössä vedellä kyllästynyttä. Pohjaveden pinta vaihtelee normaalisti 0,5–0,8 m syvyydellä. Tien leveys oli noin 5,4 m ja tien tasausviiva sijaitsi noin 0,3–0,4 m ympäröivän maaston yläpuolella (Kuva 16). Molempien sivuojen pohjalla oli hieman vettä syksyn 2016 kuormituksen aikana.



Kuva 15 Maatutkamittausdata ja tulkinnot Ranuan Percoaseman kohdalta. Kuvassa ylimmässä kentässä on 2,0 GHz ilmavasteantennin ja keskellä 400 MHz maavasteantennin datat ja alimpana näistä tehdyt paksuustulkinnot.



Kuva 16 Laserkeilaindatan pohjalta laadittu tien poikkileikkausprofiili Ranuan Percoaseman sijaintipaikalla paalulla 7525 m.

Ranualla uudet mittausanturit asennettiin 10.10.2016. Percoaseman anturit, joista dielektrisydet mitattiin, oli asennettu jo aiemmin. Kuormitusten aikana dielektrisyttä mitattiin pistemäisesti 0,15 m, 0,5 m, 0,8 m ja 1,1 m syvyyksiltä uran keskeltä. Yksi huokospaineanturi oli asennettu 0,46 m syvyydelle uran keskeltä 0,3 m tien reunaan kohden. Kulutuskerroksen alapinnan siirtymää mitattiin yhdellä siirtymäanturilla uran keskeltä. Antureiden sijainnit on esitetty liitteessä 2 olevassa taulukossa.

Ranualla mitattiin tienpinnalta laserkeilaimella urasyvyyttä ja maatutkalla kosteuden muutoksia.

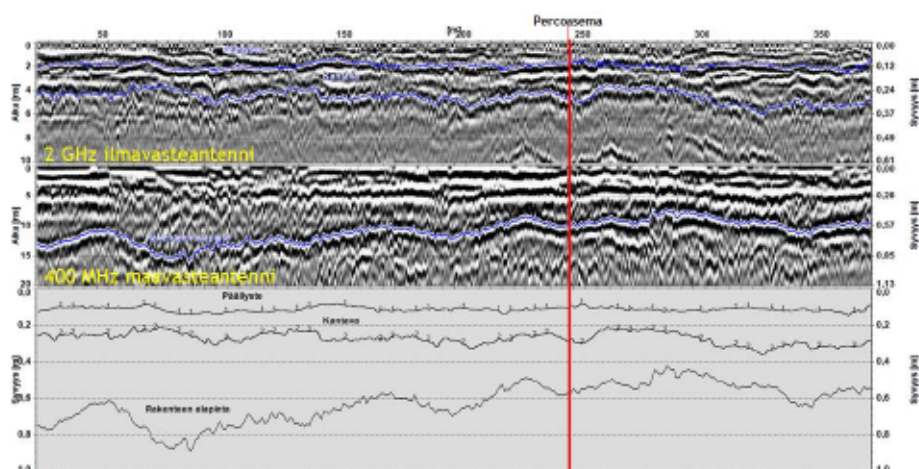
3.2.3 Mt 924 Simo

Simon mittauskohde sijaitsee osoitteessa Ranuantie 300 (Tie 924, tieosa 5, paalu 5900) Simojoen laaksossa (kuva 13). Kohteella keskimääräinen vuorokausiliikenne on ollut noin 500 ajoneuvoa vuorokaudessa. Kohteen pohjoispuolella on tiheää sekametsää ja eteläpuolella peltoaukeaa (kuva 17).

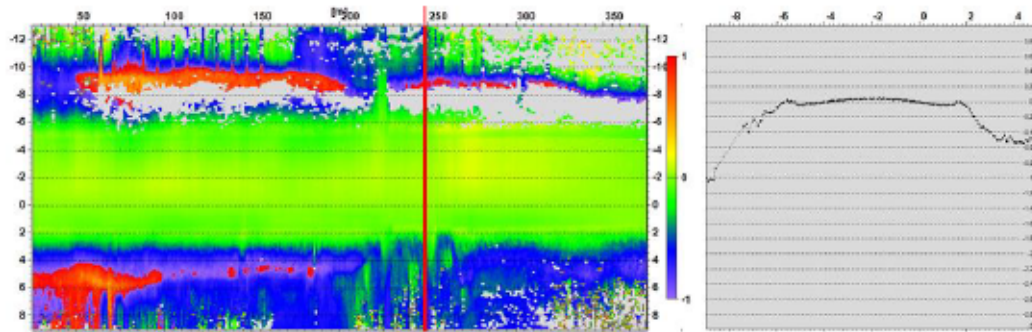


Kuva 17 Näkymä Simon kohteelta Simoon päin 13.10.2016.

Kohteen päällysrakenne oli noin 0,6 m paksuinen. Päällysteen (PAB) paksuus oli noin 110 mm, kantavan kerroksen paksuus noin 200 mm ja suodatinkerroksen noin 300 mm. (Kuva 18) Pohjamaan oletettiin kohteella olevan silttiä tai silttistä hiekkaa, mutta kohteelta tehtyjen asennusten ja otettujen näytteiden perusteella se oli tasaraakeista hiekkaa. Kohteella tehtyjen TSD-mittausten perustella tie on altis tyypin 2 urautumiselle TSD-mittausten BCI-arvojen vaihdellessa 50–80 välillä. Kohteen antureiden asennustöiden yhteydessä tehtyjen havaintojen perustella pohjaveden pinnan arvioitiin sijaitsevan kohteella noin 1,7 m syvyydessä. Tien leveys on noin 5,8–6,0 m ja tien tasausviiva sijaitsee noin 0,5 m pellon pinnan yläpuolella (Kuva 19). Kohteella sivuojat toimivat asianmukaisesti, mutta laskuoja oli tukossa syksyllä 2016. Tämä on luultavasti aiheuttanut ongelmia kohteen kuivatuksessa.



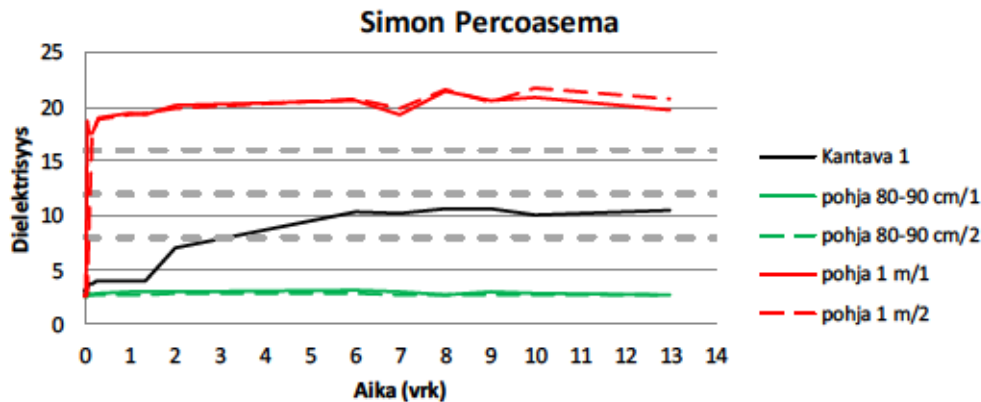
Kuva 18 Maatutkamittausdata ja tulkinnat Simon Percoaseman kohdalta. Kuvasa ylimmässä kentässä on 2,0 GHz ilmapöytäantennin ja keskellä 400 MHz maaväestantennin datat ja alimpana näistä tehtyt paksuustulkinnat.



Kuva 19 Laserkeilaindatan pohjalta laadittu tien poikkileikkausprofiili Simon Percoaseman sijaintipaikalla paalulla 5900 m.

Laboratoriomääritykset

Mittauskohteelta otettiin näytteitä tierakenteen kantavasta kerroksesta sekä pohjamaasta syvyyksiltä 0,8–0,9 m ja 1 m antureiden asennuksen yhteydessä vuonna 2016. Näytteistä määritettiin rakeisuudet pesuseulonnalla sekä tehtiin Tube Suction -kokeet (TS-koe). Materiaalien rakeisuuskäyrät ja TS-koetulokset on esitetty liitteessä 3. Rakeisuuskäyrien perusteella pohjamaan tasarakeiset hiekat olivat routimattomia. Kuvassa 20 on esitetty TS-kokeen dielektrisyyskuvaajat, joiden perusteella 1 m syvyydeltä otettu tasarakeinen hienohiekka olisi routivaa ja 0,8–0,9 syvyydeltä otettu tasarakeinen keskihiekka olisi routimatonta. TS-kokeen perusteella pohjamaa 1 m syvyydessä imee nopeasti paljon vettä ja dielektrisyysarvon noustessa selkeästi kriittisen raja-arvon 16 yläpuolelle sen kyllästysaste olisi yli 80 %. TS-kokeen perusteella kantavan kerroksen näyte olisi kyseenalainen kantavan kerroksen murske.



Kuva 20 Simon Percoaseman asennuksen yhteydessä otetuista näytteistä tehtyjen TS-kokeiden dielektrisyys-aikakuvaaja.

Simossa mittausanturit asennettiin 11.10.2016. Mittauspäivänä dielektrisyttä mitattiin pistemäisesti 0,15 m, 0,25 m, 0,35 m ja 0,65 m syvyyksiltä uran keskeltä. Pitkäaikaisen seurannan Percoaseman sondit oli asennettu viidelle syvyydelle. Huokosvedenpaineanturit olivat uran keskeltä hieman tien reunaa kohden 1,5 m ja 2,0 m syvyyksillä. Päällysteen alapinnan siirtymää mitattiin kahdella anturilla uran keskeltä. Antureiden sijainnit on esitetty liitteen 2 taulukossa.

Simon kohteella mitattiin tienpinnalta laserkeilaimella urasyvyyttä ja maatutkalla kosteuden muutoksia.

3.2.4 Kt 77 Karstula

Karstulan mittauskohde sijaitsee osoitteessa Sininentie 470 (Tie 77, tieosa 2, paalu 775) Töyrisuon alueella. Kohteen sijainti kartalla on esitetty kuvassa 21. Kohteella keskimääräinen vuorokausiliikenne on ollut 550–600 ajoneuvoa vuorokaudessa. Kuvassa 22 voidaan havainnollisesti nähdä maaston viettävän lievästi tien myötäisesti mittauskohteella. Tietä oli parannettu vuonna 2015.



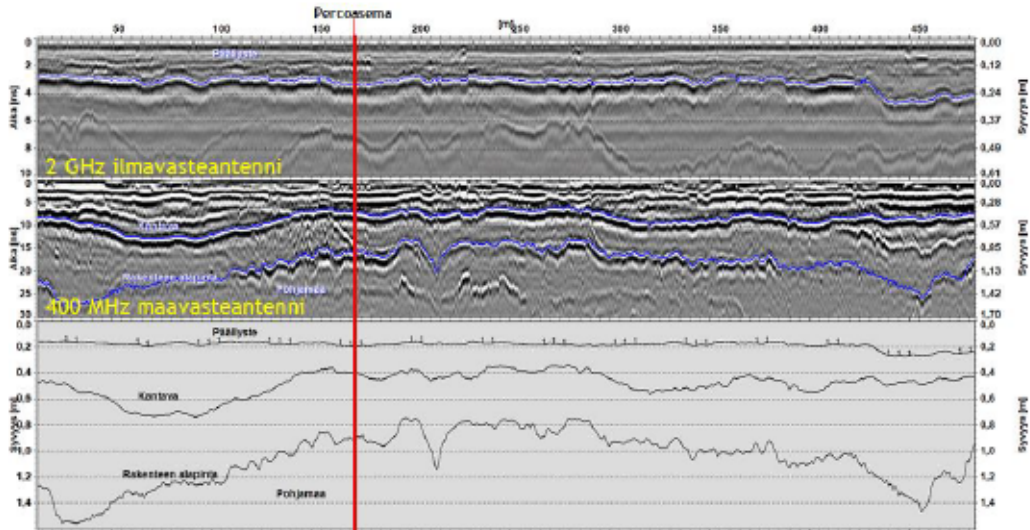
Kuva 21 Karstulan (77/1/4845) ja Kyyjärven (16863/4/529) mittauskohteiden sijainnit. (Liikenneviraston Tiemappi karttapalvelu)



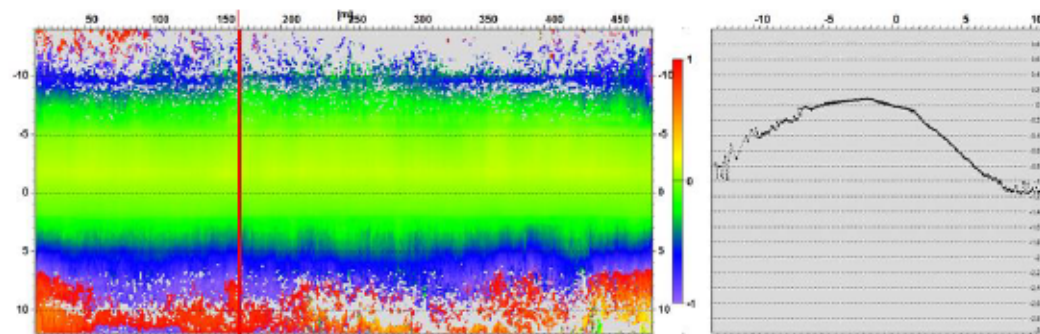
Kuva 22 Näkymä Karstulan Percoaseman sijaintipaikalta itään. Kuva otettu Percoaseman puoleiselta pientareelta iltapäivällä 17.5.2017.

Tien päällysrakenne oli noin 1,0 m paksuinen ja rakenteen alapuolella oli vedellä kylästynyttä turvetta. Kohde oli päällystetty uudelleen syksyn 2016 aikana. Ennen päällystämistä päällysteen paksuus kohteella oli 130 mm ja sen jälkeen noin 180–200 mm. Kantava kerroksen paksuus oli pääosin 200–300 mm. (Kuva 23) Ennen paranta-

mista tehtyjen TSD-mittausten BCI-arvot vaihtelivat 60 ja 90 välillä. Koko tien leveys oli noin 7 m ja ajoradan leveys oli 6,5 m. Tien tasausviiva sijaitsee suunnilleen 0,8 m ympäröivän maaston yläpuolella (Kuva 24). Pohjavedenpinnan arvioitiin olevan noin 1,4 m syvyydessä antureiden asennuksen aikana 15.9.2016. Kohteella tehtyjen havaintojen perusteella alueen kuivatus toimii melko hyvin, mutta olosuhteet suoalueella ovat hyvin kosteat. Kohteella ei ole varsinaisia sivuojia, vaan vesi imeytyy suoraan ympäristöön.



Kuva 23 Maatutkamittausdata ja tulkinat Karstulan Percoaseman kohdalta. Kuvassa ylimmässä kentässä on 2,0 GHz ilmvasteantennin ja keskellä 400 MHz maavasteantennin datat ja alimpana näistä tehdyt paksuustulkinat.



Kuva 24 Laserkeilaindatan pohjalta laadittu tien poikkileikkausprofiili Karstulan Percoaseman sijaintipaikalla paalulla 775 m.

Karstulassa mittausanturit asennettiin 15.9.2016. Dielektrisyyttä mitattiin pistemäisesti 0,25 m, 0,4 m, 0,65 m ja 1,3 m syvyyksiltä uran keskeltä. Uuden Percoaseman sondit oli asennettu viidelle syvyydelle, joista 1,3 m syvyydelle asennettua anturia käytettiin kuormitusten aikaisissa mittauksissa. Huokosvedenpaineanturit olivat 1,4 m syvyydellä toisen ollessa uran keskeltä 0,1 m tien keskilinjaa kohti ja toisen 0,5 m tien reunaan kohti. Päälysteen alapinnan siirtymän mittausta varten asennettiin uran keskelle kaksi anturia, joista toinen on ollut toimintakunnossa. Antureiden sijainnit on esitetty liitteessä 2 olevassa taulukossa.

Simon kohteella mitattiin tien pinnalta laserkeilaimella urasyvyyttä ja maatutkalla kosteuden muutoksia.

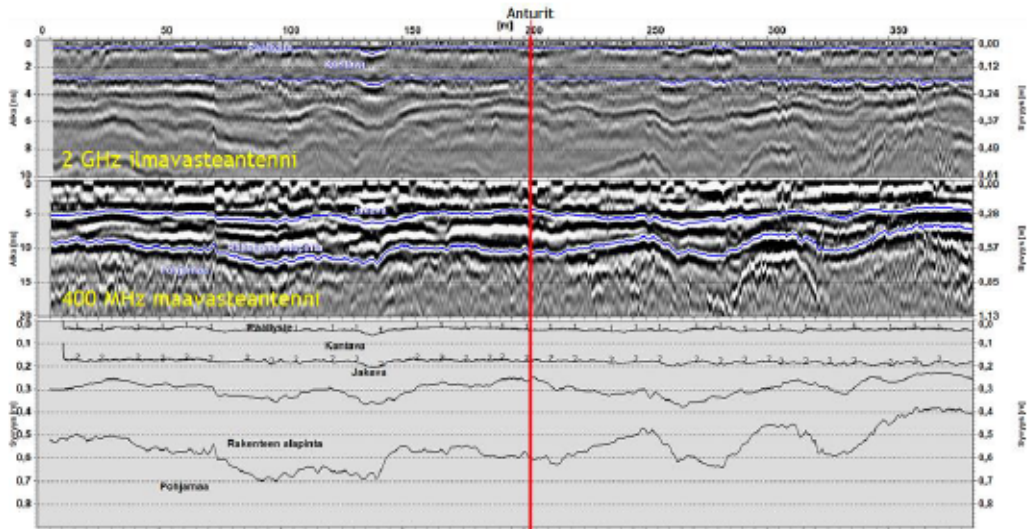
3.2.5 Mt 16863 Kyyjärvi

Kohde sijaitsee osoitteessa Vehkaperäntie 1560 (Tie 16863, tieosa 4, paalu 520). Kohdeella keskimääräinen vuorikausiliikenne on ollut noin 50 ajoneuvoa vuorokaudessa. Kyyjärven mittauskohteen sijainti kartalla on esitetty kuvassa 21. Kuvasta 25 havaitaan maaston olevan mittauskohteessa pääosin tasaista. Kuvassa etualalla näkyy ympyröitynä kohta, johon siirtymäanturi asennettiin.

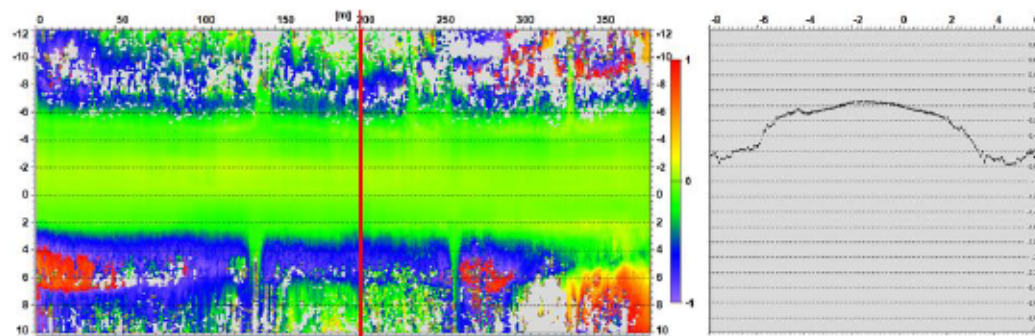


Kuva 25 Näkymä Vehkaperäntien mittauskohteelta etelään päin syksyllä 2016.

Tien päällysrakenne kohteella oli noin 0,6 m paksuinen. Tiekohteen päällyste oli paksuudeltaan keskimäärin 30–40 mm ja kantavan kerroksen paksuus oli noin 150 mm. (Kuva 26) Mittauskohteen pohjamaa oli pohjamaakartan mukaan turvetta. Tien leveys oli noin 5,8–6 m ja tien tasausviiva sijaitsi noin 0,5 m ympäröivän maaston yläpuolella (Kuva 27). Päällysteessä oli havaittavissa loivapiirteistä urautumista ja pituushalkeamia.



Kuva 26 Maatutkamittausdata ja tulkinnot Kyyjärven mittauspaikan kohdalta. Kuvassa ylimmässä kentässä on 2,0 GHz ilmastantennin ja keskellä 400 MHz maavastantennin datat ja alimpana näistä tehdyt paksuus-tulkinnot.



Kuva 27 Laserkeilaindatan pohjalta laadittu tien poikkileikkausprofiili Kyyjärven mittauspaikalta paalulla 520 m.

Tiellä 16863 on todennäköisesti tehty aiemmin sekoitusjyrsintää noin 200 mm syvyydelle ja asennettu paikoin teräsverkoja, mutta mittauskohteeksi valitulla tieosuudella ei ollut toteutettu kumpaakaan toimenpidettä. Kohteella BCI-arvot olivat reilusti yli 100 ja se oli tieosan pehmeintä aluetta. Syksyn 2016 kuormituskokeiden yhteydessä kuivatuksessa havaittiin puutteita. Sivuolja oli tukossa ja vesi seisoj erityisesti kuormitettavan puolen ojassa.

Kyyjärvellä asennettiin 20.10.2016 vain yksi päällysteen alapinnan siirtymään mittaava anturi uran keskelle. Anturi ei toiminut enää vuoden 2017 mittauksissa johtuen todennäköisesti routimisen aiheuttamista vahingoista.

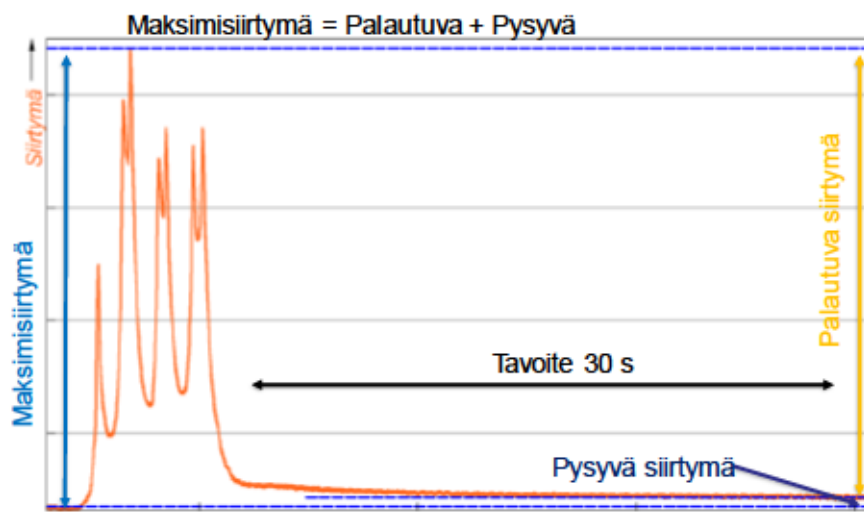
Kyyjärven kohteella mitattiin tien pinnalta laserkeilaimella urasyvyttä ja maatutkalla kosteuden muutoksia.

4 Mittaustulokset

4.1 Mittaustulosten esittelyssä käytettyä terminologiaa

Pystysiirtymiä esittelevissä kuvaajissa on käytetty kuvassa 28 esitettyjä termejä. Pysyvä siirtymä on pyritty määrittämään 30 sekuntia kuormitusajoneuvon ylityksen jälkeen. Tästä on poikettu muiden ajoneuvojen siirtymään aiheuttamien muutosten takia tai liian aikaisin lopetetun tiedonkeruun takia. Laskettaessa yhteen ajoneuvojen ylityksistä muodostuneita pysyviä siirtymiä on käytetty kahta yhteenlaskutapaa, joista on käytetty seuraavia termejä:

- Todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä lasketaan vähentämällä ajoneuvon jälkeistä pystysiirtymälukemasta mittausten alkaessa mitattu pystysiirtymälukema
- Teoreettinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä saadaan laskemalla yhteen kuormitusajoneuvojen (tai muiden mitattujen ajoneuvojen) aiheuttamat pysyvät pystysiirtymät. Teoreettisessa kumulatiivisessa pysyvässä siirtymässä lasketaan yhteen tietyn ajoneuvoryhmän aiheuttamat pysyvät siirtymät, jotka on mitattu ajoneuvojen ylitysten aikaisista mittausdatoista. Tässä raportissa on kaksi ryhmää, joista toinen on tutkimusta varten tilatut ajoneuvot (omat) ja toinen on muut mitatut ajoneuvot (muut).



Kuva 28 Periaatekuva maksimisiirtymän ja pysyvän siirtymän määrittämisestä mittausdatasta.

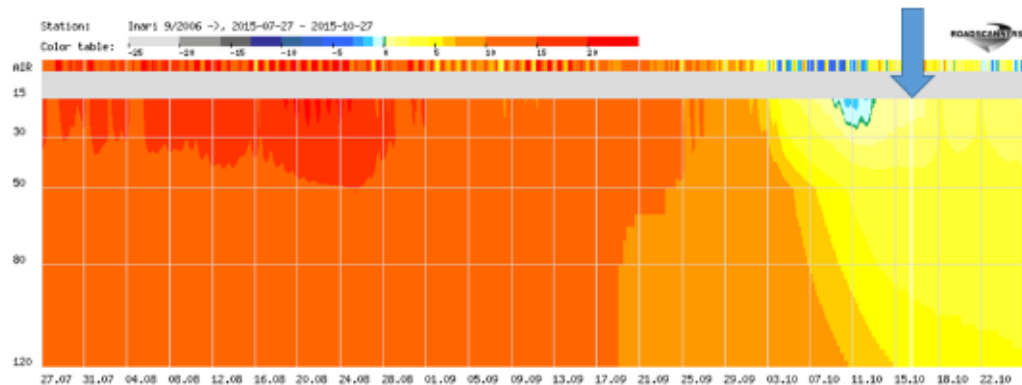
Huokosvedenpaineen mittausten yhteydessä on käytetty termejä HVP max ja HVP min. HVP max tarkoittaa kyseisellä kuormituksen aikana mitattua suurinta huokosvedenpainetta ja HVP min vastaavasti kuormituksen aikana mitattua pienintä huokosvedenpainetta.

MDI (Moisture Damage Index) kuvaa numeerisessa muodossa samaa asiaa (kyllästysaste), mitä esitetään graafisesti maatumkatadatasta lasketussa kosteusprofiilissa. Rakenteen yläosalle, keskiosalle ja alaosalta lasketaan omat lukuarvonsa ja näistä lasketaan vielä edelleen painotettu kokonaisarvo (Total MDI). Menetelmää vielä osittain edelleen kehitetään ja tulee muistaa, että MDI ei vastaa suoraan kuinka kostea materiaali on, vaan se reagoi ennen kaikkea, kun kyllästysaste nousee lähelle ja yli 70–80 %:n kyllästysastetta. Arvoja ei ole myöskään kalibroitu täysin vielä Suomen materiaaleille. Oleellista tulosten arvioinnissa on verrata suhteellista muutosta MDI:ssä kuormitusten aikana.

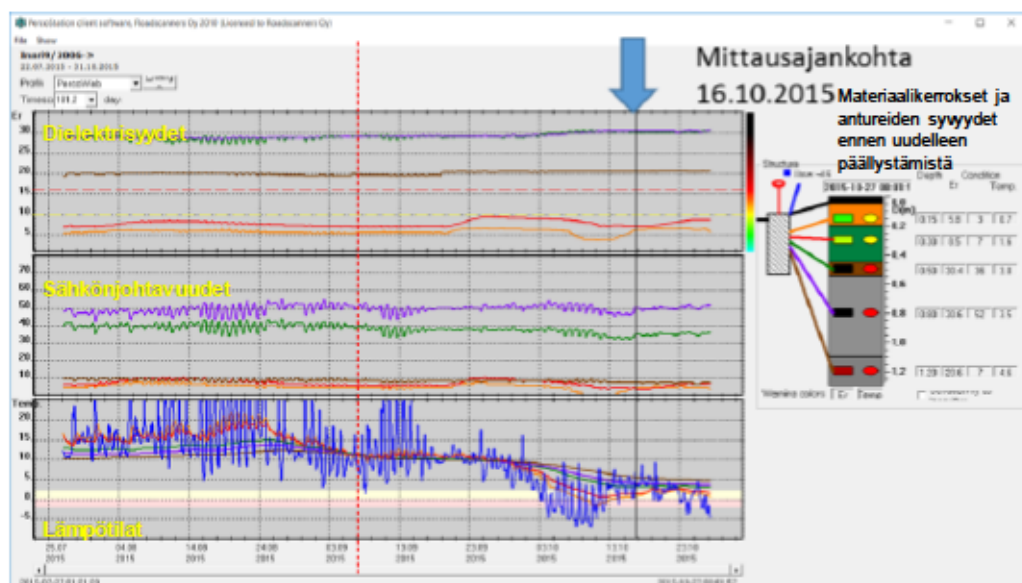
4.2 Mt 9553 Inari – syksy 2015

4.2.1 Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet

Inarin kuormituskokeet mobilisoitiin varsin nopealla aikataululla Angelintien Percoaseman kohdalle, jossa tien päällyste oli 70–90 mm paksu tien rakennekerroksen paksuuden ollessa 0,6 m kostella pohjamaalla. Alkuperäisen suunnitelman mukaisesti kuormituskokeet oli tarkoitus tehdä 8.10.2015, mutta sitä edeltävälle ajanjaksolle sattui useiden pakkaspäivien jakso (kuva 29), oli mittauksen toteutusta lykättävä. Seuraavalla viikolla lämpötilat kohosivatkin nollan yläpuolelle ja mittaukset päätettiin toteuttaa 16.10.2015 sääennusteiden luvatta lämpötilan pysyvän yölläkin pienimmillään 0 °C ja Percoaseman antureiden osoittaessa, että kantava kerros pääosin sulaisi mittauspäivään mennessä. Kuvassa 29 on esitetty Percoaseman tuloksia lämpötilan osalta elo-lokakuulta 2015. Kuvasta nähdään, että mittauksia edeltävän viikon aikana tierakenne ehti jäätymään jo melkein 0,3 m syvyydelle, mutta ilman jälleen lämmetessä routa alkoi sulaa alhaalta ylöspäin. Mittauspäivänä rakenne oli jo sulanut ylimmän noin anturi 0,2 m syvyydellä sijaitsevan anturin kohdalta. Keski-Lapista tehdyn havainnon mukaan tiet olivat tuolloin pinnasta jäässä noin 80–100 mm:n syvyydelle saakka ja Inarin Angelissa tilanne oli hyvin lähellä samaa. Sama nähdään kuvan 30 dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvoista. Ylimmän anturin ympäristö oli useita päiviä jäässä dielektrisyysarvon ollessa selkeästi alle 5 ja sähkönjohtavuuden mennessä arvoon nolla. Ylimmän anturin dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvojen palautuminen ennen jäätymistä vallinneeseen tasoon osoittaa tierakenteen sulaneen anturin ympäristöstä ennen kuormituskokeita. Vastaavasti toiseksi ylimmän anturin arvojen pysyessä suurin piirtein koko ajanjakson samalla tasolla osoittaa anturin ympäristön pysyneen sulana. Kuvasta 30 nähdään myös, koko syksyn ajan pohjamaan dielektrisyysarvot olivat välillä 20–30, mikä tarkoittaa, että materiaali oli lähes vedellä kyllästynyt. Sen sijaan tien noin 0,6 m paksuiset päällysrakennekerrokset olivat suhteellisen kuivat ja niiden dielektrisyysarvot olivat alle 10.



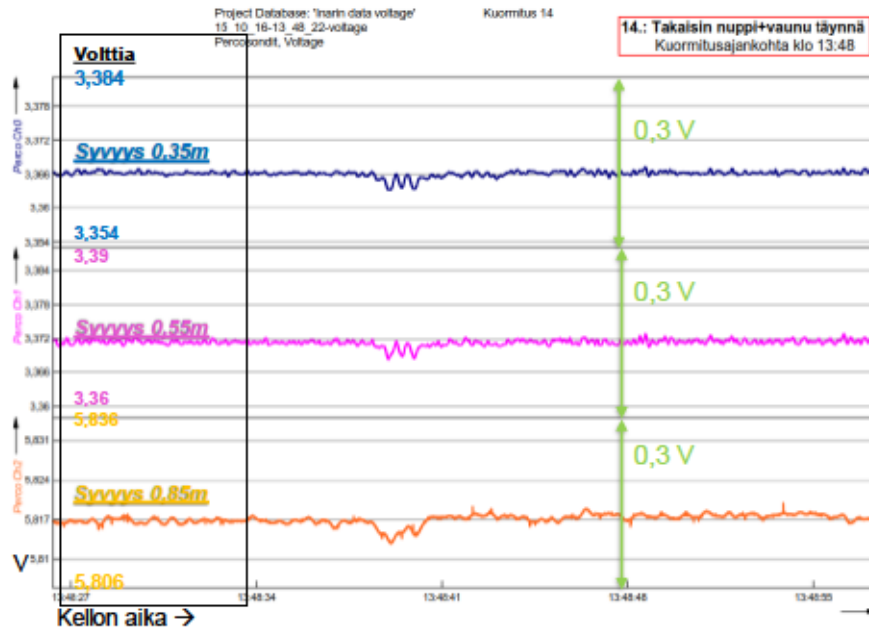
Kuva 29 Tierakenteen ja pohjamaan yläosan lämpötilaprofiili Inarin Percoaseman kohdalla elo-lokakuussa 2015. Kuormituskokeen ajankohta on kuvassa näytetty paksulla sinisellä nuolella.



Kuva 30 Inarin Percoaseman antureista mitatut dielektrisyydet ja sähkönjohtavuudet sekä lämpötilat syksyllä 2015. Uudelleen päällystämisen jälkeen anturit olivat 0,05 m syvemmällä tierakenteen pinnasta mitattuna. Kuormituskokeen ajankohta on osoitettu paksulla sinisellä nuolella.

4.2.2 Dielektrisysmittaukset

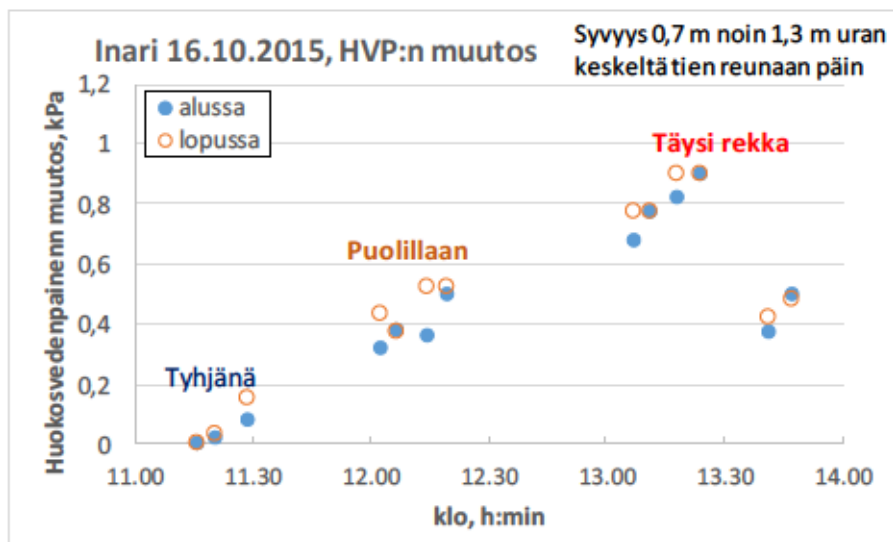
Kuvassa 31 on esitetty viimeisen täyden tukkirekan ylityksen aiheuttamat vasteet dielektrisyydsantureista mitattuina voltteina. Kuvasta nähdään mitattujen arvojen pahlavaan ennen ylitystä vallinneelle tasolle ja kuvassa erottuu enintään telin ylitys. Päivän kuormitusten aikana dielektrisyyden suurenneen 0,15 yksikköä 0,55 m syvyydessä, jossa sen suurusluokka oli mittausten aikana 30 ja pienenneen alle 0,1 yksikköä 0,35 m syvyydessä, jossa mittausten alkaessa dielektrisyyden oli 7,2. Käytännössä kuormituksilla ei siis ollut vaikutusta mitattuihin dielektrisyyden arvoihin.



Kuva 31 Inarin Percoaseman antureilla mitatut dielektrisyiden muutokset voltteina viimeisestä ylityksestä (täyteen lastattu vetoauto ja perävaunu). Kun mitattu voltti pienenee, niin dielektrisyys suurenee.

4.2.3 Huokosvedenpaineen mittaukset

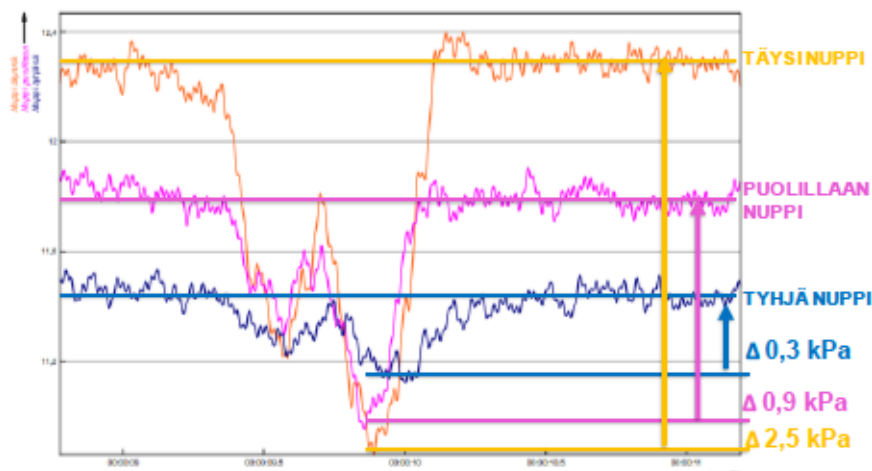
Toimivista huokosvedenpaineantureista vain 0,7 m syvyydellä olevassa anturissa, joka sijaitsi noin 1,3 m ajouran keskeltä tien reunaan päin eli tien penkereessä, tapahtui pientä tason kasvua mittauspäivänä, kunnes kasvanut huokosvedenpaine pääsi purkautumaan osittain. Kuvassa 32 nähdään mitatun huokosvedenpaineen muutokset eri ylityksillä ajan suhteen kuormituspäivänä. Eri lastausasteilla ilmoitetuista ylityksistä kaksi ensimmäistä olivat aina pelkästään vetoauton ylityksiä. Neljännen ylityksen (vetoauto ja perävaunu tyhjänä) tiedoston vaurioitumisen vuoksi neljännen ylityksen mittausdata puuttuu kuvasta.



Kuva 32 Inarin kohteella kuormituspäivän aikana mitattu huokosvedenpaineen muutos 0,7 m syvyydellä ajouran pinnasta ja 1,3 m ajouran keskeltä tien reunaan päin sijainneesta anturista.

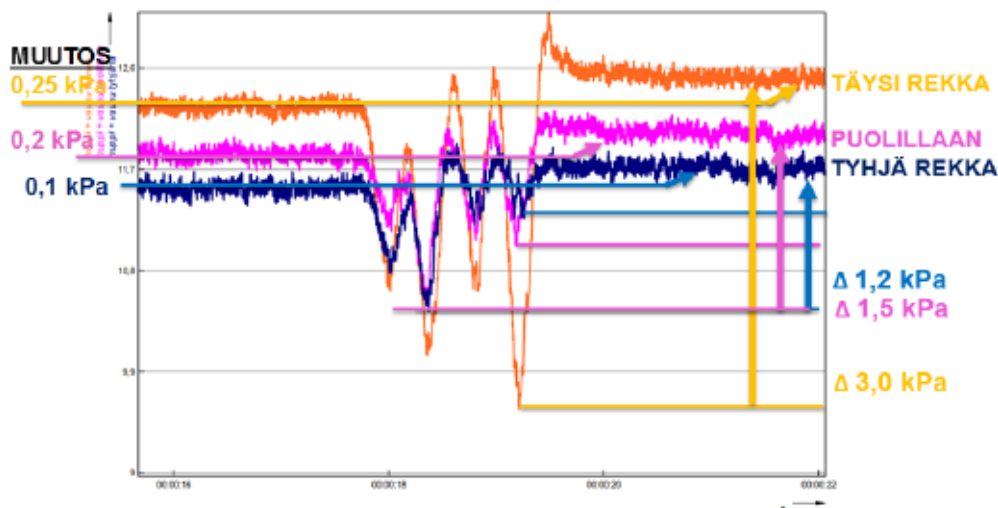
Ajourassa 0,65 m ja tiepenkereessä suurimmalla asennussyvyydellä kauimpana ajourasta olleista huokosvedenpaineantureista saadut mittaussignaalit olivat varsin vaimeita ja niissä ei havaittu muutoksia mittauspäivänä. Todennäköisinä syinä tähän olivat matalimmassa asennussyvyydessä olleen anturin osalta se, että anturia ympäröivä maa-aines ei ollut täysin veden kyllästämää, jolloin siihen ei käytännössä kehitynyt huokosvedenpainetta ajoneuvoylytysten aikana. Suurimmassa asennussyvyydessä sijainneen anturin osalta todennäköisenä syynä vaimeaan huokosvedenpaineasteeseen taas lienee ollut se, että ajoneuvosta aiheutunut kuormitus ehti kyseisellä syvyydellä jo jakaantua varsin laajalle alueelle, mistä johtuen anturin asennustasolle mobilisoituneen huokosvedenpaineen suurus oli todellisuudessaakin melko pieni.

Kuvassa 33 on esitetty huokosvedenpaineessa tapahtuneet muutokset vetoauton ylittäessä ensimmäistä kertaa anturin kyseessä olevassa kuormitusasteessa anturin sijainnin ollessa 0,7 m syvyydellä ja 1,3 m ajouran keskeltä tien reunaan päin. Kuvasta nähdään, että huokosvedenpaine palautuu ylityksen jälkeen lähtötasolleen. Tyhjillään vetoauton ylitys ei aiheuta juurikaan hetkellistä muutosta huokosvedenpaineessa, mutta täyttöasteen kasvaessa hetkellinen vaste kasvaa selkeästi. Huomionarvoin seikka ajoneuvoylytysten aikana mitatuissa huokosvedenpaineasteissa on myös se, että ajoneuvoylytysten aikana havaittu muutos ei indikoi huokosvedenpaineen hetkellistä kohoamista vaan alenemista. Syynä tähän on todennäköisesti mittausanturin mekaaninen liike suhteessa asennusympäristöönsä ja tästä aiheutuva hetkellinen alipaine.



Kuva 33 Inarin kohteella huokosvedenpaineessa tapahtuneet muutokset vetoauton ylittäessä ensimmäistä kertaa anturin kyseisellä kuormitusasteella. Anturi sijaitsi 0,7 m syvyydellä ajouran pinnasta ja 1,3 m ajouran keskeltä tien reunaan päin.

Kuvassa 34 on esitetty huokosvedenpaineessa tapahtuneet muutokset koko rekan (vetoauto ja perävaunu) ylittäessä ensimmäistä kertaa anturin kyseisellä kuormitusasteella anturin sijainnin ollessa 0,7 m syvyydellä ja 1,3 m ajouran keskeltä tien reunaan päin. Kuvasta nähdään, että huokosvedenpaine kasvaa ylityksen jälkeen. Tyhjällä rekalla kasvu on pientä, mutta kuormituksen kasvaessa se on selkeämpi ollen täyden rekan ylityksellä 0,25 kPa. Huomattavaa on myös, että huokosvedenpaineen kasvu tapahtuu vasta perävaunun osalla. Huokosvedenpaineen hetkellisen muutoksen arvot ovat kokonaisella rekalla suurempia kuin pelkällä vetoautolla. Huomattavaa on myös, että täydellä rekalla suurin ero muodostuu peräkärryn viimeisen telin ja ylityksen jälkeisen tilan välillä. Tyhjänä ja puolilleen lastattuna suurin ero muodostuu vetoauton viimeisen telin ja ylityksen jälkeisen tilan välillä.

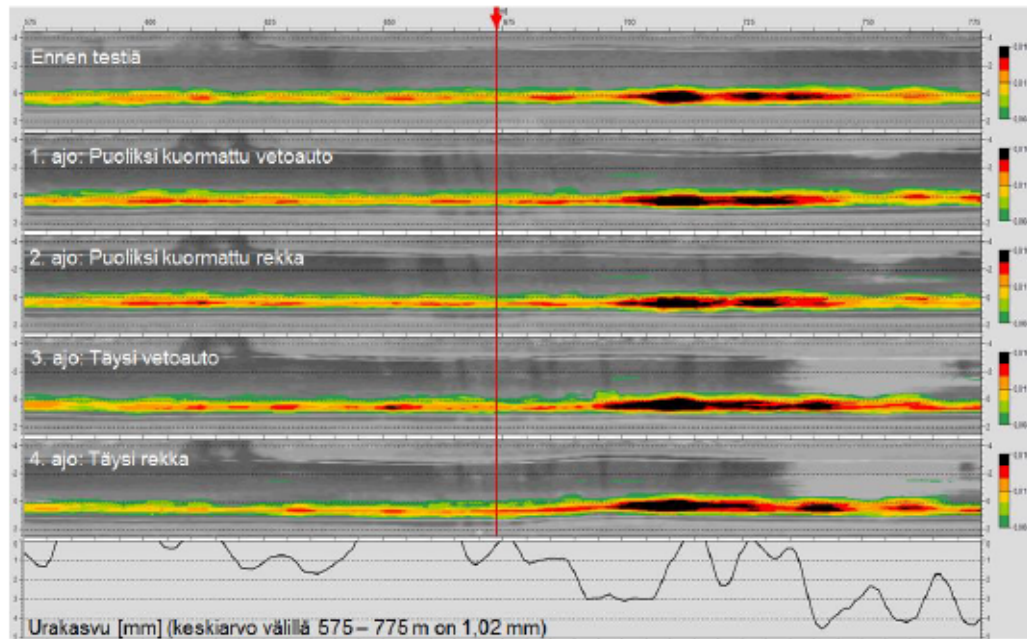


Kuva 34 Inarin kohteella huokosvedenpaineessa tapahtuneet muutokset vetoauton ja perävaunun ylittäessä ensimmäistä kertaa anturin kyseenomaisella kuormitusasteella. Anturi sijaitsi 0,7 m syvyydellä ajouran pinnasta ja 1,3 m ajouran keskeltä tien reunaan päin.

4.2.4 Urautuminen laserkeilauksella

Kuvassa 35 on esitetty RDSV-urasyvyyskartat Inarin kohteelta, jossa tien päällyste oli 70 - 90 mm paksu tien rakennekerroksen paksuuden ollessa 0,6 m kostella pohjamaalla, paaluväliltä 575-775 m ennen kuormitusajoja sekä jokaisen neljän kuormitustapauksen jälkeen. Jokaisella kuormituksella on ajettu kohteen yli aina kaksi kertaa ennen RDSV-mittausta.

Urakartoista nähdään, että urasyvyyden kasvu on monin paikoin ollut suurta kuormituskertojen varsin vähäinen lukumäärä huomioon ottaen. Keskimääräinen urasyvyyden kasvu kuormituskokeiden aikana paaluvälillä 575-775 m on ollut 1,02 mm, mutta suurimmillaan urakasvu on paikoin ollut jopa 3-4 mm. Suurin urakasvu havaittiin samoilla kohdilla, missä maatutkamittauksissa havaittiin pumppautumiseen viittaavaa kosteuden kasvua rakenteessa. Suurin kuormitusvaiheiden välinen urakasvu havaittiin puoliksi kuormatun rekan ja täyden vetoauton välillä, missä kohdassa muodostui lähes puolet kuormitusajojen aikana mitatusta keskimääräisestä urasyvyyden kasvusta. Kuvan 36 kosteusprofiileista ja MDI-kuvaajista havaitaan, että samassa kuormitusvaiheessa on tapahtunut selkeä hyppäys rakenteen yläosan kosteudessa. Seuraava kuormitusvaihe (täysi rekka) on lisännyt urautumista ja rakenteen kosteutta edelleen jonkin verran, mutta suhteellinen muutos ei ole yhtä suuri kuin edellisessä kuormitusportaassa. Tulosten valossa tierakenteessa tapahtui nopeaa urautumista merkittävämmän vasta täydellä vetoautolla ja täydellä rekalla. Tähän liittyen voidaan kuitenkin pohtia, onko kyseessä se, että vasta täysi vetoauto aiheuttaa urautumista vai alkoiko pumppautuminen jo aiemmin, mutta ongelmat tulivat näkyviin vasta tällöin. Eli olisi tapahtunut alemmillakin kuormilla, jos olisi tehty useampia toistoja?

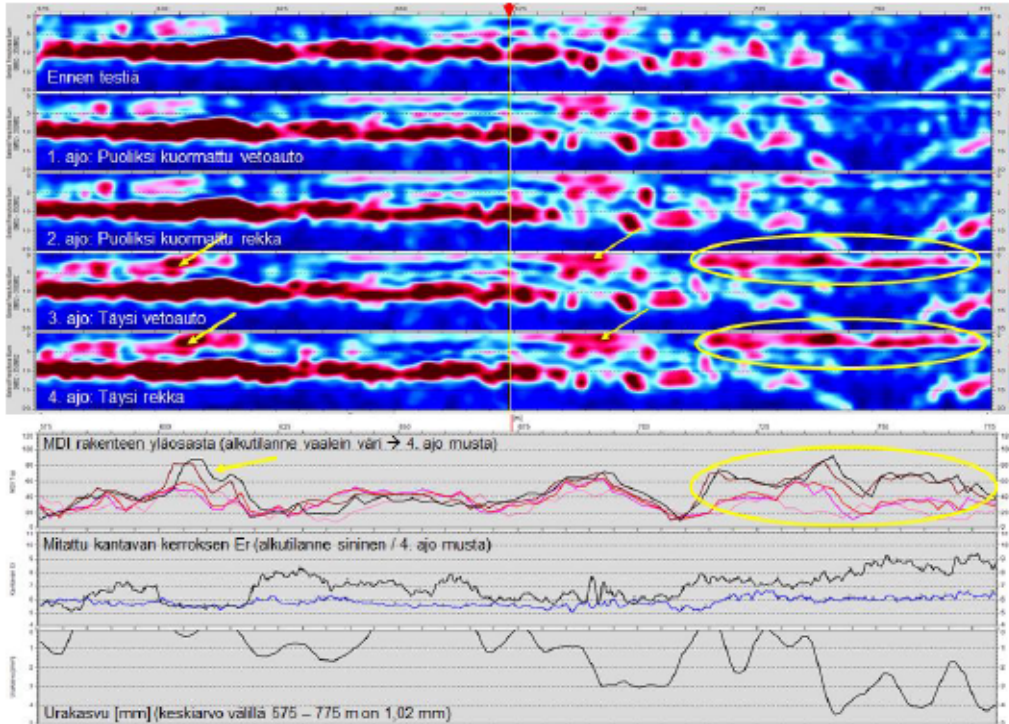


Kuva 35 RDSV-urasyvyyskartat Inarin kohteelta. Kuvassa on esitetty urasyvyyskartat ennen kuormitusajoja sekä jokaisen neljän kuormitustapauksen jälkeen. Jokaisella kuormituksella ajettiin kohteen yli aina kaksi kertaa ennen RDSV-mittausta. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remisiodata päällysteestä. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja pystyviivalla.

4.2.5 Kosteuden muutokset maatutkamittauksella

Maatutkan 400 MHz:n antennidatasta lasketut kosteusprofiilikuvat antoivat varsin mielenkiintoisia tuloksia. Kuvasta 36 nähdään, että rakenteet Percoaseman kohdalla olivat varsin kuivat ennen testiä. Ennen kuormitusta 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, joka on noilla kohdilla kasvanut kuormitusten aikana noin 2–3-kertaiseksi alkutilanteeseen verrattuna. Näissä kohdissa tie myös urautui selvästi kuormituskokeiden aikana, mikä nähdään kuvassa 36 alimpana olevasta urakasvukuvaajasta sekä edellisen kappaleen kuvasta 35. 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. Tämän alta menetelmä ei signaalinvaimennuksen takia kykene vielä laskemaan.

Mittauksia analysoitaessa tulee myös muistaa, että aivan lähellä pintaa (0–2 ns) olevat heijasteet saattavat johtua sulavasta roudasta vapautuvasta vedestä.



Kuva 36 Maatutkan MDI (moisture damage index) analyysitulokset paaluväliltä 575–775 m. Pystymittakaava on nanosekunti (ns), jossa yksi nanosekunti vastaa noin 60 mm paksuutta. Punaiset kohdat kuvaavat korkeampaa materiaalin kyllästysastetta. Keltaisella nuolella tai ympyröinnillä on merkitty paikat, jossa kyllästysaste on selvästi noussut. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja keltaisella pystyviivalla. Kosteusprofiilien alla on esitetty kuvaajissa rakenteen yläosan MDI jokaisen ajon jälkeen, mitattu kantavan kerroksen dielektrisyys alku- ja lopputilanteessa sekä urakasvu.

4.2.6 Lämpökameramittaus

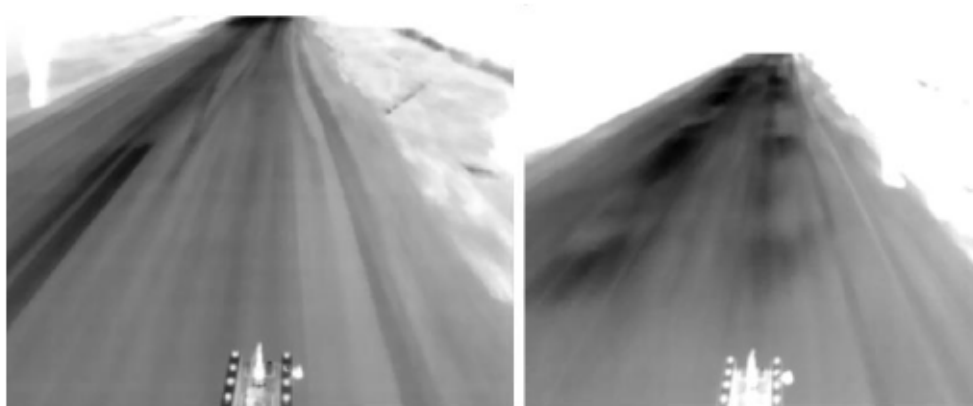
Lämpökameramittauksissa jonkin verran ongelmia aiheutti aurinkoinen päivä ja sivulta tuleva auringonvalo, jolloin tien pinta lämpeni epätasaisesti. Lisäksi yöllä jäässä ollut tien pinta alkoi sulaa ja raskaan rekan renkaat lämmittivät päällystettä ajokohdassa.

Kuvissa 37 ja 38 on esitetty kaksi kuvaparia video- ja lämpökameradatasta Percoaseman kohdalta eteenpäin ennen kuormitusta ja ensimmäisen täydellä kuormalla tehdyn kuormituksen jälkeen. Lämpökamerakuvissa näkyy tien pintaa noin 50 metrin matkalla, noin paaluväli 670–720 m. Lämpimämmät kohdat näkyvät tummempina lämpökamerakuvassa.

Kuvista voidaan havaita, että tien pintaan on tullut merkittäviä anomaliaita, mitkä kertovat, että lämpimämpi vesi on pumppautunut tien pintaan. Samassa kohdassa havaitaan kosteusprofiileissa (kuva 37) selkeää kosteuden kasvua tierakenteen yläosassa sekä uran kasvuna (kuva 35).



Kuva 37 Videon stillkuvat Percoaseman kohdalta eteenpäin ennen kuormituksia (vasen) ja kuormitusten jälkeen (oikea)



Kuva 38 Lämpökameran stillkuvat Percoaseman kohdalta eteenpäin ennen kuormituksia (vasen) ja kuormitusten jälkeen (oikea). Lämpimämmät kohdat näkyvät tummempina lämpökamerakuvassa. Oikeanpuoleisessa kuvassa tien pintaan on tullut merkittäviä anomaliaita, mitkä kertovat, että lämpimämpi vesi on pumppautunut tien pintaan.

4.2.7 Yhteenveto Inarin kokeista

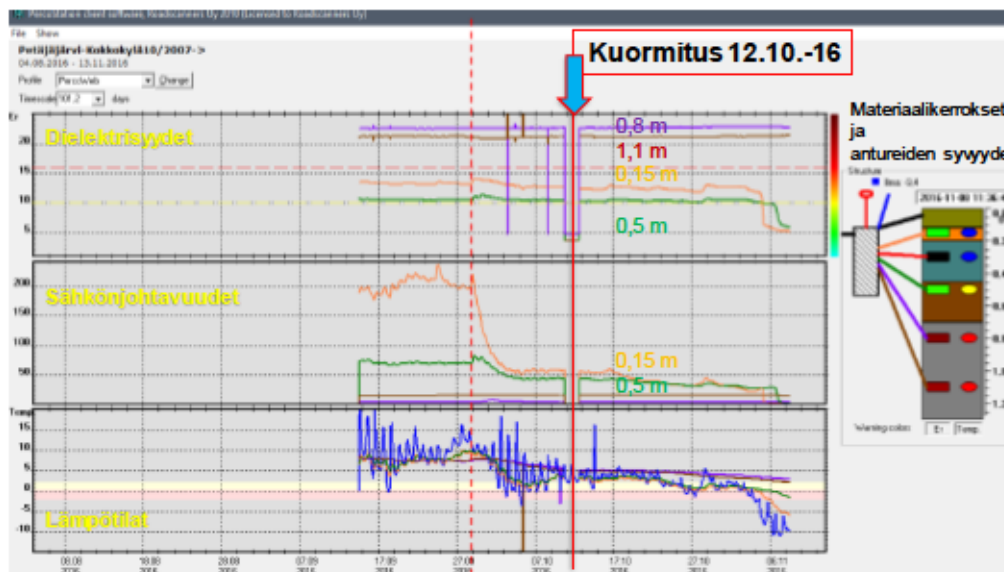
- Percoaseman kohdalla, jossa tien päällyste oli 70–90 mm paksu tien rakennekerroksen paksuuden ollessa 0,6 m kostella pohjamaalla, mitatuissa dielektrisyysarvoissa ei tapahtunut muutosta kuormitusten aikana
- Yhdessä huokosvedenpaineanturissa 0,7 m syvyydessä tapahtui maltillista muutosta. Pelkän vetoauton vaikutuksesta huokosvedenpaine ei kohonnut, mutta vetoautolla ja perävaunulla tapahtui lievää kohoamista.
- MDI-analyysitulosten perusteella kosteutta nousi tierakenteen yläosaan testialueen toisessa päässä, noin 50–150 metrin etäisyydellä Percoaseman antureista
- Myös lämpökamerakuvaukset antoivat selvää indikaatiota veden pumppautumisesta tierakenteeseen samalta kohdalta.
- Urat muodostuivat alueelle, missä MDI-analyysin ja lämpökamerakuvauksen perusteella kosteutta pumppautuu tierakenteen pintaa kohti
- Suurin kuormitusvaiheiden välinen urakasvu havaittiin puoliksi kuormatun rekan ja täyden vetoauton välillä, missä kohdassa muodostui lähes puolet kuormitusajojen aikana mitatusta keskimääräisestä urasyvyyden kasvusta.

- Raskas 79 tn 10-akselinen rekkä vahingoittaa Inarin Percoaseman koekoh- teen pehmeiköllä olevaa ohuesti päällystettyä tierakennetta syksyisen routa- syklin jälkeen.

4.3 Mt 18824 Ranua (soratie) – syksy 2016

4.3.1 Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet

Kesällä Ranuan Percoaseman tiedonkeruulaitteisto oli ollut huollossa kesällä ja seur- rantamittauksia alkoivat syyskuun puolivälissä 2016. Yksi 0,3 m syvyydellä oleva an- turi ei ollut toimintakunnossa. Kuvassa 39 on esitetty soratieltä mitatut dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvot ja lämpötilat syksyllä 2016. Dielektrisyysarvot pysyivät mit- tauskuukautena samalla tasolla paitsi 0,15 m syvyydellä olevan anturin arvot pieneni- vät hieman. Syyskuun lopulla alkanut kuivempi kausi ja tierakenteen kuivuminen ha- vaitaan 0,15 m ja 0,5 m syvyydellä olevista antureista. Punaisen katkoviivan jälkeen sähkönjohtavuus pienenee tarkoittaen huokostilassa olevien pienten hiukkasten kiin- nittymisestä raerunkoon ja tierakenteen kerrosten tullessa todennäköisesti kestä- vämmäksi. Ranuan Percoasemalla tierakenne alkoi jäätyä marraskuun alussa ylim- män anturin lämpötilan laskiessa alle 0 °C dielektrisyysarvon laski lähelle 5 ja säh- könjohtavuus laski arvoon nolla. Kuvasta 39 nähdään myös pohjamaan dielektrisyys- arvojen olleen yli 20 koko syksyn ajan, mikä tarkoittaa, että materiaali oli lähes vedel- lä kyllästynyttä.



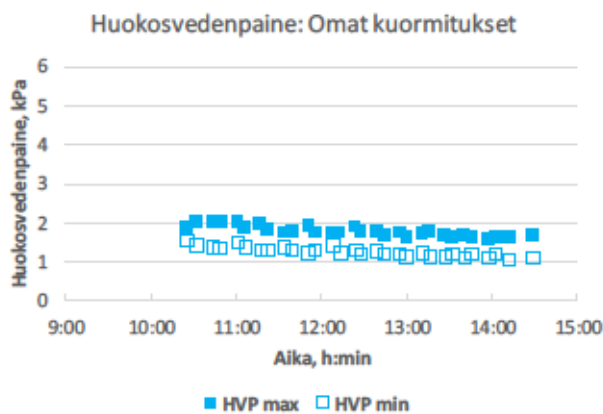
Kuva 39 Ranuan Percoasemalla mitatut soratierakenteen ja pohjamaan dielektri- syysarvot, sähkönjohtavuudet ja lämpötilat syksyllä 2016. Kuormitus- kokeen ajankohta on osoitettu paksulla sinisellä nuolella ja punaisella viivalla.

4.3.2 Dielektrisyysmittaukset

Dielektrisyyttä mitattiin 0,15 m, 0,5 m, 0,8 m ja 1,1 m syvyyksiltä. Kuormituspäivänä 12.10.2016 mitatut muutokset dielektrisyudessa olivat erittäin pieniä tai olemattomia. Tämä tukisi tierakenteen kestäneen kuormitukset mittauspäivän kuivahkoissa olosuh- teissa ilman vaurioita.

4.3.3 Huokosvedenpaineen mittaukset

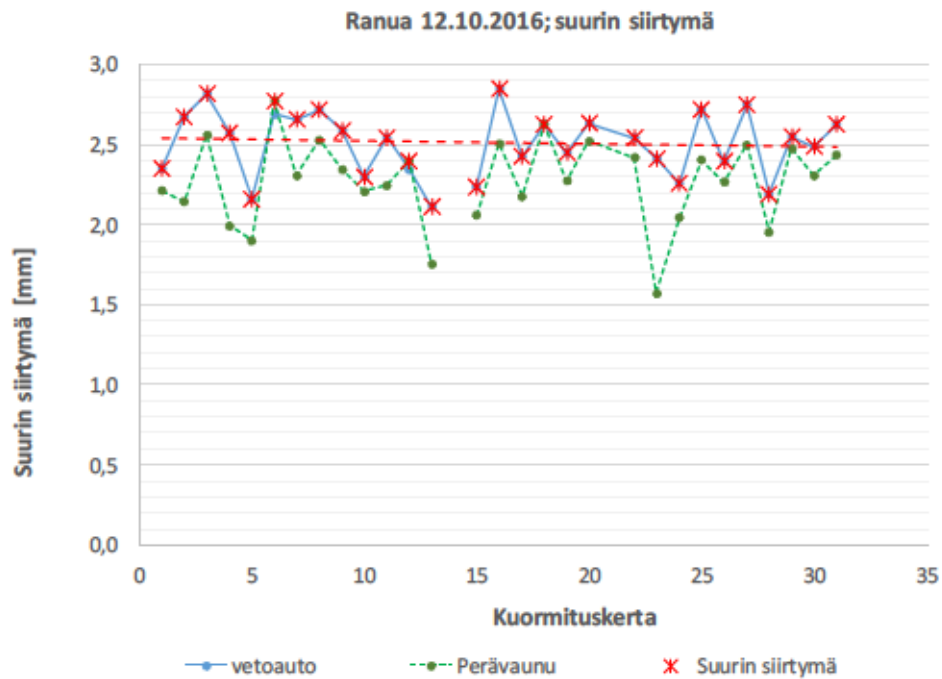
Kuvassa 40 on esitetty rekan ylityksillä mitatut suurimmat (HVP max) ja pienimmät (HVP min) huokosvedenpaineet 0,46 m syvyyteen asennetusta anturista soratiestä, jonka rakennekerroksen paksuus oli noin 0,5 m turpeisella silttimoreenisella pohjamaalla. Mittausten perusteella ylitykset eivät aiheuttaneet soratiellä muutoksia huokosvedenpaineeseen.



Kuva 40 Ranuan kohteella rekan ylityksillä mitatut suurimmat (HVP max) ja pienimmät (HVP min) huokosvedenpaineet.

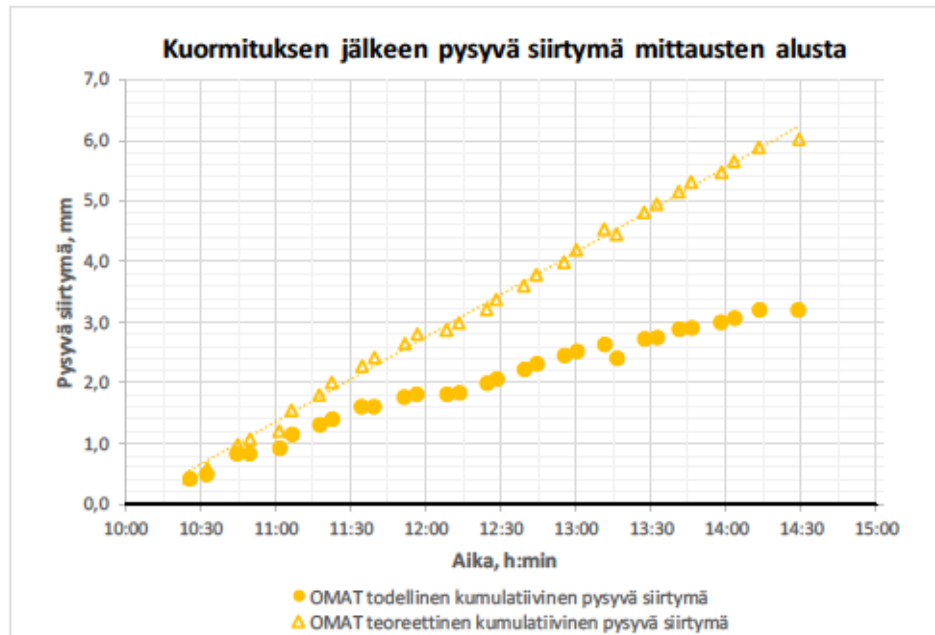
4.3.4 Kulutuskerroksen alapinnan pystysiirtymät

Raskaiden rekkojen kuormitusten aiheuttamia tien kulutuskerroksen alapinnan pystysiirtymiä mitattiin soratien kulutuskerroksen alapintaan asennetulla siirtymäanturilla. Kuvassa 41 on esitetty vetoauton ja perävaunun aiheuttamat suurimmat maksimisiirtymät eri ylityksillä. Kuvan perustella maksimisiirtymä oli noin 2,5 mm ja se pysyi saman suuruisena ylityksestä toiseen vetoauton aiheuttaman maksimisiirtymän ollessa lähes aina suurempi. Maksimisiirtymät syntyivät vetoauton tapauksessa pääosin viimeisen akselin kohdalla ja perävaunun tapauksessa pääosin viidennellä ja kahdeksannella akselilla. Ajolinjoissa havaittiin jonkin verran myös hajontaa, mikä vaikutti enemmän perävaunun kohdalla mitattuihin maksimisiirtymiin.



Kuva 41 Ranuan kohteella rekan ylityksistä mitatut suurimmat pystysiirtymät vetoautolla ja perävaunulla sekä maksimisiirtymät.

Kuvassa 42 on esitetty kuormituksen aiheuttamat todellinen ja teoreettinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä. Koska kuormituskoe toteutettiin molempiin suuntiin ajettaessa, kuormitusvälit olivat melko lyhyet: 4 min ja 12 min. Teoreettisen kumulatiivisen pysyvän siirtymän arvot on laskettu toiseen suuntaan ennen RDSV-auton ylitystä, joka oli noin 15 s rekan ylityksen jälkeen ja toiseen suuntaan noin 30 s rekan ylityksen jälkeen. Kuvasta nähdään, että teoreettinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä kasvaa lähes lineaarisesti, mutta todellisen kumulatiivisen pysyvän siirtymän kasvaminen näyttäisi pienentyvän kuormituskertojen kasvaessa. Todellinen pysyvä siirtymä kasvoi keskimäärin noin 0,1 mm/kuormituskerta. Kuormitusten loputtua teoreettinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä oli puolet suurempi kuin todellinen pysyvä siirtymä mittausanturin kohdalla, vaikka kohteella ei juuri muuta liikennettä ollut kuin kuormitus- ja mittausajoneuvo.



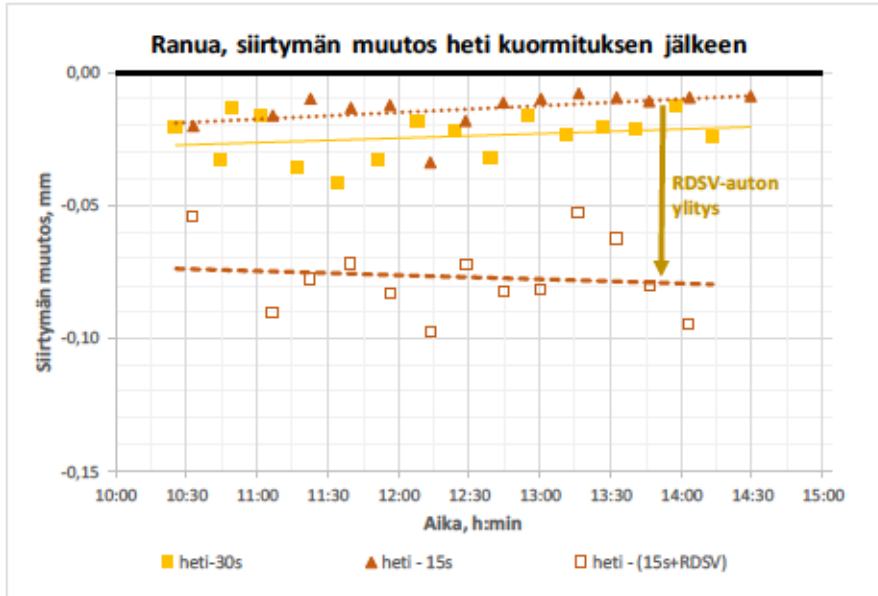
Kuva 42 Ranuan kohteella rekan ylityksillä mitatut todellinen ja teoreettinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä.

Kuvassa 43 on esitetty, kuinka paljon mitattu siirtymä oli muuttunut noin 15 s ja 30 s kuormituksen jälkeen sekä RDSV-auton ylityksestä, kun se ajaa kohteen yli noin 15 sekuntia rekan jälkeen. Kuvasta nähdään, että RDSV-auton ylitys pienentää pysyvää siirtymää. Täten suurimman osan teoreettisen ja todellisen kumulatiivisen pysyvän siirtymän erosta selittänee RDSV-auton vaikutus. Lisäksi pitkä, yli 30 s kestävä, pohjamaan luonteesta johtuva siirtymän palautumisaika selittänee osan erosta.

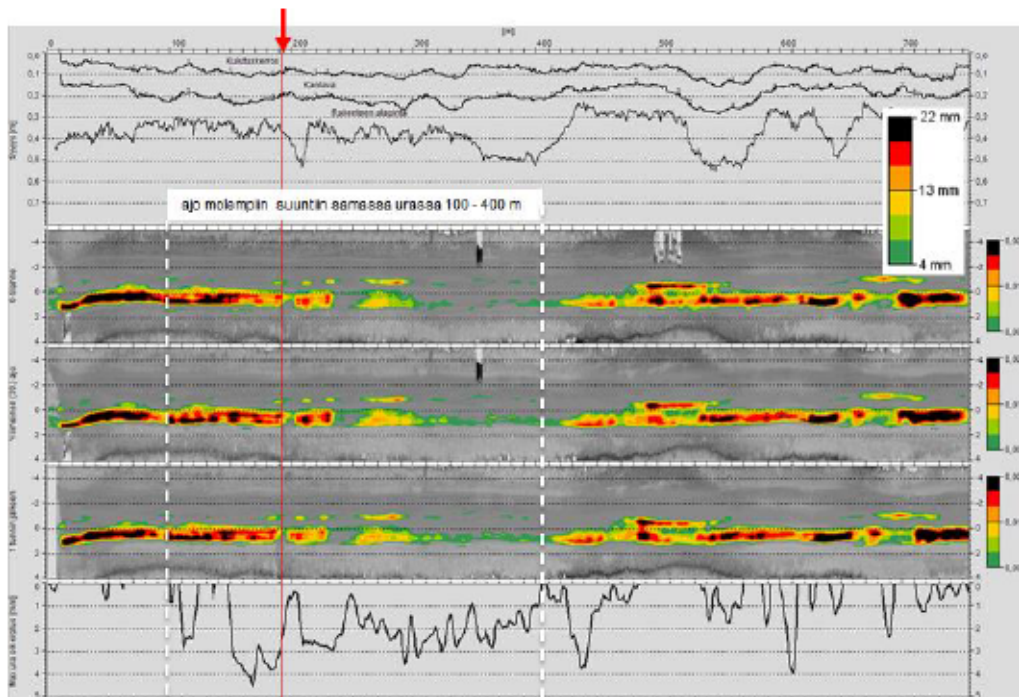
4.3.5 Urautuminen laserkeilauksella

Kuvassa 44 on esitetty RDSV-urasyvyyskartat koko Mt 18824:n mittausajaksolta syksyltä 2016. Soratiekohteella ajettiin yhdellä rekalla yhteensä 30 kuormitusajoa. Kuormitusajoneuvo ajoi molempiin suuntiin samassa ajourassa suunnilleen paaluvälillä 100–400 m. Ylimmässä urakartassa on tilanne ennen kuormitusajoa, keskimmaisessa tilanne välittömästi viimeisen (30.) ajon jälkeen ja alimmassa tilanne yksi tunti viimeisen ajon jälkeen. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata tien pinnasta. Näiden yläpuolella ylimpänä on esitetty maatutkadatista tulkitut rakennekerrokset. Percoaseman ja mittausantureiden sijainti on merkitty punaisella nuolella ja pystyviivalla.

Muutamissa kohdissa havaitaan pieniä eroavaisuuksia urasyvyyskarttojen välillä, mutta käytännössä erot ovat sen verran pieniä, että niitä on vaikea erottaa visuaalisesta kartasta, jossa yksi väri vastaa kolmea millimetriä. Kuvassa alimmaisena esitetään lisäksi mittausajojen aikana tapahtunutta oikean ajouran maksimiurasyvyyden kasvua. Tästä kuvaajasta havaitaan, että urasyvyys oli kasvanut monin paikoin, erityisesti jaksolla jossa kuormitusajoneuvo ajoi molempiin suuntiin samassa ajourassa. Paaluväliltä 100–400 m laskettu urakasvun keskiarvo oli 1,82 mm. Urakasvu tierakenteeseen asennetun siirtymäanturin kohdalla oli noin 2,5–3,0 mm, mikä vastasi hyvin anturilla mitattua 3,2 mm tien pinnan pysyvää siirtymää.



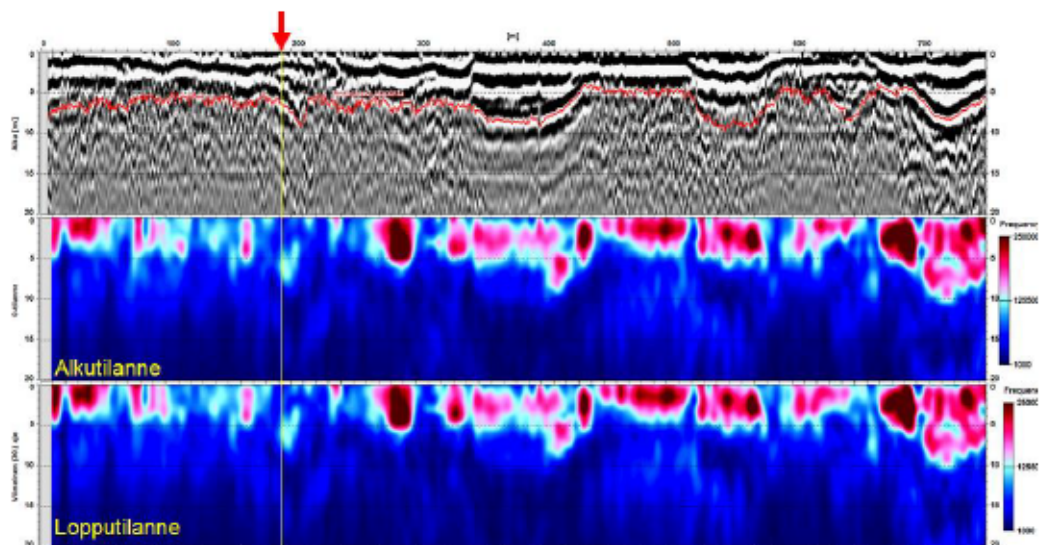
Kuva 43 Ranuan kohteella mitatut siirtymän muutokset 15 s ja 30 s rekan ylityksen jälkeen sekä RDSV-mittausajoneuvon ylitettyä anturin noin 15 s rekan jälkeen.



Kuva 44 RDSV-urasyvyyskartat Ranuan soratiekohteelta (Mt 18824) syksyltä 2016. Ylimmässä urakartassa on tilanne ennen kuormitusajoja, keskimäisessä tilanne välittömästi viimeisen (30.) ajon jälkeen ja alimmassa tilanne yksi tunti viimeisen ajon jälkeen. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata tien pinnasta. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja pystyviivalla. Näiden yläpuolella ylimpänä on esitetty lisäksi maatumkadatusta tulkitut rakennekerrokset. Alimmassa ikkunassa esitetään mittausajojen aikana tapahtunutta maksimiurasyvyyden kasvua.

4.3.6 Kosteuden muutokset maatutkamittauksella

Maatutkan 400 MHz:n antennidatasta lasketut kosteusprofiilikuivat syksyltä 2016 on esitetty kuvassa 45. Soratiekohteella ajettiin yhdellä rekalla yhteensä 30 kuormitusajoa. Ylemmässä ikkunassa on tilanne ennen kuormitusajoja ja alemmassa välittömästi viimeisen ajon jälkeen. Näiden yläpuolella ylimpänä on lisäksi esitetty 400 MHz:n maatutkadata, johon on tulkittu tierakenteen alapinta. Kuvasta nähdään, että tierakenteessa on paikoin kosteampia kohtia lähellä pintaa, mutta erityisesti Percoaseman kohta on varsin kuiva. Lasketut kosteusprofiilit ennen ja jälkeen kuormitusten ovat käytännössä identtiset, eivätkä kosteusolosuhteet tierakenteessa olleet muuttuneet kuormitusten aikana. Pumpputumiseen viittaavaa kosteuden nousua rakenteessa ylöspäin ei siis havaittu.



Kuva 45 Maatutkan MDI (moisture damage index) analyysitulokset Ranuan soratiekohteelta (Mt 18824) syksyltä 2016. Pystymittakaava on nanosekunti (ns), jossa yksi nanosekunti vastaa noin 60 mm paksuutta. Punaiset kohdat kuvaavat korkeampaa materiaalin kyllästysastetta. Keskimmäisessä ikkunassa on tilanne ennen kuormitusajoja ja alemmassa välittömästi viimeisen (30.) ajon jälkeen. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja keltaisella pystyviivalla.

4.3.7 Yhteenveto Ranuan soratiellä tehdyistä kokeista

- Dielektrisyys- ja huokosvedenpainemittaukset sekä MDI-analyysi eivät osoittaneet merkkejä kosteuden lisääntymisestä soratiellä, jonka tierakenteen paksuus oli noin 0,5 m.
- Ylitysten aikana kulutuskerroksen, jonka paksuus oli noin 0,1 m, alapinnan pystysuuntaiset maksimisiirtymät pysyivät samoilla tasoilla.
- Pysyviä pystysiirtymiä muodostui kahden 9-akselisen tukkirekan ylityksellä keskimäärin 0,06 mm/ylityskerta 300 m matkalla ja mittausanturin kohdalla noin 0,1 mm/ylityskerta.
- Todellisen kumulatiivisen pysyvän siirtymän perusteella pysyvä siirtymän kasvu hidastui ylityskertojen kasvaessa.
- Johtuen pitkästä kuivahkosta kaudesta ennen mittauspäivää tierakenne kesti kuormitusta selkeästi odotettua paremmin.

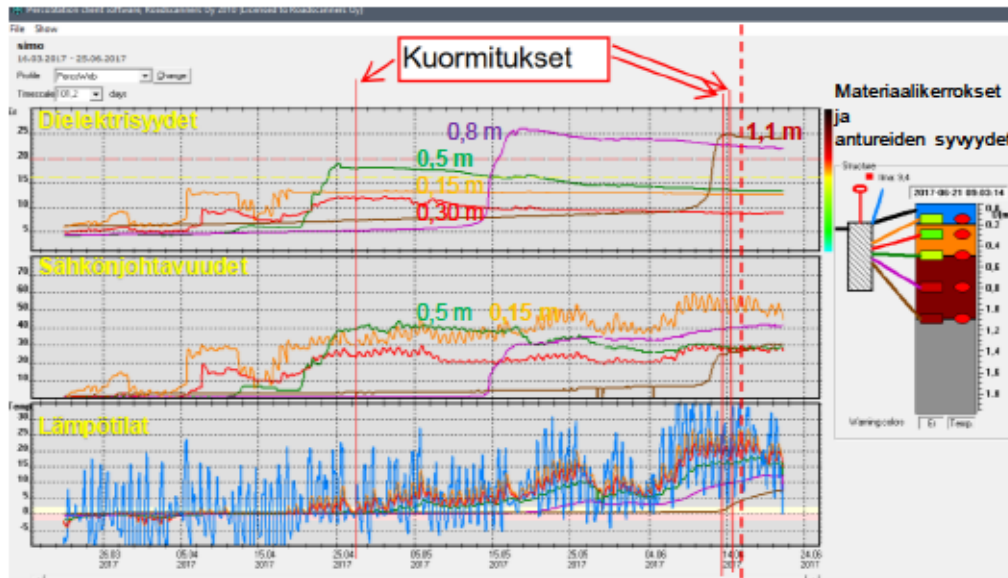
4.4 Mt 924 Simo – syksy 2016 ja kevät 2017

4.4.1 Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet

Simon kohteen Percoasema asennettiin juuri ennen syksyn 2016 mittauksia, jolloin pitkäaikaista seurantatietoa syksyltä 2016 ei ole saatavilla. Simon kohteella tien päällysteen paksuus oli noin 110 mm ja rakennepaksuus oli noin 0,6 m pohjamaan ollessa silttiä tai siltistä hiekkaa. Koska Simon kohde sijaitsi suhteellisen lähellä Ranuan kohdetta, tierakenteen voidaan olettaa olleen vuodenaikaan nähden suhteellisen kuiva syksyn 2016 mittauksen aikana.

Kuvassa 46 on esitetty mitatut dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvot ja lämpötilat maalliskuusta kesäkuuhun vuodelta 2017. Kuvasta nähdään tierakenteen sulaneen 0,5 m syvyyteen muutamia päiviä ennen 27.4.2017 tehtyjä mittauksia, kun 0,5 syvyyden dielektrisyysarvot ja sähkönjohtavuudet kohosivat selkeästi. Kuormitusta edeltävänä päivänä alueella oli lumimyräkkää, joka kinosi paikoitellen tielle lunta. Mittauspäivän aamuna tieltä poistettiin lunta ja sohjoa ennen kuormitusten aloittamista (kuva 47). Päivän mittaan päällysteen pinta oli lopulta kuivunut.

Kevään edistyessä tierakenteesta mitatut dielektrisyysarvot pienenevät hitaasti tarkoittaen vapaan veden vähenemistä. Juuri ennen 13. ja 14.6.2017 mittauksia 1,1 m syvyyden anturin dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvojen perusteella pohjamaa olisi sulanut. Lämpötilan perusteella pohjamaa oli varmasti sulanut pari päivää mittauksen jälkeen kuvassa 46 punaisen katkoviivan osoittamassa ajankohdassa. Molemmat kesäkuun 2017 mittauspäivät olivat aurinkoisia.



Kuva 46

Simon Percoasemalla mitatut tierakenteen ja pohjamaan dielektrisyysarvot, sähkönjohtavuudet ja lämpötilat keväällä 2017. Kuormituskokeiden ajankohdat on osoitettu punaisilla viivoilla.

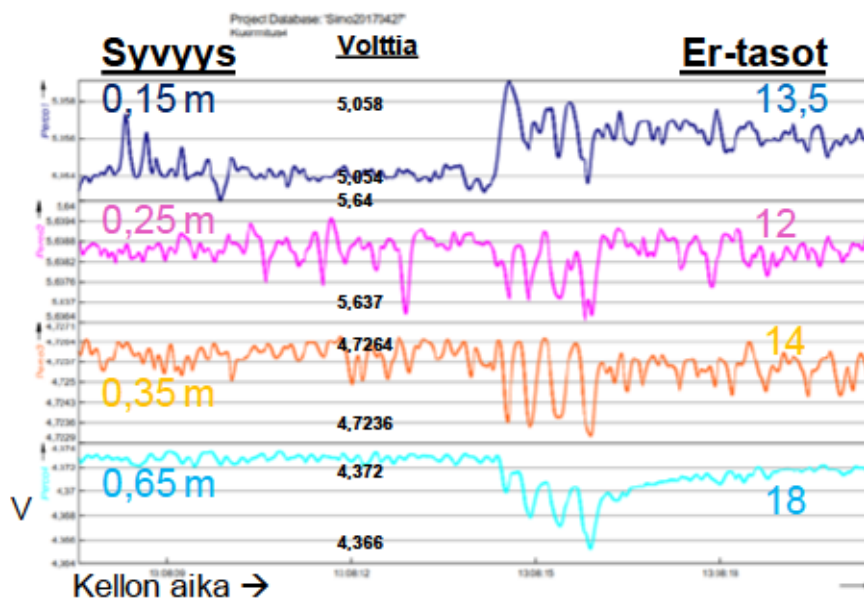


Kuva 47 Simon kohde 27.4.2017 klo 10:30 (vasen) ja klo 14 (oikea). Kuormitukset tehtiin klo 11:30-15.

4.4.2 Dielektrisyysmittaukset

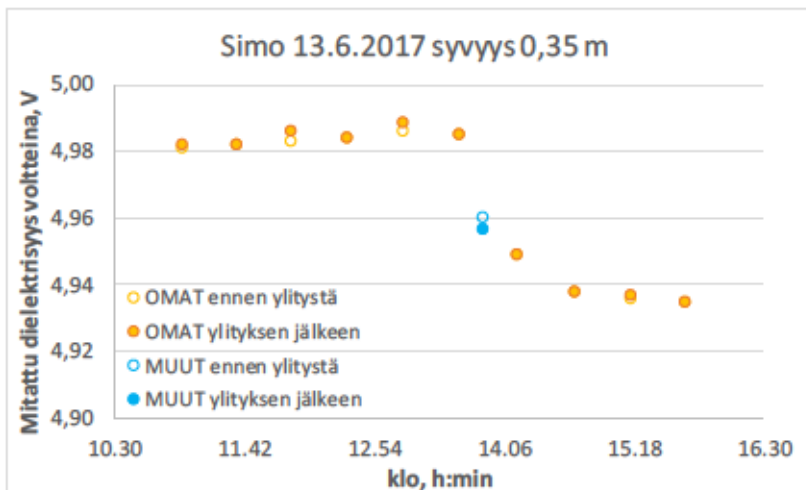
Dielektrisyttä mitattiin 0,15 m, 0,25 m, 0,45 m ja 0,65 m syvyyksiltä. Syksyllä 2016 kuormitusten tapahtuessa vain kaksi päivää asennuksen jälkeen dielektrisyysantureissa havaittiin ensimmäisillä mittauksilla vain pientä muutosta, joka johtunee materiaalin tiivistymisestä antureiden ympärillä.

Kevään ensimmäisessä mittauksessa 27.4.2017 dielektrisyysarvoissa ei havaittu muutoksia eri ylitysten välillä. Kuvassa 48 on esitetty esimerkki yhden rekan ylityksen aikana mitatuista dielektrisyysistä. Siinä nähdään 0,65 m syvyydessä mittausvasteen poikkeavan muista syvyyksistä dielektrisyys hieman kasvaessa telien ylitysten kohdalla, mutta palautuen lopulta lähtötasolle ennen seuraavaa ylitystä. Syvyydellä 0,65 m kerros on ollut lähes vedellä kyllästynyt dielektrisyysarvon ollessa noin 18 eli suurempi kuin kriittinen raja-arvo 16. Kuvasta nähdään, että hetkelliset muutokset dielektrisyysissä erottuivat erittäin heikosti lukuun ottamatta 0,65 m syvyyden anturia.



Kuva 48 Simon kohteella 27.4.2017 mitatut dielektrisyysvasteet voltteina kuormitusajoneuvon neljännessä ylityksestä. Volttiarvon pienentyessä dielektrisyys kasvaa.

Kuormituspäivänä 13.6.2017 tukkirekkojen akselit näkyivät lähinnä 0,15 m syvyydellä olleesta anturista mitatuissa vasteissa. Kuitenkin 0,35 m syvyydellä olleesta anturista mitattiin suurin päivän aikana tapahtunut muutos dielektrisyiden suurentuessa alle 0,25 yksikköä (0,045 V). Kuvasta 49 nähdään, että muutos tapahtui pääosin kuuden- ja seitsemännän oman kuormitusajoneuvon välissä, jolloin vain yksi muu raskas ajoneuvo ajoi kaistalla aiheuttamatta kuitenkaan kyseistä muutosta. Kuvassa 49 on myös esitetty omien kuormitusajoneuvojen sekä yhden muun raskaan ajoneuvon ylitysten aiheuttamat muutokset dielektrisydessä syvyydellä 0,35 m. Yhden ylityksen aiheuttama dielektrisyysmuutos oli hyvin pieni.

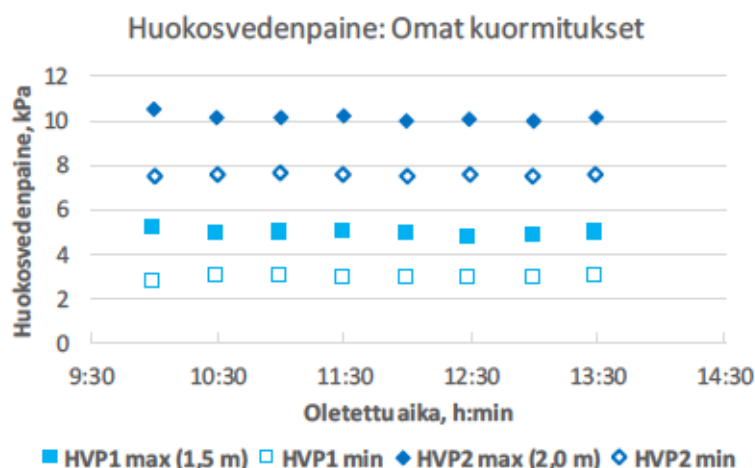


Kuva 49 Simon kohteella 13.6.2017 mitatut dielektrisyysvasteiden muutokset voltteina omien kuormitusajoneuvojen ja yhden muun raskaan ajoneuvon ylityksistä. Volttiarvon pienentyessä dielektrisyys kasvaa.

Seuraavana päivänä 14.6.2017 tukkirekkojen akselit näkyivät edelleen lähinnä 0,15 m syvyydellä olleesta sondista mitatuissa vasteissa. Tosin muutosta dielektrisyystasoissa ei havaittu päivän aikana eikä myöskään muutoksia mittausvasteissa ylitysten välillä.

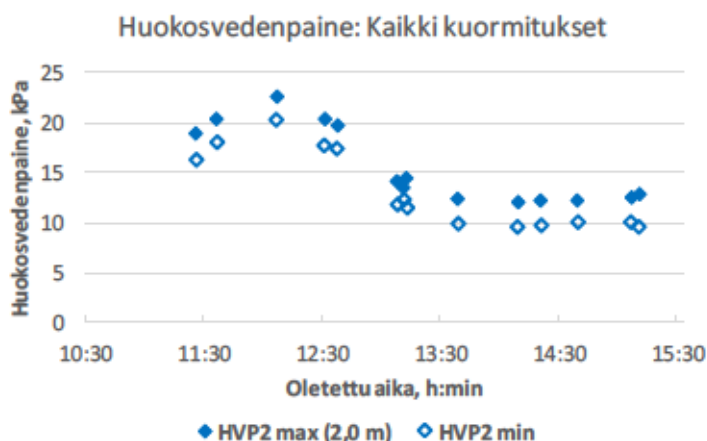
4.4.3 Huokosvedenpaineen mittaukset

Kuvassa 50 on esitetty rekan ylityksillä 13.10.2016 mitatut suurimmat (HVP max) ja pienimmät (HVP min) huokosvedenpaineet 1,5 m ja 2,0 m syvyyteen silttiin tai silttiiseen hiekkaan asennetuista antureista. Huokosvedenpaineiden muutosten suuruudet pienenevät hieman ensimmäisten ylitysten jälkeen. Huokosvedenpaineet alenivat hieman ensimmäisten ylitysten jälkeen pysyen sen jälkeen vakiotasolla.



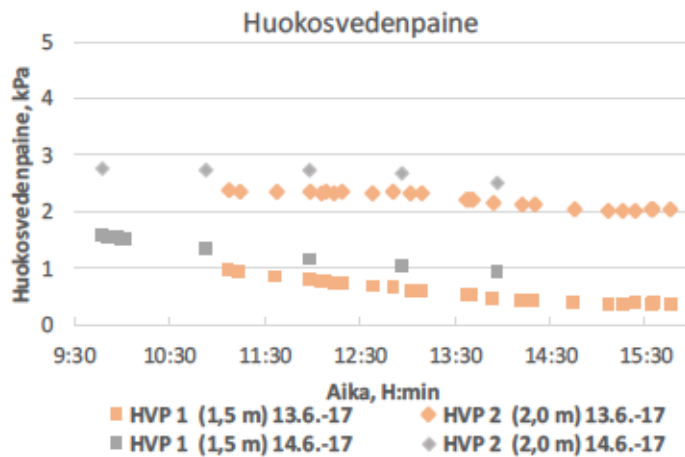
Kuva 50 Simon kohteella 13.10.2016 omien kuormitusajoneuvojen ylitysten aikana mitatut suurimmat ja pienimmät huokosvedenpaineet 1,5 m ja 2,0 m syvyyksiltä.

Kun 27.4.2017 mitattiin huokosvedenpaineita, tierakenne oli sulanut yläosastaan reilut 0,5 m. Kuvassa 51 on esitetty kuormitusajoneuvon ylityksillä 27.4. mitatut suurimmat (HVP max) ja pienimmät (HVP min) huokosvedenpaineet 2,0 m syvyyteen asennetusta anturista. Kuormitusten alkaessa huokosvedenpaine kasvoi aluksi noin 5 kPa, jonka jälkeen huokosvedenpaine pieneni päätyen noin tasolle 10 kPa. Tämä huokosvedenpaineen käyttäytyminen saattaa johtua siitä, että osittain jäätyneen tierakenteen alla huokosvedenpaine ei pääse aluksi purkautumaan, jolloin huokosvedenpaine kasvaa. Huokosvedenpaineen kasvaessa vesi löytää lopulta purkautumistien, jonka jälkeen mitattu huokosvedenpaine pienenee. Syvyydeltä 1,5 m mitattiin arvoja 0,5–3 kPa:n välillä, mutta anturin ympäristö on saattanut olla jäässä.



Kuva 51 Simon kohteella 27.4.2017 kaikkien mitattujen ajoneuvojen ylitysten aikana mitatut suurimmat ja pienimmät huokosvedenpaineet 2,0 m syvyydeltä.

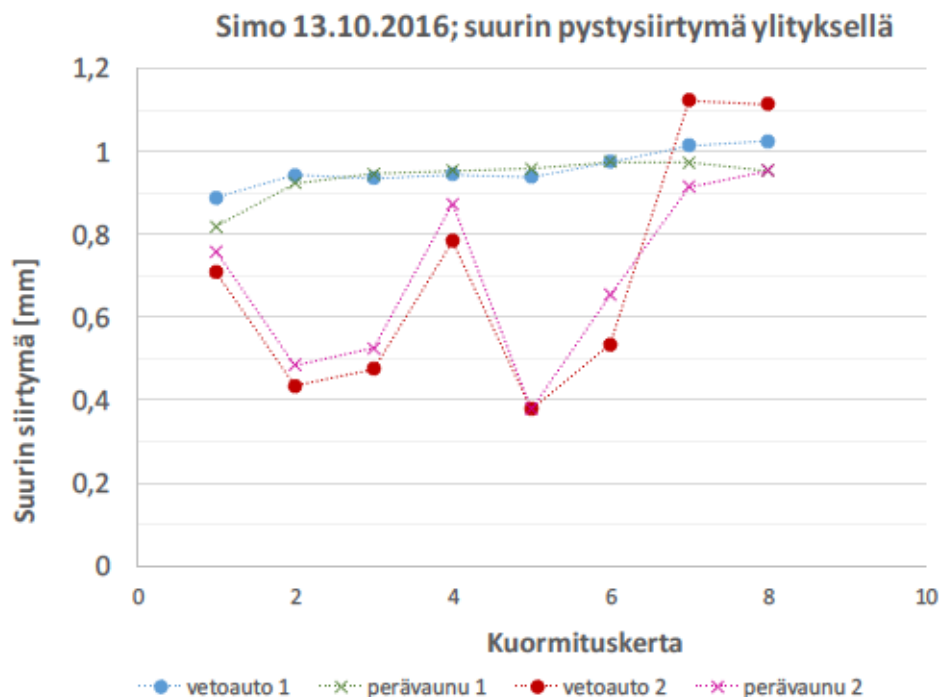
Kesäkuussa 13. ja 14.6.2017 mitatuissa huokosvedenpaineissa ei tapahtunut juurikaan muutoksia. Kuvassa 52 on esitetty kyseisinä päivinä mitatut huokosvedenpaineet ennen kuin mitattu ajoneuvo ylitti mittauspisteen. Kumpanakin päivänä huokosvedenpaine hieman pienentyy päivän aikana, mutta mittausten välisenä yönä huokosvedenpaine oli kohonnut. Syvyydellä 2,0 m huokosvedenpaine oli 2,0–2,8 kPa molempina mittauspäivinä. Syvyydellä 1,5 m havaittiin pieniä muutoksia, kun aamulla 13.6. huokosvedenpaine oli 1,0 kPa ja se pieneni päivän aikana tasolle 0,4 kPa. Kuitenkin seuraavana aamuna sen arvo oli 1,6 kPa, josta se laski päivän aikana arvoon 1,0 kPa. Syksyllä 2016 pohjavedenpinnan tason oli arvioitu olevan 1,7 m syvyydessä, jolloin 1,5 m syvyydessä oleva anturi oli pohjavedenpinnan yläpuolella.



Kuva 52 Simon kohteella 13. ja 14.6.2017 mitatut huokosvedenpaineet ennen mitatun ajoneuvon ylitystä. 14.6.2017 mukana muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta vain oman kuormitusajoneuvon ylitykset.

4.4.4 Päällysteen alapinnan pystysiirtymät

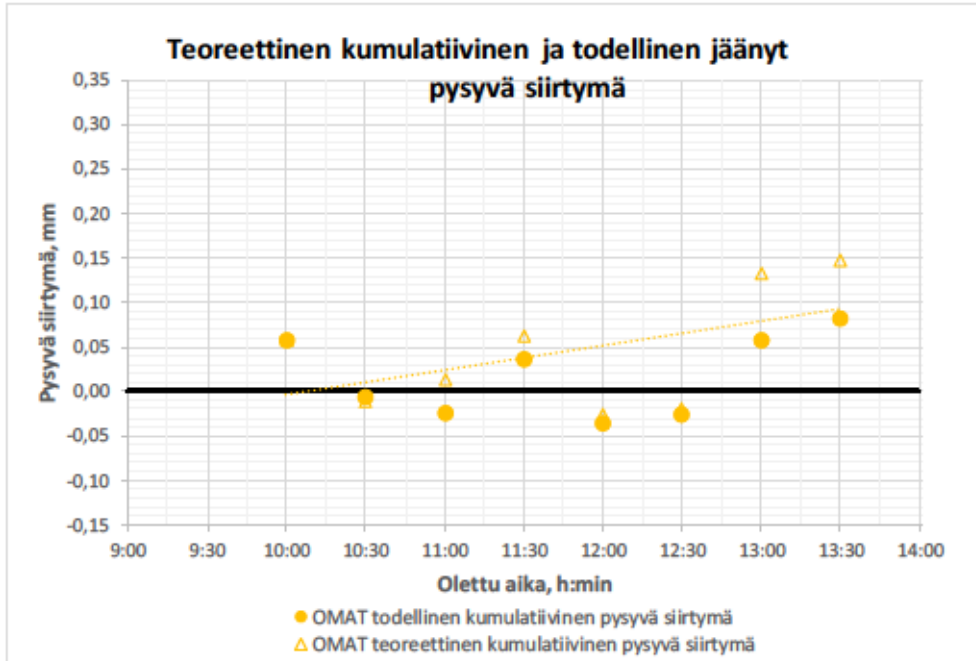
Syksyllä 2016 mitattiin vain omia kuormitusajoneuvojen aiheuttamaa noin 110 mm paksuisen päällysteen alapinnan siirtymää noin 0,6 m paksuisen tierakenteeseen asennetusta toisesta pystysiirtymäanturista 1, koska pystysiirtymäanturi 2 oli mitta-alueensa reunassa. Kuvassa 53 on esitetty peräkkäin ajaneiden kuormitusajoneuvojen vetoauton ja perävaunun aiheuttamat maksimisiirtymät ylityksillä. Ensimmäisen rekan aiheuttamat maksimisiirtymät olivat pääosin 0,9–1,0 mm. Toisen rekan maksimisiirtymät vaihtelivat huomattavasti johtuen suuremmasta ajolinjan vaihtelusta ensimmäisen rekan perässä. Suurin maksimisiirtymä 1,1 mm mitattiin toisen rekan vetoauton kahdella viimeisellä ylityksellä.



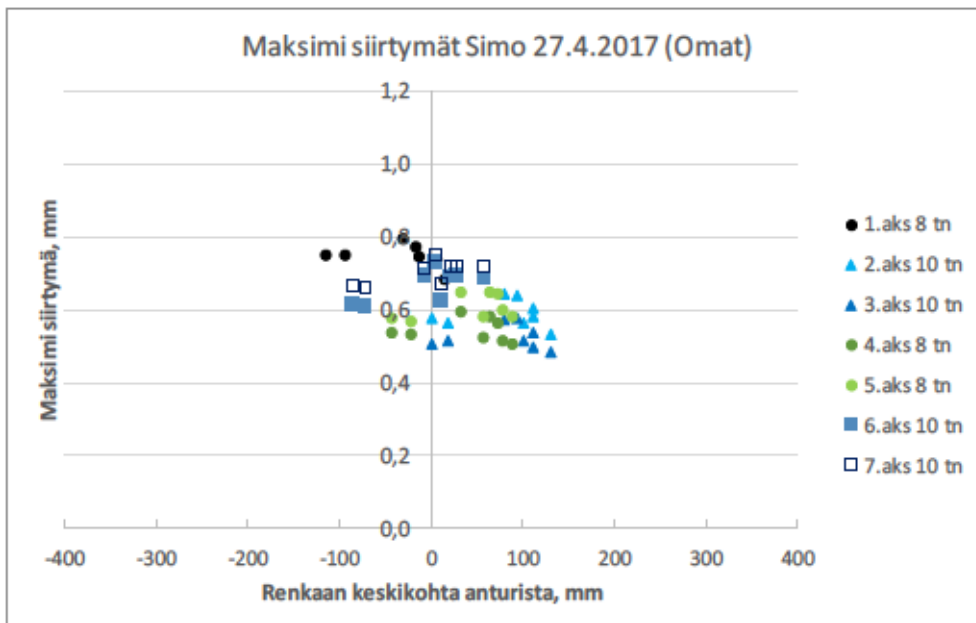
Kuva 53 Simon kohteella 13.10.2016 mitatut kuormitusajoneuvojen vetoauton ja perävaunun aiheuttamat maksimisiirtymät ylityksillä.

Kuvassa 54 on esitetty 13.10.2016 mittauksista määritetyt päällysteen alapinnan teoreettiset ja todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät omista kuormitusajoneuvoista. Kumulatiivissa pysyvissä siirtymissä ei havaittu selkeätä trendiä. Verratessa kuvan 53 vetoauton 2 ja perävaunun 2 eli toisen ajaneen rekan maksimisiirtymiä kuvan 54 pysyviin siirtymiin havaitaan, että todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä pienenee sen maksisiirtymien jäädessä 0,5 mm suuruusluokkaan, mikä tarkoittaa, että jälkimmäisen rekka on ajanut tällöin selkeästi eri ajolinjaa kuin ensimmäinen rekka. Koska ensimmäisenä ajaneen rekan maksimisiirtymät olivat tasaisesti samaa suuruusluokkaa, niin seuranneen rekan ajolinjalla on ollut huomattavasti suurempi vaikutus pysyvään siirtymään.

Kuvassa 55 on esitetty Simon kohteella 27.4.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät suhteessa renkaan keskikohdan sijaintiin anturista. Suurin mitattu maksimisiirtymä oli 0,8 mm, joka aiheutui 8 tn painoisella yksittäispyöräisellä ohjausakselilla. Lähes sama maksimisiirtymä mitattiin paripyörillä varustetusta 10 tn painoisesta viimeisen eli seitsemännen akselin ylityksestä.

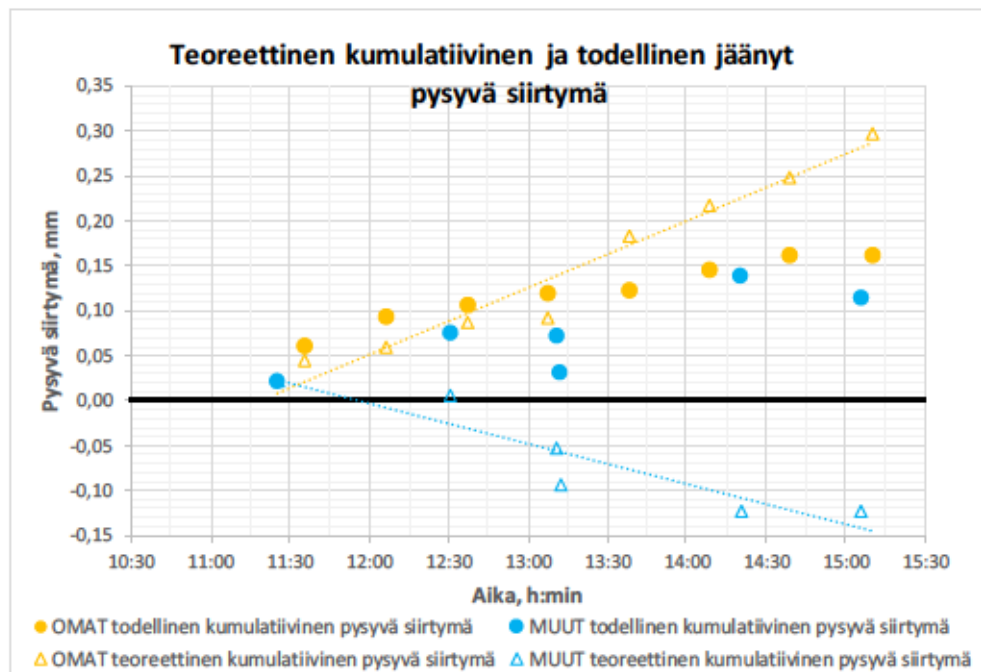


Kuva 54 Simon kohteella, jossa päällysteen paksuus oli noin 110 mm, 13.10.2016 mitatut kuormitusajoneuvojen ylitysten jälkeiset pysyvät siirtymät.



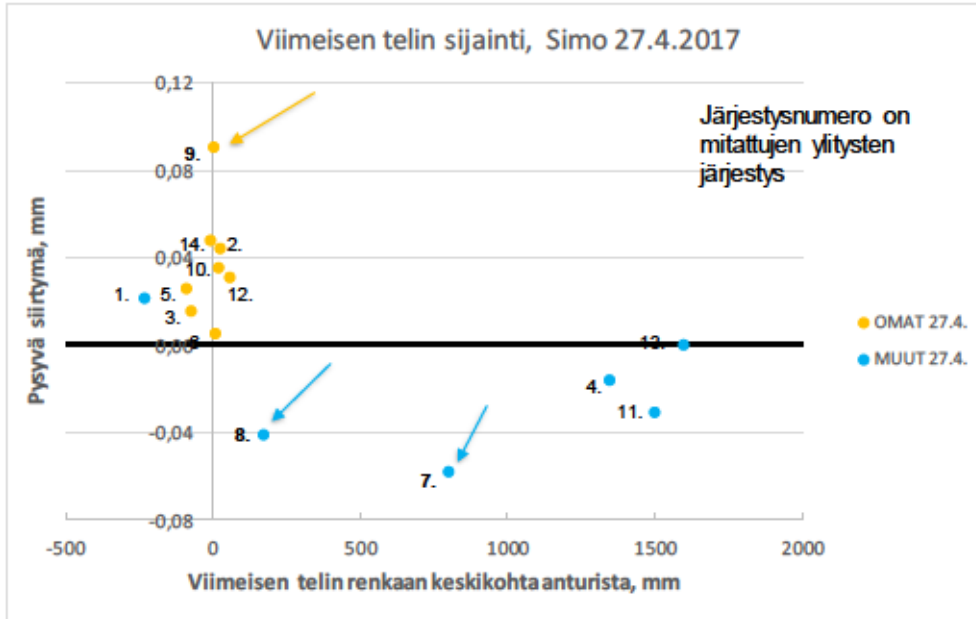
Kuva 55 Simon kohteella 27.4.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät esitettynä akseleittain suhteessa renkaan keskikohtaan sijaintiin anturista.

Kuvassa 56 on esitetty 27.4.2017 mittauksista määritetyt 110 mm paksun päällysteen alapinnan teoreettiset ja todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät omista kuormitusajoneuvoista ja muista mitatuista ajoneuvoista. Todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä kasvaa hitaasti. Omat kuormitusajoneuvot aiheuttavat pysyvä siirtymää, mikä näkyy selkeästi teoreettisessa kumulatiivisessa pysyvässä siirtymässä lähes lineaarisena trendinä. Tällöin raskaat ajoneuvot aiheuttaisivat kulkiessaan samaa ajolinjaa pysyviä siirtymiä tierakenteen sulaessa kelirikkoaikana ohutpäällysteisellä teillä, päällysteen paksuuden ollessa alle 100 mm. Muut ajoneuvot kulkivat pääasiallisesti uran ulkopuolella eri ajolinjoilla, mikä näkyy selkeästi kuvassa 57. Tämän vuoksi muiden mitattujen ajoneuvojen ylitykset lähinnä pienentävät pysyvää siirtymää, mikä näkyy muiden ajoneuvojen teoreettisen pysyvän siirtymän trendissä.



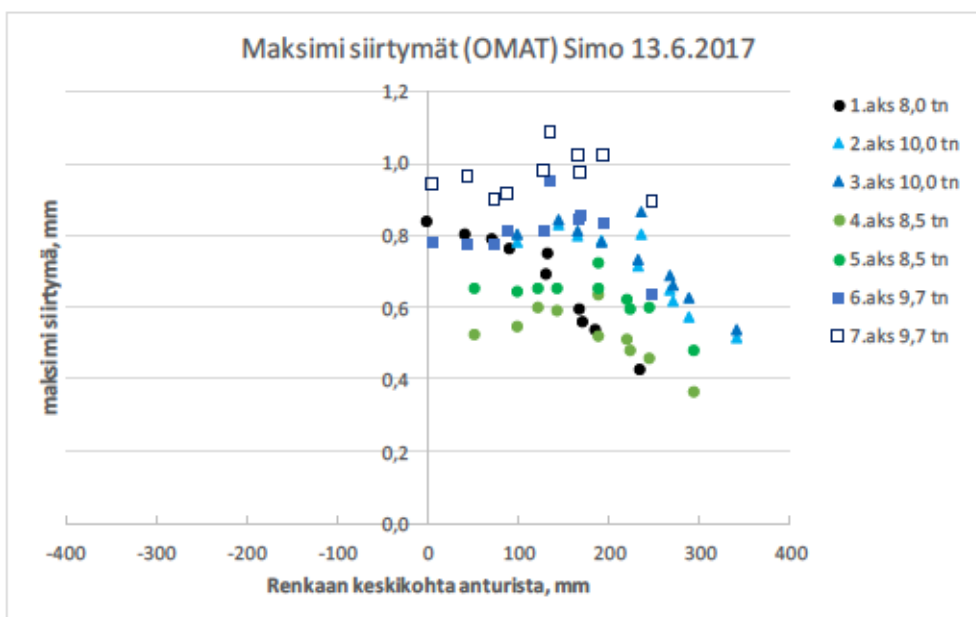
Kuva 56 Simon kohteella 27.4.2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten jälkeiset pysyvät siirtymät. Kohteella tierakenteen paksuus oli noin 0,6 m ja päällysteen 110 mm.

Kuvassa 57 on esitetty mitattujen ajoneuvojen aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteutettuna niiden ajolinjoihin. Ajolinja on määritetty viimeisestä telistä. Omista kuormitusajoneuvoista tiedetyn rengasleveyden perusteella määritettiin viimeisen telin renkaiden keskikohta suhteessa siirtymäanturiin. Koska muista mitatuista ajoneuvoista ei tiedetty rengasleveyttä, on niiden oletettu olevan paripyöriä ja niillä kaikilla on käytetty samaa oletusleveyttä. Kuvasta nähdään pysyviä siirtymiä muodostuvan, kun telin viimeinen rengas kulkee anturin yläpuolelta ja pysyvien siirtymien olevan negatiivisia ajoneuvon kulkiessa sopivalta etäisyydeltä anturin ohii. Kuvasta havaitaan myös, että kuormitusajoneuvon aiheuttama suurin pysyvä siirtymä mitattiin ylityksellä numero 9, kun kaksi edellistä ylitystä olivat aiheuttaneet negatiivisen pysyvän siirtymän eli palauttaneet uran kohdalla tien pintaa ylöspäin.



Kuva 57 Simon kohteella 27.4. mitattujen ajoneuvojen ylitysten aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteessa ajoneuvon viimeisen telin sivusijaintiin. Muiden ajoneuvojen sijainti ei ole tarkka, koska niissä on käytetty pyörän renkaalle oletuslevyettä.

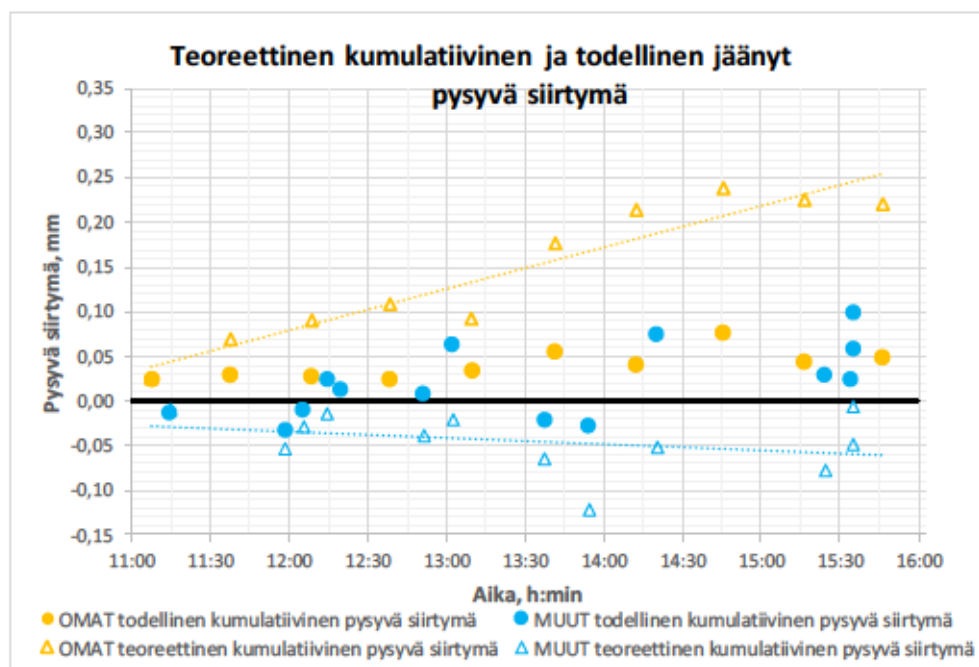
Kuvassa 58 on esitetty Simon kohteella 13.6.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät suhteessa renkaan keskikohtaan sijaintiin siirtymäanturista. Suurin mitattu maksimisiirtymä oli 1,05 mm, joka aiheutui paripyörillä varustetusta 10 tn painoisesta viimeisen eli seitsemännen akselin ylityksestä. Kuvasta 58 havaitaan renkaan keskikohtaan olleen ylityksen aikana hieman anturilinjasta tien keskikohtaa päin ja maksimisiirtymien pienentyvän renkaan keskikohtaan siirtyessä riittävän etäälle siirtymäanturista.



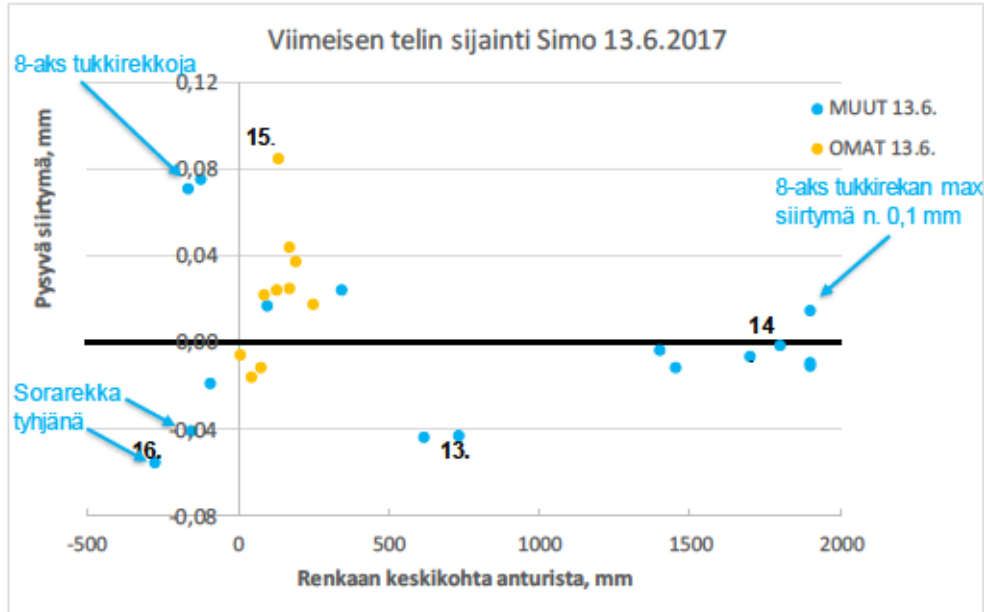
Kuva 58 Simon kohteella 13.6.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät esitettynä akseleittain suhteessa renkaan keskikohtaan sijaintiin anturista.

Kuvassa 59 on esitetty 13.6.2017 mittauksista määritetyt päällysteen alapinnan teoreettiset ja todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät omista kuormitusajoneuvoista ja muista mitatuista ajoneuvoista silttisellä tai silttisellä hiekalla sijainneesta noin 0,6 m paksuisesta tierakenteesta. Muita mitattuja ajoneuvoja oli puolitoistakertainen määrä omiin kuormitusajoneuvojen ylityksiin nähden. Todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä kasvaa hitaasti tai pysyy lähes samana. Omat kuormitusajoneuvot aiheuttavat pääosin pysyvä siirtymää, mikä näkyy selkeästi teoreettisessa kumulatiivisessa pysyvässä siirtymässä lähes lineaarisena trendinä. Muiden mitattujen ajoneuvojen ylitykset lähinnä pienentävät pysyvää siirtymää, mikä näkyy muiden ajoneuvojen teoreettisessa kumulatiivisessa pysyvässä siirtymässä.

Kuvassa 60 on esitetty mitattujen ajoneuvojen aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteutettuna niiden ajolinjoihin. Ajolinjat on määritetty viimeisestä telistä. Omista kuormitusajoneuvoista tiedetyn rengasleveyden perusteella määritettiin viimeisen telin renkaiden keskikohta suhteessa siirtymäanturiin. Koska muista mitatuista ajoneuvoista ei tiedetty rengasleveyttä, on niiden oletettu olevan paripyöriä ja niillä on käytetty samaa oletusleveyttä. Kuvasta nähdään pysyviä siirtymiä muodostuvan, kun telin viimeinen rengas kulkee anturin yläpuolelta ja pysyvien siirtymien olevan negatiivisia ajoneuvon kulkiessa sopivalta etäisyydeltä anturin ohi. Kuvasta havaitaan, että ajolinjat ja niiden järjestys vaikuttavat mitattuun pysyvään siirtymään kuten 27.4.206 mittauksissakin. Kuormitusajoneuvon aiheuttama suurin pysyvä siirtymä mitattiin, kun edellinen ylitys oli aiheuttanut negatiivisen pysyvän siirtymän. Tyhjänä ajokaistalla kulkeneen sorarekan perävaunussa ei ollut paripyöriä.

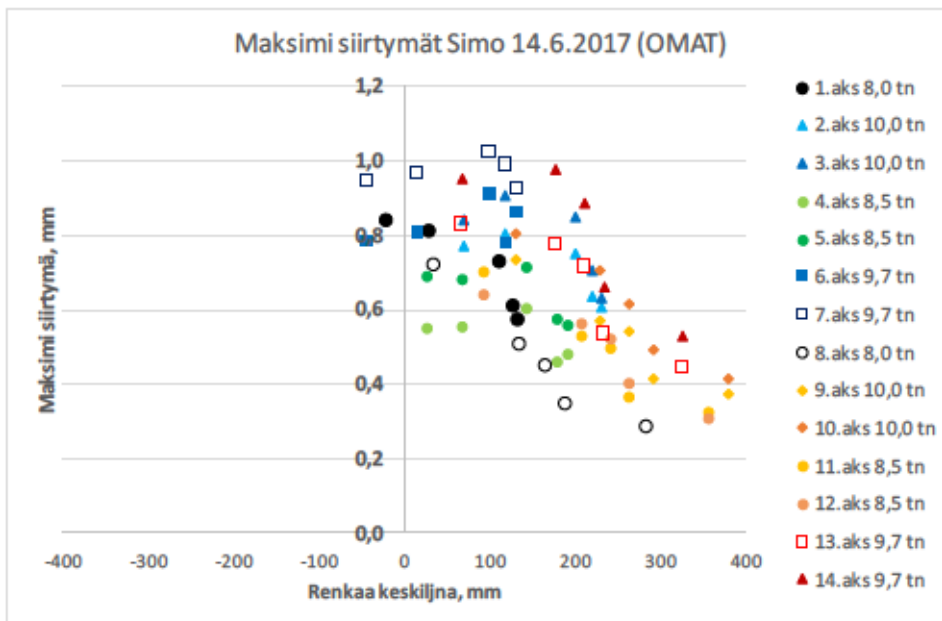


Kuva 59 Simon kohteella 13.6.2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten jälkeiset pysyvät siirtymät.



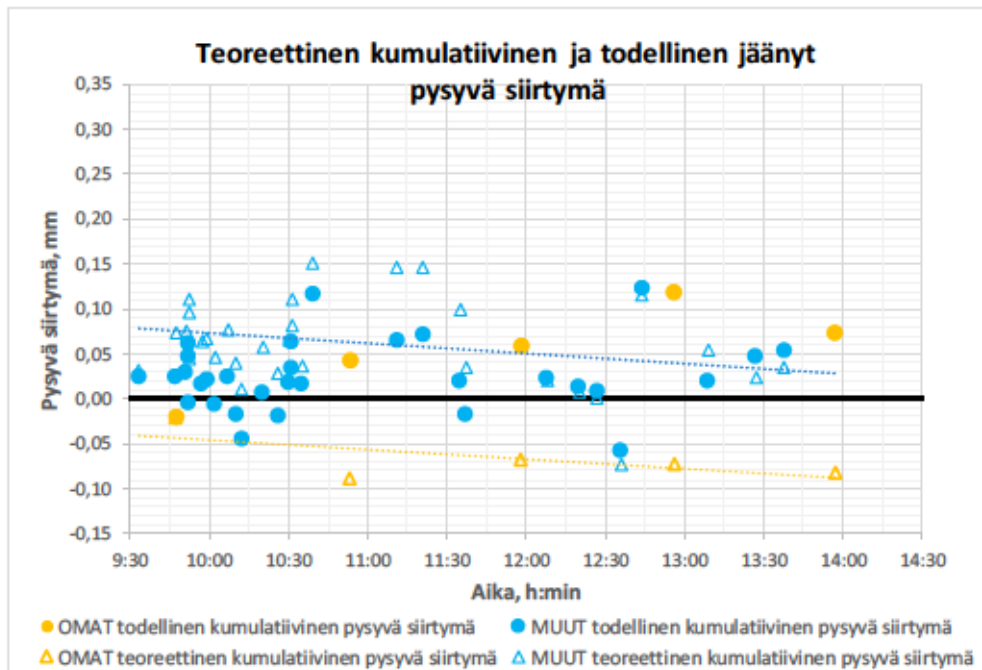
Kuva 60 Simon kohteella 13.6.2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten pysyvät siirtymät suhteessa ajoneuvon viimeisen telin sijaintiin. Muiden ajoneuvojen sijainti ei ole tarkka, koska niissä on käytetty pyörän renkaalle oletusleveyttä.

Kuvassa 61 on esitetty Simon kohteella 14.6.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät suhteessa renkaan keskikohdan sijaintiin siirtymäanturista. Suurin mitattu maksimisiirtymä oli 1,0 mm, joka aiheutui paripyörillä varustetusta 10 tn painoisesta ensimmäisen rekan viimeisen eli seitsemännen akselin ylityksestä. Kuvasta 61 havaitaan lähes kaikilla renkaan keskikohdan olleen ylitysten aikana jälleen hieman anturilinjasta tien keskikohtaa päin ja maksimisiirtymien pienentyvän renkaan keskikohdan siirtyessä riittävän etäälle siirtymäanturista.



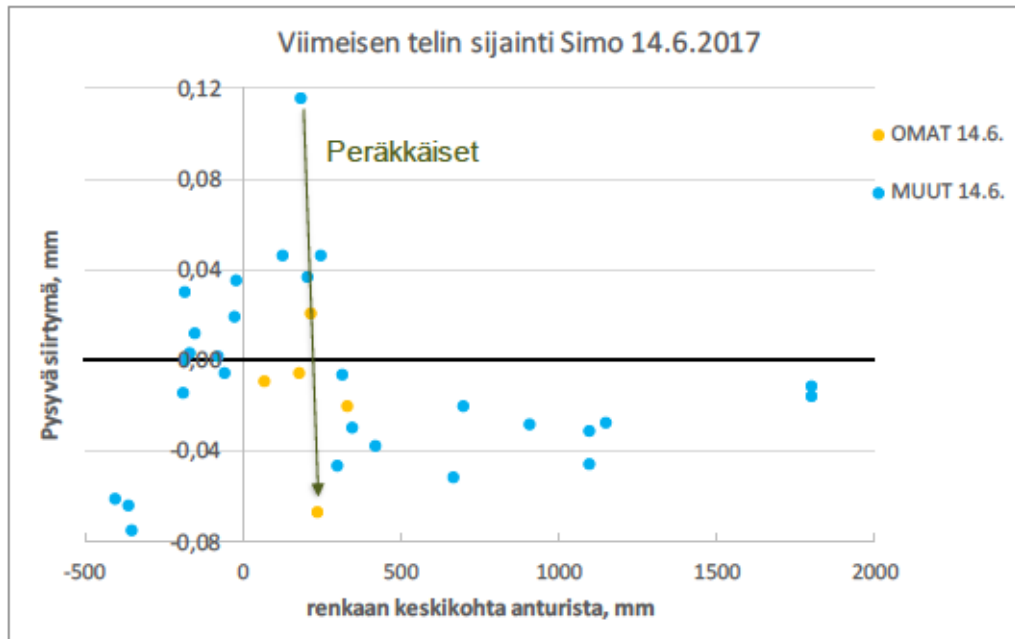
Kuva 61 Simon kohteella 14.6.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät esitettynä akseleittain suhteessa renkaan keskikohdan sijaintiin anturista.

Kuvassa 62 on esitetty 14.6.2017 mittauksista määritetyt päällysteen alapinnan teoreettiset ja todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät omista kuormitusajoneuvoista ja muista mitatuista ajoneuvoista. Mittausaikana todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä pysyi lähes samana. Omat kuormitusajoneuvot kulkivat peräkkäin ja niitä käsiteltiin yhtenä ylityksenä. Kuvasta nähdään muiden mitattujen ajoneuvojen, joista suuri osa oli tukkirekkoja, määrän olleen moninkertainen omien kuormitusajoneuvojen ylityksiin nähden ja täten pysyvään siirtymään on ennen kaikkea vaikuttanut muut ajoneuvot. Kuvan perusteella omat kuormitusajoneuvot eivät aiheuttaneet pysyvää siirtymää vaan ehkä enemmänkin palauttaneet pysyvää siirtymää. Syynä tähän on, että pääosa omista kuormitusajoneuvoista jälkimmäinen (kellertävät ja punertavat merkit kuvassa 61) on kulkenut ajolinjaa, joka on yli 200 mm siirtymäanturista tien keskelle päin.



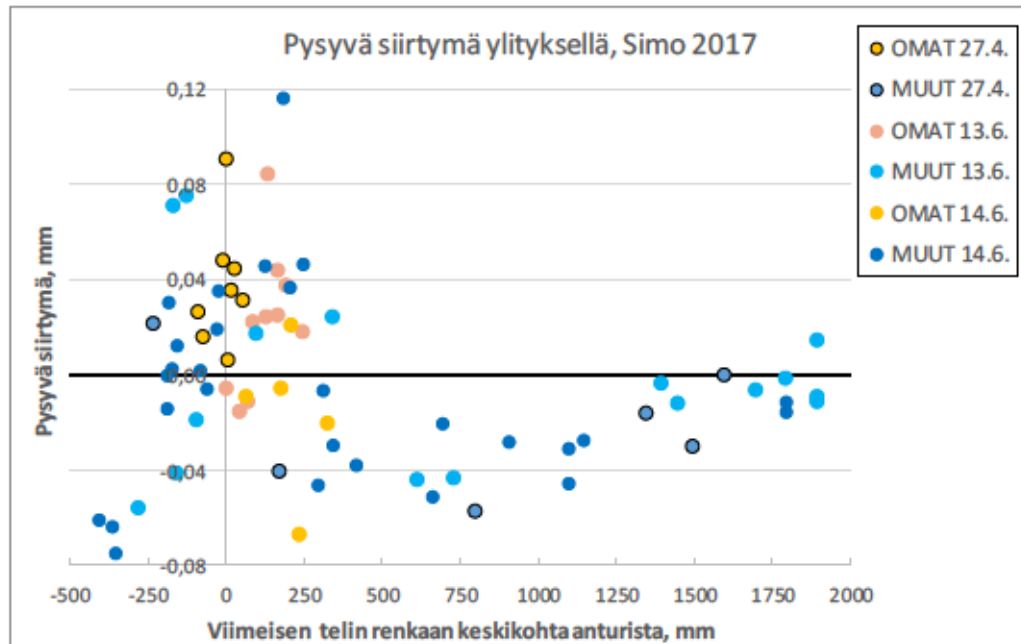
Kuva 62 Simossa 14.6.2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten jälkeiset pysyvät siirtymät.

Kuvassa 63 on esitetty 14.6.2017 mitattujen ajoneuvojen aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteutettuna niiden ajolinjoihin. Ajolinjat on määritetty viimeisestä telistä. Kuvasta nähdään pysyviä siirtymiä pääosin muodostuvan, kun viimeisen telin renkaat kulkevat siirtymäanturin yläpuolelta ja pysyvien siirtymien olevan negatiivisia ajoneuvon kulkiessa sopivalta etäisyydeltä anturin ohi. Ajolinjat ja niiden järjestys vaikuttavat mitattuun pysyvään siirtymään kuten aiemmin keväällä 2017. Kuvassa on osoitettu nuolella kaksi peräkkäistä ylitystä, jolloin oma kuormitusajoneuvo aiheuttaa suuren tien pinnan palautuman, kun edellisellä ylityksellä muun ajoneuvon ylitys oli aiheuttanut suuren pysyvän siirtymän. Myös mitattujen ajoneuvojen jäljessä kulkevat henkilöautot ovat voineet vaikuttaneet pysyviin siirtymiin ja yhdestä tapauksesta on esimerkki kappaleessa 5.2.1.



Kuva 63 Simon kohteella 14.6.2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten pysyvät siirtymät suhteessa ajoneuvon viimeisen telin sijaintiin. Muiden ajoneuvojen sijainti ei ole tarkka, koska niissä on käytetty pyörän renkaalle oletusleveyttä.

Kuvassa 64 on esitetty kootusti keväällä 2017 mitattujen ajoneuvojen aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteutettuna niiden ajolinjoihin. Ajolinjat on määritetty viimeisestä telistä. Omien kuormitusajoneuvojen tiedettyjen rengasleveyksien perusteella ne määritettiin viimeisten telien renkaiden keskikohta suhteessa anturiin. Koska muista mitatuista ajoneuvoista ei tiedetty rengasleveyttä, on niiden oletettu olevan paripyöriä ja niillä kaikilla on käytetty samaa oletusleveyttä. Kuvasta nähdään selkeästi ajolinjan sijainti, jolla raskas ajoneuvo aiheuttaa urassa pysyvän siirtymän palautumista eli urasyvyyden pienenemistä. Kuvasta 64 nähdään muiden ajoneuvojen palauttavan pysyvää siirtymää niiden kulkiessa jopa kahden metrin päässä anturista. Tämä saattaa tarkoittaa, että vastakkaiseen suuntaan kulkevat ajoneuvot tasoittavat ajokaistojen sisempiä pyöräuria, jonka vuoksi ajokaistojen sisemmät pyöräurat ovat normaalisti matalampia ja loivempia kuin ulkourat.

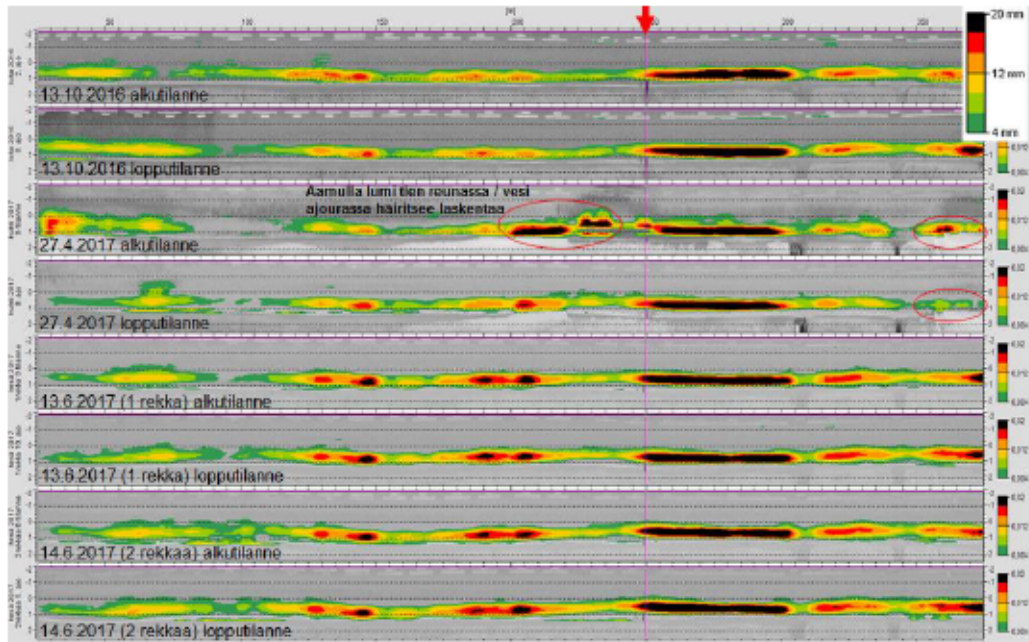


Kuva 64 Simon kohteella 2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten pysyvät siirtymät suhteessa ajoneuvon viimeisen telin sijaintiin. Muiden ajoneuvojen sijainti ei ole tarkka, koska niissä on käytetty pyörän renkaalle oletusveyyttä.

4.4.5 Urautuminen laserkeilauksella

Kuvassa 65 on esitetty RDSV-urasyvyyskartat koko Mt 924:n mittausjaksolta, jossa päällysteen paksuus oli noin 110 mm ja tierakenteen paksuus 0,6 m silttiä tai silttistä hiekkaa olevalla pohjamaalla. Kuvassa on esitetty urasyvyyskartat ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen neljänä eri ajankohtana: 13.10.2016 (2 rekkaa), 27.4.2017 (1 rekka), 13.6.2017 (1 rekka) ja 14.6.2017 (2 rekkaa). Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä. Percoaseman ja mittausantureiden sijainti on merkitty punaisella nuolella.

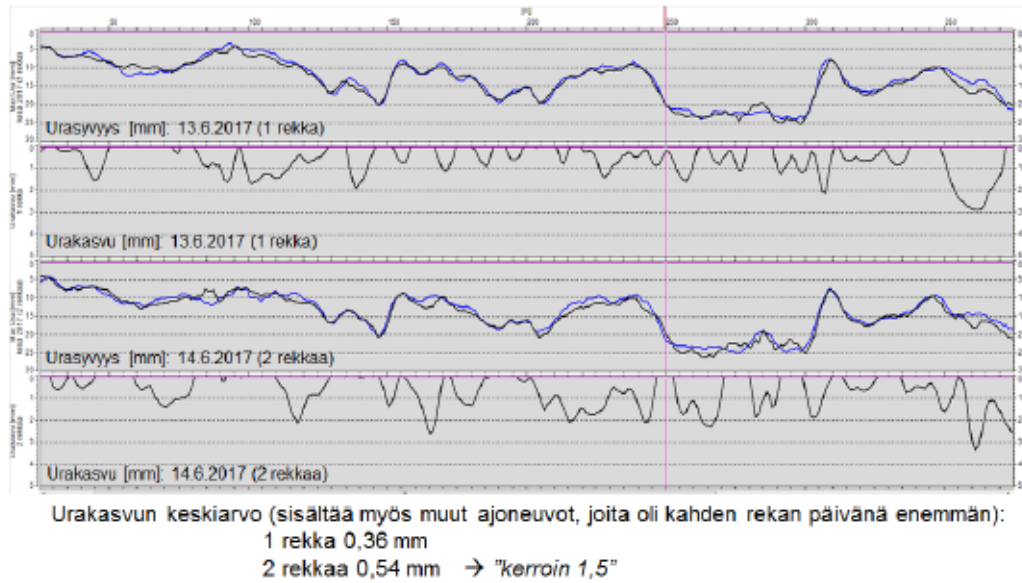
Urakartoista nähdään, että urasyvyyden kasvua on paikoin tapahtunut erityisesti syksyn ja kevään tilanteiden välillä, mutta yksittäisen kuormituskerran alku- ja lopputilanteiden välillä eroja on vaikea visuaalisesti havaita. Huhtikuun 2017 tilanteessa laskentaa haittaa lisäksi alkutilanteessa tien reunassa ollut lumi ja ajourassa ollut vesi (kuva 47). Urakartoista nähdään lisäksi rekan sivusuuntaisen heijaamisen (warping) vaikutus urautumiseen. Warpingin takia tiehen on muodostunut melko tasaisin välein jaksottaisesti vaihtelevaa urautumista.



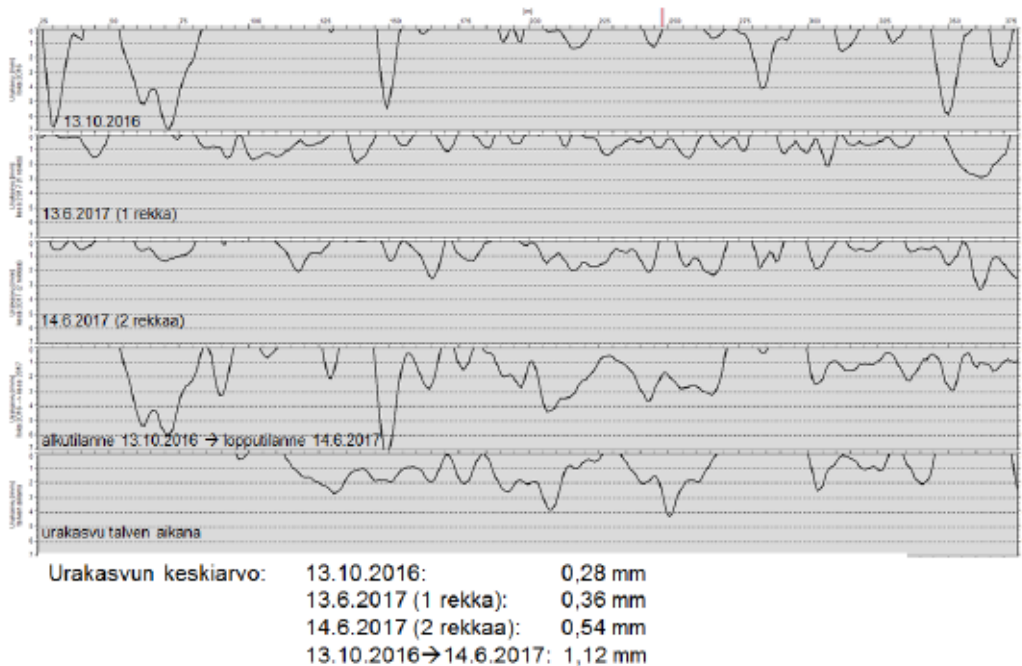
Kuva 65 RDSV-urasyvyyskartat Simon kohteelta (Mt 924). Kuvassa on esitetty urasyvyyskartat ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen neljänä eri ajankohtana. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissio-data päällysteestä. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella.

Kuvassa 66 on esitetty maksimiurasyvyudet ja urakasvut kesäkuussa 2017 yhdellä rekalla ja kahdella rekalla. Urasyvyyskuvaajissa tilanne ennen kuormitusajoja on merkitty sinisellä ja tilanne viimeisen ajon jälkeen mustalla. Urakasvun keskiarvo kuvassa esitetyllä noin 400 m matkalla yhden rekkan päivänä oli 0,36 mm ja kahden rekkan päivänä 0,54 mm, mistä saadaan "kertoimeksi" 1,5. On kuitenkin otettava huomioon, että urakasvulukemat sisältävät myös muut ajoneuvot, joita oli kahden rekkan päivänä selkeästi enemmän ja kumpanakin päivä enemmän kuin omia kuormitusajoneuvoja. Nämä muut rekat tasoittivat uria kulkiessaan eri ajolinjoilla kuin omat tilatut kuormitusajoneuvot, kuten aiemmin kappaleessa 4.4.4. on kuvattu ja kuvasta 64 on helppo huomata.

Kuvassa 67 on esitetty urakasvut 13.10.2016 (2 rekkaa), 13.6.2017 (1 rekka), 14.6.2017 (2 rekkaa), 13.10.2016 alkutilanteen ja 14.6.2017 lopputilanteen välinen erotus sekä urakasvu talven aikana. Jo edellä mainittujen urakasvujen lisäksi urakasvun keskiarvo 13.10.2016 testeissä oli 0,28 mm. Erotukseksi 13.10.2016 alkutilanteen ja 14.6.2017 lopputilanteen välille saadaan 1,12 mm, mikä eroaa hieman eri ajankohtina saatujen urakasvujen summasta. Koska urat eivät ole muodostuneet pelkästään mittauspäivinä, niin uran syvyyttä ovat pienentäneet todennäköisesti routanousun aiheuttamat muutokset ja muiden ajoneuvojen eri kohtiin osuneet ajolinjat sekä pitkäaikainen hidas palautuminen kuormituksista.



Kuva 66 Maksimiurasyvyudet ja urakasvut Simon kohteelta kesäkuussa 2017 yhdellä rekalla ja kahdella rekalla. Urasvyvyyskuvaajissa tilanne ennen kuormitusajoja on merkitty *sinisellä* ja tilanne viimeisen ajon jälkeen *mustalla*.

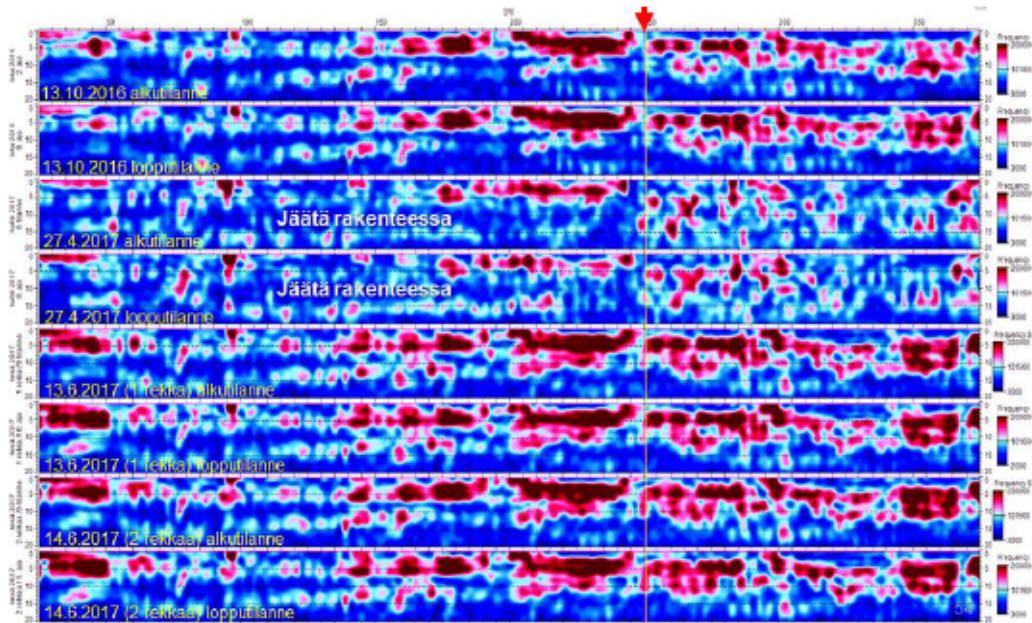


Kuva 67 Urakasvut Simon kohteelta 13.10.2016 (2 rekkaa), 13.6.2017 (1 rekka), 14.6.2017 (2 rekkaa), 13.10.2016 alkutilanteen ja 14.6.2017 lopputilanteen välinen erotus sekä urakasvu talven aikana

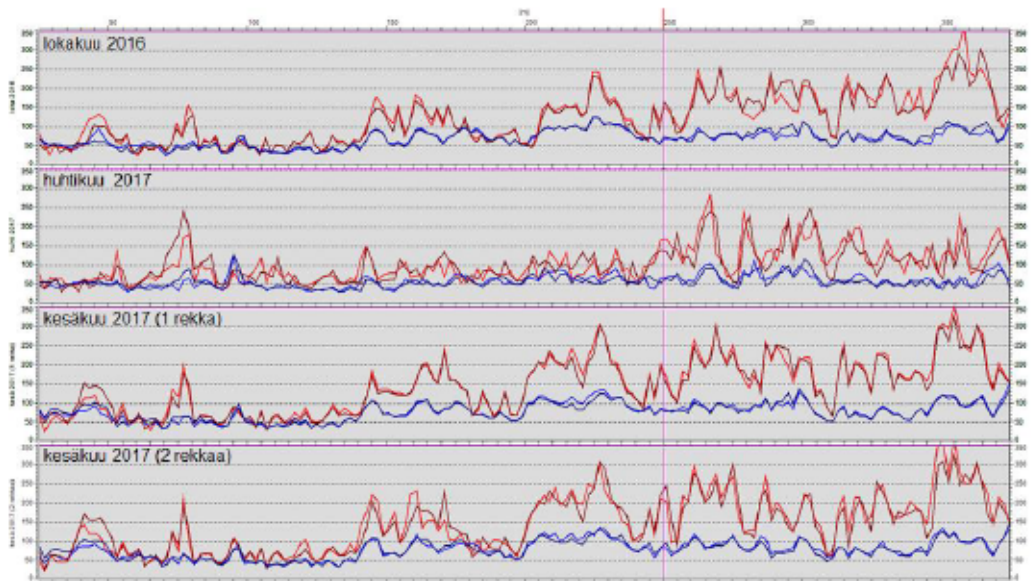
4.4.6 Kosteuden muutokset maatukamittauksella

Maatukan 400 MHz:n antennidatasta lasketut kosteusprofiilikuvat on esitetty kuvassa 68. Kuvassa on esitetty tilanne ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen neljänä eri ajankohtana: 13.10.2016 (2 rekkaa), 27.4.2017 (1 rekka), 13.6.2017 (1 rekka) ja 14.6.2017 (2 rekkaa). Kuvasta nähdään, että kosteusprofiilit ennen ja jälkeen kuormitusten ovat ajankohdittain käytännössä identtiset, eivätkä kosteusolosuhteet tie-

rakenteessa ole muuttuneet kuormitusten aikana. Pumpputumiseen viittaavaa kosteuden nousua rakenteessa ylöspäin ei siis havaita. Sama asia voidaan todeta kuvassa 69 esitetystä MDI-arvojen kuvaajista, joissa ei havaita merkittäviä muutoksia ennen ja jälkeen kuormitusten.



Kuva 68 Maatutkan MDI (moisture damage index) analyysitulokset Simon kohteelta (Mt 924). Kuvassa on esitetty tilanne ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen neljänä eri ajankohtana. Pystymittakaava on nanosekunti (ns), jossa yksi nanosekunti vastaa noin 60 mm paksuutta. Punaiset kohdat kuvaavat korkeampaa materiaalin kyllästysastetta. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja keltaisella pystyviihvalla.



Kuva 69 MDI-arvojen kuvaajat Simon kohteelta (Mt 924). punainen = rakenteen alaosan MDI / sininen = Total MDI ja vaaleampi väri = tilanne ennen kuormitusajoja / tummempi väri = tilanne viimeisen ajon jälkeen.

4.4.7 Yhteenveto Simon kohteen kokeista

- Muu runsas raskas liikenne vaikutti merkittävästi 13.6.2017 ja erityisesti 14.6.2017 mittaustuloksiin noin 110 mm paksuisen päällysteen omaavalla 0,6 m paksulla tierakenteella, jonka alla pohjamaan oli silttiä tai silttistä hiekkaa.
- Dielektrisyys- ja huokosvedenpainemittaukset sekä MDI-analyysi eivät osoittaneet merkkejä kosteuden lisääntymisestä.
- Ylitysten aikana maksimisiirtymät pysyivät samoilla tasoilla
- Kevätkelirikon aikana 27.4.2017 muodostui pysyviä siirtymiä tilattujen kuormitusajoneuvojen ajaessa samaa ajolinjaa. Pysyvien siirtymien kasvua pienensi muiden ajoneuvojen ajolinjojen poiketessa tilattujen kuormitusajoneuvojen ajolinjoista.
- Muina mittauspäivinä pysyviä siirtymiä ei mittauspisteen kohdalle juurikaan muodostunut.
- Simon kohteella pysyvää siirtymää palautui muiden mitattujen ajoneuvojen kulkiessa jopa kahden metrin etäisyydellä anturista.
- Ainoa pääosin omista kuormitusajoneuvoista muodostunut urakasvu saatiin mitattua 13.10.2016 jolloin 9-akselisesta tukkirekasta muodostui uraa keskimäärin 0,06 mm/ylityskerta 400 m matkalla. Tosin 27.4.2017 ei saatu mitattua luotettavasti uran kasvua sulavan lumen vuoksi.

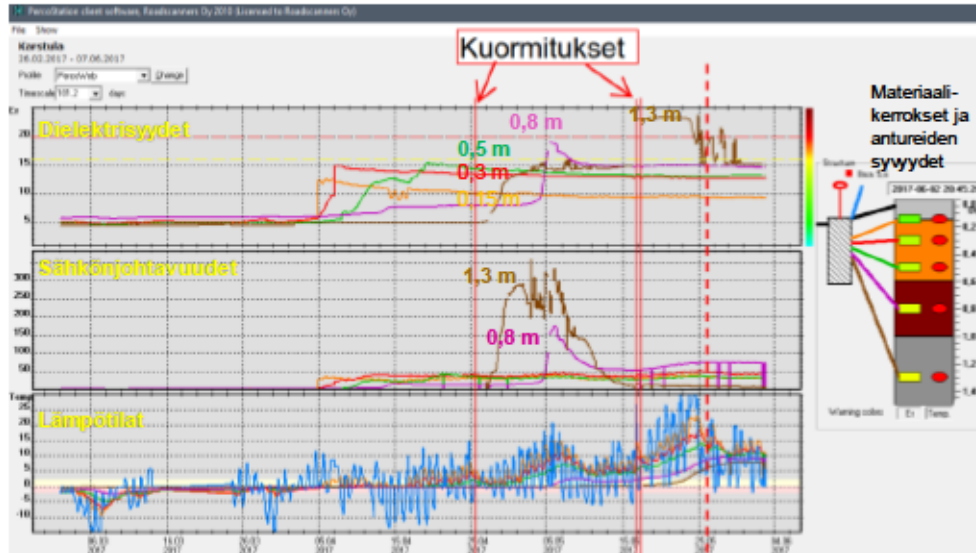
4.5 Kt 77 Karstula – syksy 2016 ja kevät 2017

4.5.1 Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet

Karstulan Percoasema asennettiin 15.9.2016 ja siitä ei saatu pitkäaikaisia seuranta-mittauksia kuvaamaan noin 1,0 m paksuisen tierakenteen olosuhteita ennen 21.10.2016 kuormituksia. Karstulan kohde sijaitsi turpeisella pohjamaalla tien päällysteen paksuus ollessa 180–200 mm. Mittauspäivä syksyllä 2016 oli pilvipoutainen ja tien pinta oli kuiva.

Kuvassa 70 on esitetty mitatut dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvot sekä lämpötilat maalliskuusta kesäkuuhun vuodelta 2017. Kuvasta nähdään tierakenteen sulaneen 0,5 m syvyyteen noin viikko ennen 25.4.2017 tehtyjä mittauksia, kun 0,5 m syvyyden dielektrisyysarvot ja sähkönjohtavuudet kohosivat melko hitaasti suurimpaan arvoonsa. Huhtikuun lopussa Percoaseman 1,3 m syvyydellä olevan anturin ympäristö oli sulanut dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusarvojen nousun perusteella. Tämän jälkeen 1,3 m syvyydestä mitatut sähkönjohtavuudet olivat huomattavan korkealla kahden viikon ajan. Merkittävää oli 1,3 m syvyydessä lämpötilan pysyminen lähellä 0 °C todennäköisesti tierakenteen sulamisen vuoksi aina toukokuun loppupuolelle punaisen katkoviivan osoittamaan ajankohtaan asti. Vaikka 0,8 m syvyyden anturi vapautui roudasta 5.5.2017 paikkeilla, kahden syvimmän anturin välissä voidaan olettaa olleen routaa kohtuullisen paljon. Koska tien vieressä oli suota, jonka sulamisvedet kulkeutuvat osin tien viereiseen ojaan, on myös mahdollista, että suolta tulevat sulamisvedet olivat pitäneet Percoaseman alimman anturin lämpötilan lähellä 0 °C. Täten on voinut olla, että tien alaosassa on ollut vielä vähän routaa 16. ja 17.5.2017 tehtyjen mittausten aikana.

Mielenkiintoista on 16.5.2017 syvyydellä 1,3 m sijainneesta anturissa havaittu dielektrisyysarvon hyppäys arvosta 15 arvoon 23, kun anturi oli jo irrotettu nopeita mittauksia varten, mutta nopeita mittauksia ei oltu vielä aloitettu. Tämä johtuu sulamisvesien johtumisesta mittauskohtaan. Varmasti routa oli sulanut alueella lämpötilamittausten perusteella lopullisesti vasta 21.5., eli viikko kuormituksen jälkeen.

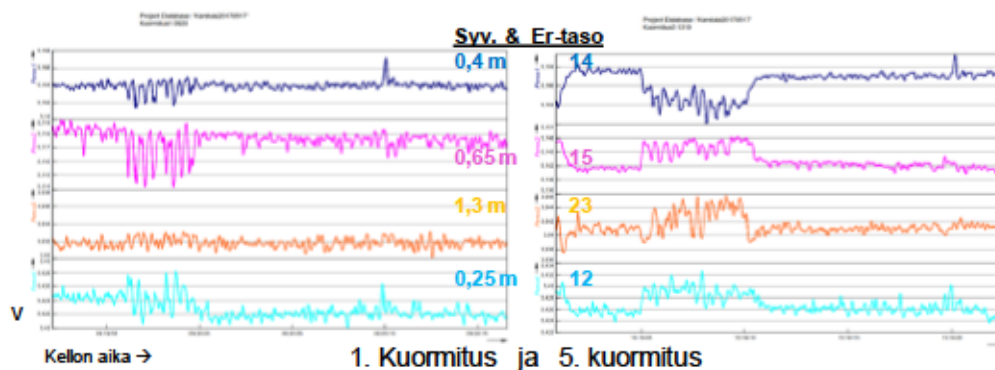


Kuva 70 Karstulan Percoaseman antureista mitatut dielektrisyydet ja sähkönjohtavuudet sekä lämpötilat keväällä 2017. Kuormituskokeiden ajankohdat on osoitettu punaisilla nuolilla.

4.5.2 Dielektrisyysmittaukset

Dielektrisyyttä mitattiin 0,25 m, 0,4 m, 0,65 m ja 1,3 m syvyyksiltä. Syksyllä 21.10.2016 kuormitus tehtiin noin viikko Percoaseman asennuksen jälkeen. Dielektrisyysistä mitattiin vain minimaalisia vasteita.

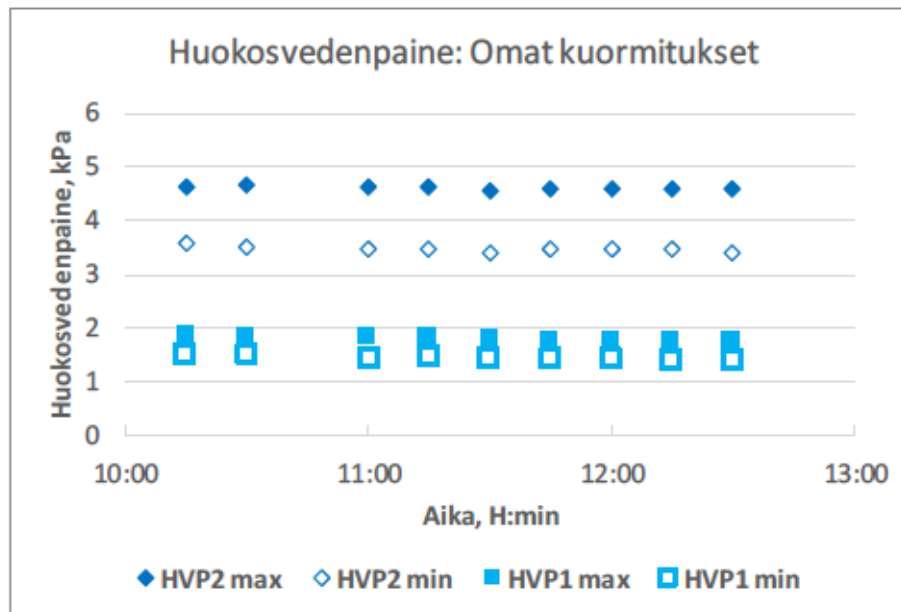
Kevään 2017 mittauksissa muutokset dielektrisyysissä olivat hyvin pieniä ja merkityksettömiä. Kuvassa 71 on esitetty esimerkkinä 17.5.2017 ensimmäisen ja viimeisen oman kuormitusajoneuvojan eli kahden peräkkäin ajaneen 7-akselisen rekan ylityksen aikana mitatut vasteet dielektrisyysistä. Päivän aikana vasteet muodostuivat hieman selkeämmiksi ja 0,65 m syvyydellä kuormituksesta aiheutuvan muutoksen suunta muuttui. Dielektrisyys pysyivät kuitenkin koko päivän tasoiltaan samoina.



Kuva 71 Karstulan Percoasemalla 17.5.2017 mitatut dielektrisyydet 1. ja 5. oman kuormitusajoneuvon ylityksellä (2 rekkaa peräkkäin). Dielektrisyys kasvaa, kun mitattu voltin arvo pienenee.

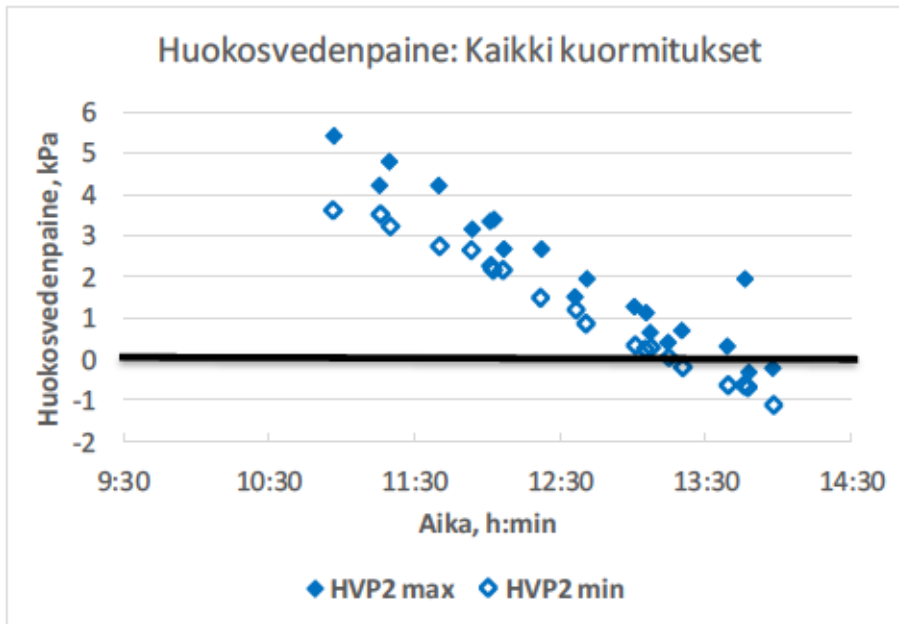
4.5.3 Huokosvedenpaineen mittaukset

Kuvassa 72 on esitetty rekan ylityksillä 21.10.2016 mitatut suurimmat (HVP max) ja pienimmät (HVP min) huokosvedenpaineet 1,4 m syvyyteen asennetuista antureista. Anturi HVP 2 sijaitsi 0,5 m lähempänä tien reunaa. Sen huokosvedenpaineen muutoksen suuruus kuormitusajoneuvon ylityksen aikana pieneni hieman ensimmäisten ylitysten jälkeen. Huokosvedenpaineet pysyivät vakio tasoillaan.



Kuva 72 Karstulan kohteella 21.10.2017 omien kuormitusajoneuvojen ylitysten aikana mitatut suurimmat ja pienimmät huokosvedenpaineet 1,4 m syvyydeltä.

Kun 25.4.2017 mitattiin huokosvedenpaineita, tierakenteen yläosa oli sulana hieman yli 0,5 m. Kuvassa 73 on esitetty kuormitusajoneuvon ylityksillä 25.4.2017 mitatut suurimmat (HVP max) ja pienimmät (HVP min) huokosvedenpaineet 1,4 m syvyyteen asennetuista HVP 2 anturista. Kuormitusten alettua huokosvedenpaine aleni tasolta 5 kPa päätyen lähelle 0 kPa. Tämä huokosvedenpaineen käyttäytyminen saattaa johtua siitä, että osittain jäätyneen tierakenteen alla vapaa vesi pumppautuu kuormituksen vaikutuksesta tierakenteesta pois, jolloin mitattu huokosvedenpaine pienenee. Toisesta HVP 1 anturista samalta syvyydeltä mitattiin arvoja n. 2 kPa:n, mutta anturin ympäristö on saattanut olla jäässä. Kuvassa 74 näkyy hyvin lumen sulaminen tiepenkereessä Karstulan Percoaseman kohdalta länteen päin kuvattuna mittauspäivänä 25.4.2017.



Kuva 73 Karstulan kohteella 25.4.2017 omien kuormitusajoneuvojen ylitysten aikana mitatut suurimmat ja pienimmät huokosvedenpaineet HVP2 -anturista 1,4 m syvyydeltä, kun tierakenteen paksuus oli noin 1,0 m.



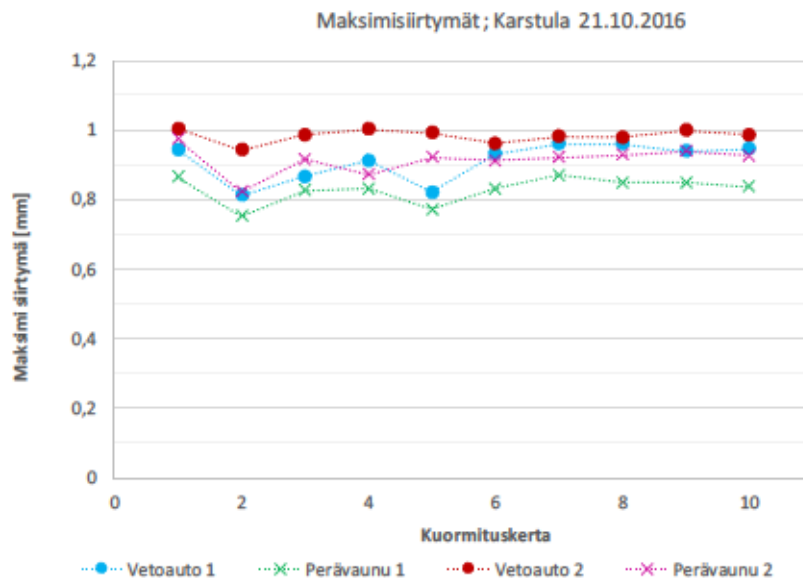
Kuva 74 Karstulan kohde 25.4.2017 kuvattuna Percoasemalta pienenevän paalulukeman suuntaan. Tierakenteen paksuus noin 1,0 m.

Toukokuun mittauskerroilla 16. ja 17.5.2017 mitatuissa huokosvedenpaineissa ei tapahtunut juurikaan muutoksia. HVP 1 käyttäytyi samankaltaisesti kuormituksissa tason ollessa noin 1 kPa ja HVP2 pieni kumpanakin päivänä hieman ollen kummankin päivän lopussa noin 1 kPa.

4.5.4 Päällysteen alapinnan pystysiirtymät

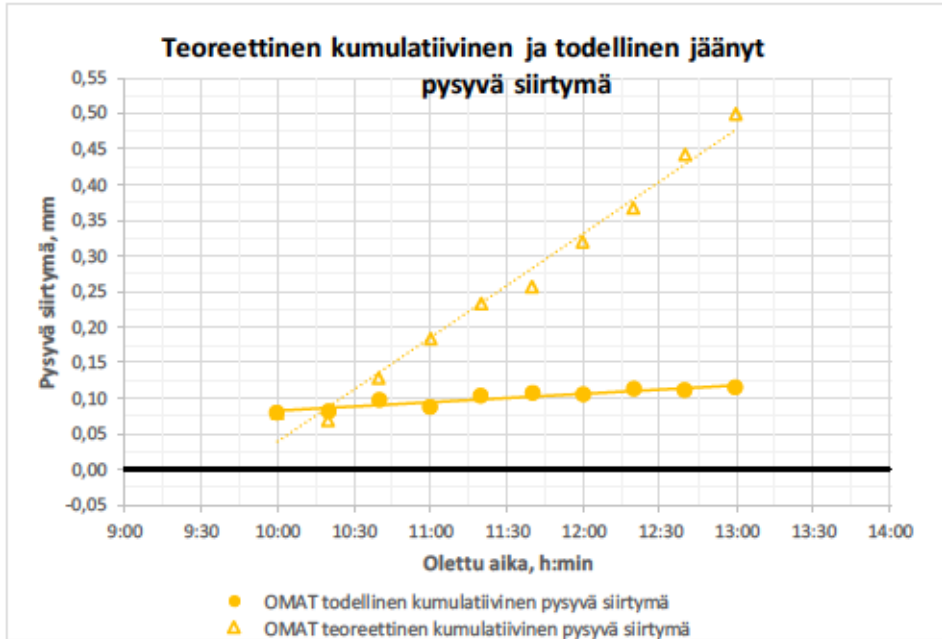
Turpeisella pohjamaalla olevalla 1,0 m paksuisella tierakenteella Karstulan kohteella (kt 77 / 1 / 4854) vain toinen siirtymäantureista toimi kuormitusten aikana. Syksyllä 2016 mitattiin 180–200 mm paksun päällysteen alapinnan pystysiirtymää vain omista kuormitusajoneuvoista. Kuvassa 75 on esitetty peräkkäin ajaneiden kuormitusajoneuvojen vetoauton ja perävaunun aiheuttamat maksimisiirtymät ylityksittäin. Jälkimmäisen rekan vetoautosta mitattiin suurimmat akselikohtaiset maksimisiirtymät, jotka olivat pääosin noin 1,0 mm. Perävaunujen aiheuttamat maksimisiirtymät olivat

noin 0,1 mm pienemmät kuin vetoautojen. Jälkimmäinen rekka oli noin 2 000 kg painavampi ja se kulki systemaattisesti 0,1–0,35 m lähempänä tien reunaa. Toisella kuormituskerralla toisen rekan ajolinja poikkesi eniten muiden kuormituskertojen ajo-
linjoista renkaiden reunojen jäädessä noin 0,1 m päähän anturista.



Kuva 75 Karstulan kohteella 21.10.2016 mitatut kuormitusajoneuvojen vetoauton ja perävaunun aiheuttamat maksimisiirtymät ylityksellä.

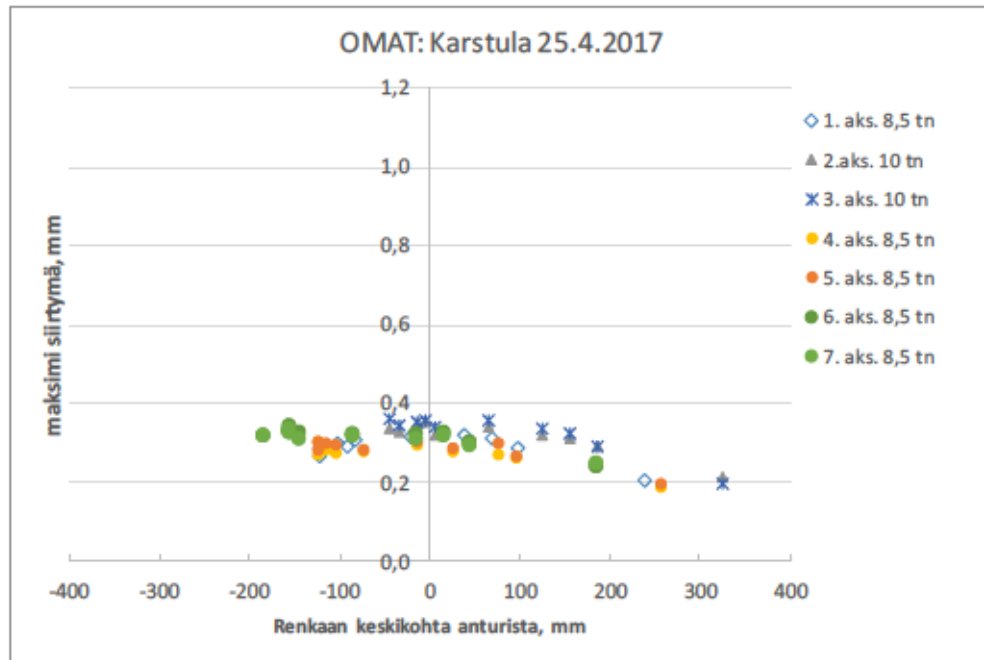
Kuvassa 76 on esitetty 21.10.2016 mittauksista määritetyt päällysteen alapinnan teoreettiset ja todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät omista kuormitusajoneuvoista. Omien kuormitusajoneuvojen teoreettisessa kumulatiivissa pysyvässä siirtymässä havaittiin selkeä lineaarinen trendi, mutta todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä kasvoi hyvin hitaasti. Kuvasta nähdään toisen kuormituskerran aiheuttaneen negatiivisen pysyvän siirtyvän teoreettisen kumulatiivisen siirtyvän pienentyessä, jolloin jälkimmäisen rekan renkaat eivät ole menneet mittausanturin päältä. Syksyllä 2016 ei mitattu muita ajoneuvoja, jonka vuoksi niiden vaikutuksesta pysyviin siirtymiin ei ole mittausdataa. Koska tiepenger on rakennettu turpeen päälle, siirtymän palautuminen kuormituksen jälkeen on voinut kestää pitemmän ajan kuin muutoksia on mitattu ajoneuvon ylityksen jälkeen.



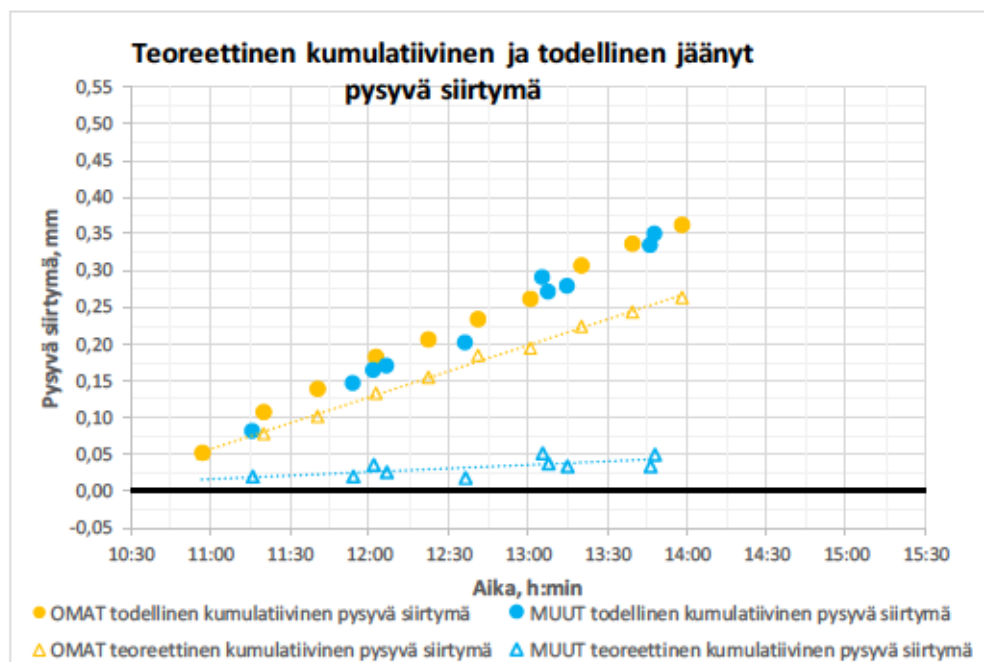
Kuva 76 Karstulan kohteella 21.10.2016 mitatut omien kuormitusajoneuvojen ylitysten jälkeiset pysyvät siirtymät.

Kuvassa 77 on esitetty Karstulan kohteella 25.4.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät suhteessa renkaan keskikohdan sijaintiin anturista. Suurin mitattu maksimisiirtymä oli alle 0,35 mm, joka aiheutui 10 tn painoisella paripyörän vetoakselilla. Lähes sama maksimisiirtymä mitattiin muidenkin akselien ylityksistä. Koska tierakenne oli mittauspäivänä sulanut noin puolen metrin syvyyteen ja ollessa sen alapuolelta jäässä, maksimisiirtymä oli yli puolet pienempi kuin syksyllä 2016. Tämä viittaisi siihen että, tierakenteen ollessa sulana erittäin suuri osa raskaan ajoneuvon ylityksen aiheuttamista siirtymistä muodostuu tierakenteen alaosassa ja pohjamaassa.

Kuvassa 78 on esitetty 25.4.2017 mittauksista määritetyt päällysteen alapinnan teoreettiset ja todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät omista kuormitusajoneuvoista ja muista mitatuista ajoneuvoista. Todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä kasvoi tasaisesti ja oli mittauksen päättyessä 0,36 mm. Omat kuormitusajoneuvot aiheuttavat siitä suurimman osan, mikä näkyy selkeästi teoreettisen kumulatiivisen pysyvän siirtymän lineaarisesta kasvusta. Muiden ajoneuvojen ylitykset kasvattivat hitaasti pysyvää siirtymää. Tämä kelirikkoaikana mitattu todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä muodostuu tierakenteen yläosassa ja on selkeästi suurempi kuin muina mittauksina mitatut todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät tierakenteen ollessa sulana. Tällöin noin 200 mm paksun päällysteen omaava hyvä kantatiekin on altis pysyvien siirtymien kasvuille kelirikkoaikana tierakenteen sulaessa raskaiden ajoneuvojen kuormittaessa tierakennettä.

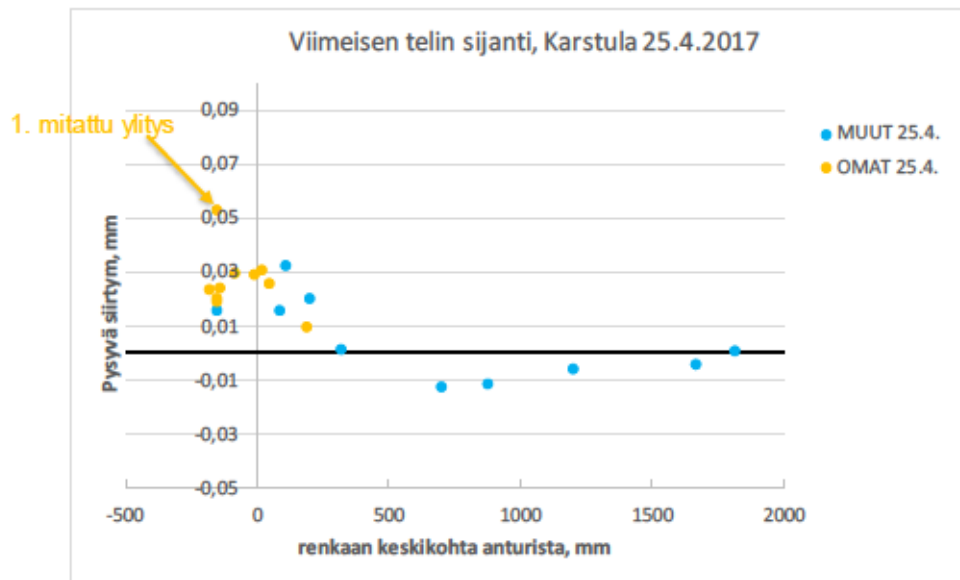


Kuva 77 Karstulan kohteella 25.4.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät esitettynä aksleittain suhteessa renkaan keskikohtaan sijaintiin anturista.



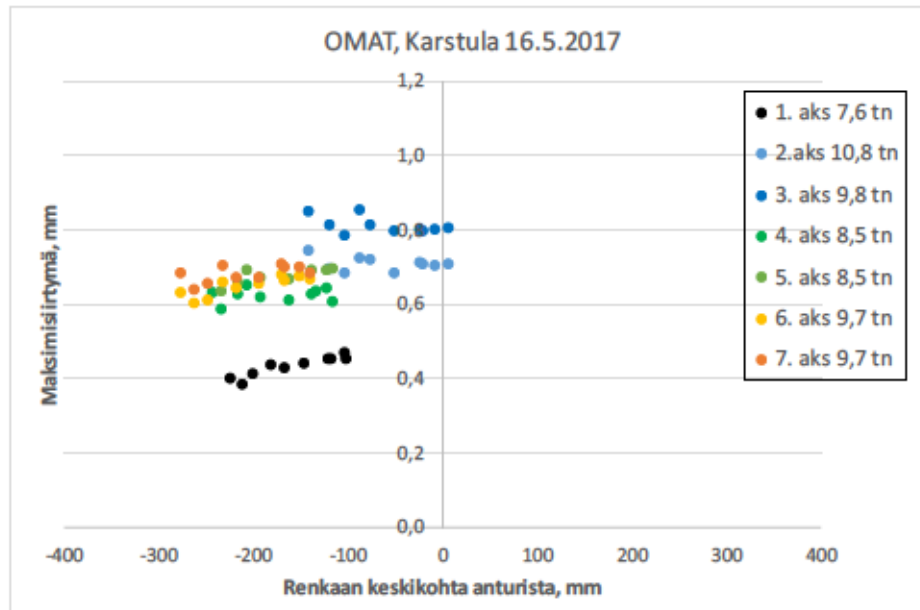
Kuva 78 Karstulan kohteella 25.4.2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten jälkeiset pysyvät siirtymät.

Kuvassa 79 on esitetty mitattujen ajoneuvojen aiheuttama pysyvä siirtymä suhteutettuna niiden ajolinjaan. Ajolinja on määritetty viimeisestä telistä. Omista kuormitusajoneuvoista tiedetyn rengaslevyiden perusteella määritettiin viimeisen telin renkaiden keskikohta suhteessa anturiin. Koska muista mitatuista ajoneuvoista ei tiedetty rengaslevyitä, on niiden oletettu olevan paripyöriä ja niillä kaikilla on käytetty samaa oletuslevyitä. Kuvasta nähdään pysyviä siirtymiä muodostuvan, kun telin viimeinen rengas kulkee anturin yläpuolelta ja pysyvien siirtymien olevan negatiivisia ajoneuvon kulkiessa sopivalta etäisyydeltä anturin ohi. Kuvasta on osoitettu ensimmäinen mitattu ylitys, jolla muodostui huomattavasti suurempi pysyvä siirtymä kuin päivän muilla ylityksillä. Syynä tähän on oletettavasti ollut osan tierakenteen roudan sulamisen jälkeen tapahtuneesta ensimmäisestä raskaasta kuormituksesta tai siitä, että mittauksen aloittamista edeltävänä ajanjaksona liikenne on kulkenut siirtymäanturin kohtaan eli uraan nähden keskeemmällä tiellä olevaa ajolinjaa pitkin palauttaen tien pintaa pystysiirtymäanturin kohdalla.



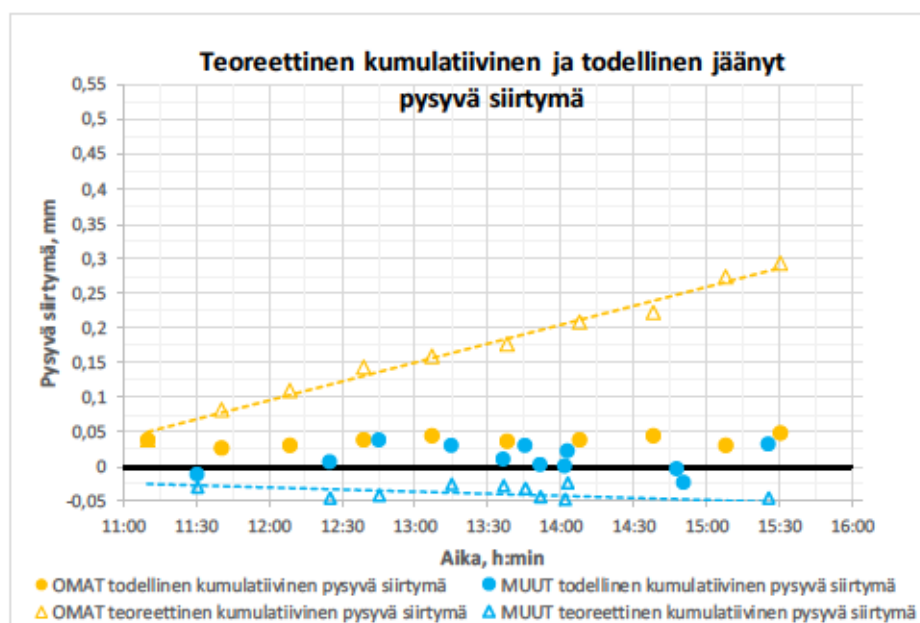
Kuva 79 Karstulan kohteella 25.4.2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten pysyvät siirtymät suhteessa ajoneuvon viimeisen telin sijaintiin. Muiden ajoneuvojen sijainti ei ole tarkka, koska niissä on käytetty pyörän renkaalle oletuslevyitä.

Kuvassa 80 on esitetty Karstulan kohteella 16.5.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät suhteessa renkaan keskikohdan sijaintiin anturista. Suurin mitattu maksimisiirtymä oli alle 0,85 mm, joka aiheutui noin 10 tn painoisella paripyörän vetoakselilla. Syksyllä 2016 mitattu maksimisiirtymä oli noin 0,15 mm suurempi. Kuvasta huomataan omien kuormitusajoneuvojen ajolinjojen olleen systemaattisesti anturin keskikohdasta tien reunaa kohden.



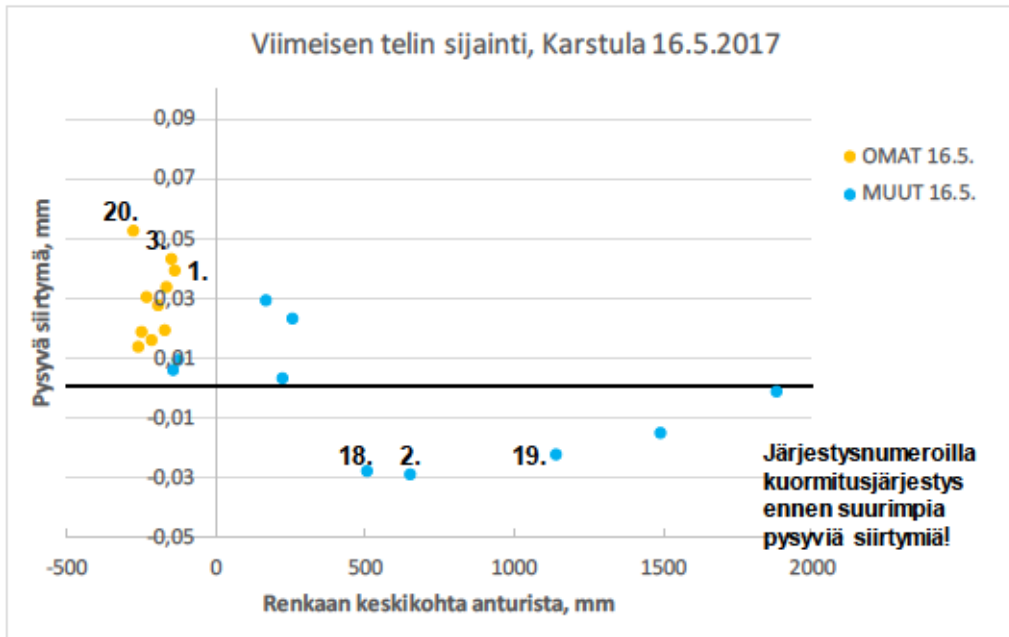
Kuva 80 Karstulan kohteella 16.5.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät esitettynä akseleittain suhteessa renkaan keskikohtaan sijaintiin anturista.

Kuvassa 81 on esitetty 16.5.2017 mittauksista määritetyt päällysteen alapinnan teoreettiset ja todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät omista kuormitusajoneuvoista ja muista mitatuista ajoneuvoista. Todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä pysyy samalla tasolla mittauksen ajan. Omien kuormitusajoneuvojen teoreettinen pysyvä siirtymä kasvaa lineaarisesti, mutta vastaavasti muiden mitattujen ajoneuvojen ylitykset pienentävät pysyvää siirtymää. Kun laskee yhteen mitattujen ajoneuvojen teoreettiset kumulatiiviset pysyvät siirtymät, huomataan, että se poikkeaa huomattavasti todellisesta pysyvästä siirtymästä. Tämä saattaa johtua esimerkiksi turpeen päällä olevan tien pitkästä palautumisajasta ja ehkä pieneltä osalta henkilöautojen vaikutuksista pysyvään siirtymään.



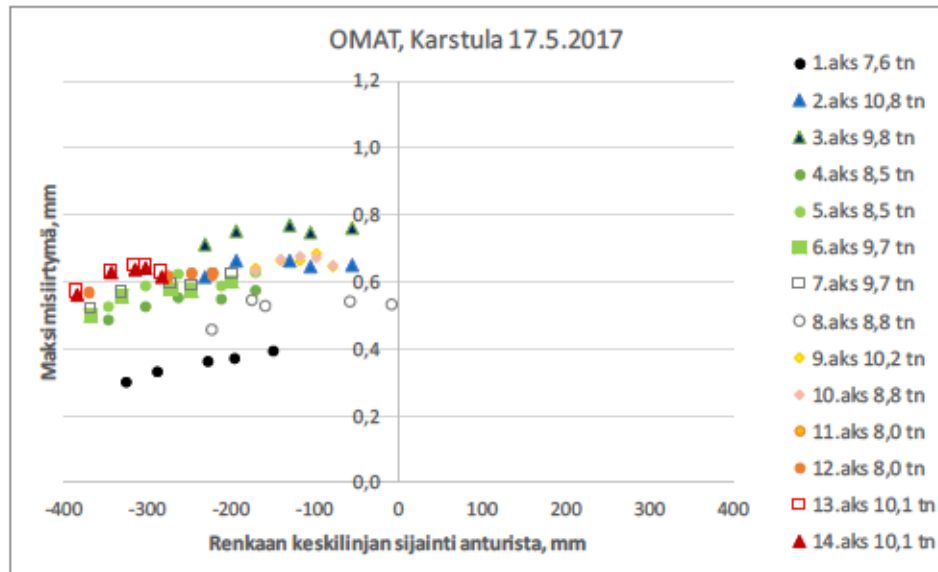
Kuva 81 Karstulan kohteella 16.5.2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten jälkeiset pysyvät siirtymät.

Kuvassa 82 on esitetty mitattujen ajoneuvojen aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteutettuna niiden ajolinjoihin. Ajolinjat on määritetty viimeisestä telistä. Omista kuormitusajoneuvoista tiedetyn rengasleveyden perusteella määritettiin viimeisen telin renkaiden keskikohta suhteessa anturiin. Kuvasta nähdään pysyviä siirtymiä muodostuvan, kun telin viimeinen rengas kulkee anturin yläpuolelta ja pysyvien siirtymien olevan negatiivisia ajoneuvon kulkiessa sopivalta etäisyydeltä anturin ohi. Kuvassa on osoitettu numeroilla kuormitusten järjestys lähellä suurimpia pysyviä siirtymiä. Suurimmat pysyvät siirtymät mitattiin ensimmäisellä ylityksellä tai sen jälkeen, kun muu ajoneuvo oli palauttanut pysyvää siirtymää takaisin päin.



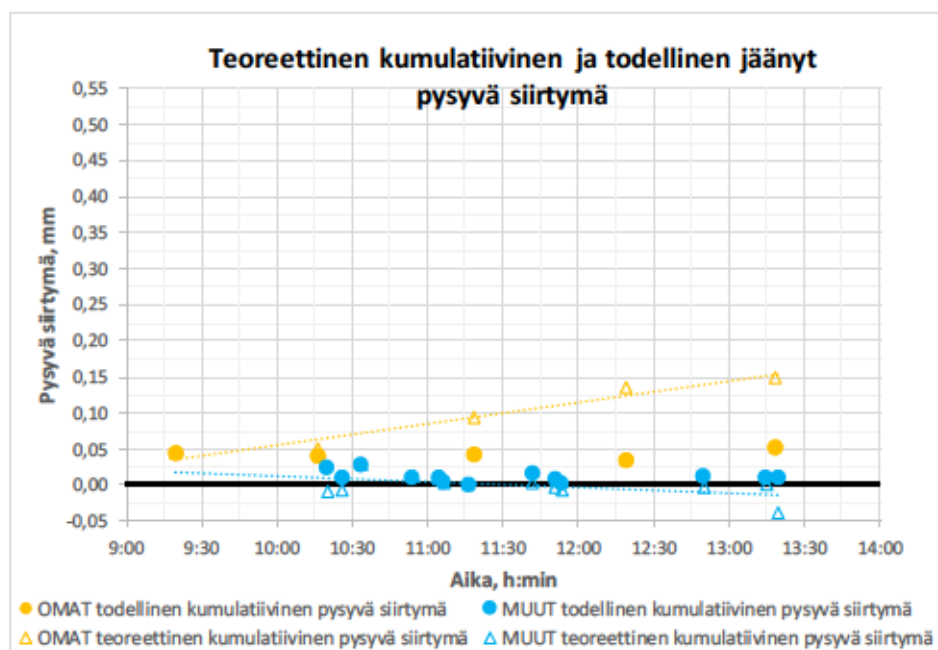
Kuva 82 Karstulan kohteella 16.5.2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten pysyvät siirtymät suhteessa ajoneuvon viimeisen telin sijaintiin. Muiden ajoneuvojen sijainti ei ole tarkka, koska niissä on käytetty pyörän renkaalle oletusleveyttä.

Kuvassa 83 on esitetty Karstulan kohteella 17.5.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät suhteessa renkaan keskikohdan sijaintiin anturista. Mittauspäivänä ylityksessä ajoi peräkkäin kaksi seitsemänakselistaa rekkaa. Suurin mitattu maksimisiirtymä oli melkein 0,8 mm, joka aiheutui noin 10 tn painoisesta paripyörillä varustetusta vetoakselista. Kuvasta 84 havaitaan ylityksillä renkaan keskikohdan olevan anturilinjasta tien reunaan päin.



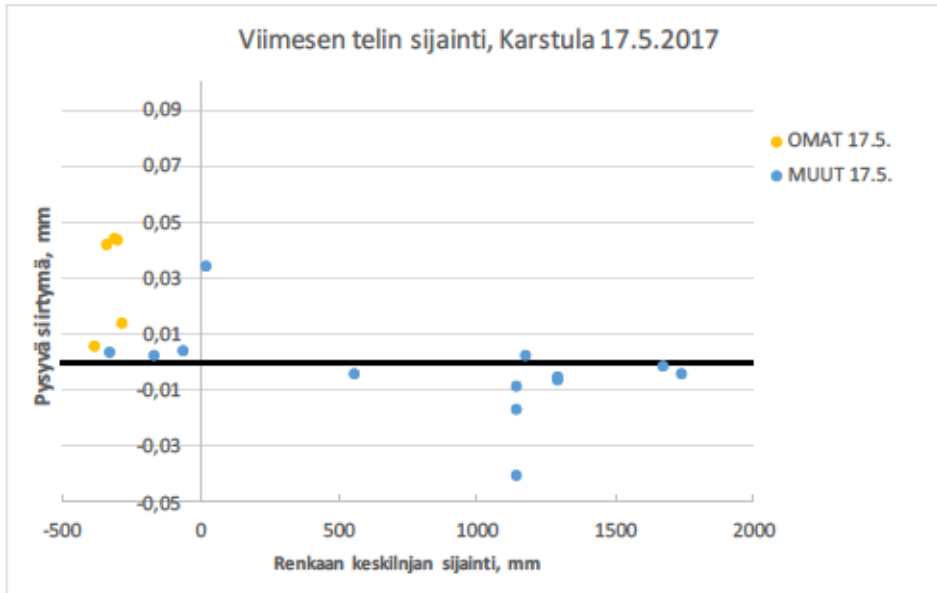
Kuva 83 Karstulan kohteella 17.5.2017 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylityksien aiheuttamat maksimisiirtymät esitettynä akseleittain suhteessa renkaan keskikohdan sijaintiin anturista.

Kuvassa 84 on esitetty 17.5.2017 mittauksista määritetyt päällysteen alapinnan teoreettiset ja todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät omista kuormitusajoneuvoista ja muista mitatuista ajoneuvoista. Peräkkäin kulkevia omia kuormitusajoneuvoja käsiteltiin yhtenä ylityksenä. Todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä pysyy samalla tasolla mittauksen ajan. Omien kuormitusajoneuvojen teoreettinen pysyvä siirtymä kasvaa lineaarisesti, mutta vastaavasti muiden mitattujen ajoneuvojen ylitykset pienentävät hieman pysyvää siirtymää. Teoreettiset pysyvät siirtymät ovat pienempiä kuin edellisenä päivänä, mutta todelliset pysyvät siirtymät olivat molempina päiviä yhtä pieniä.



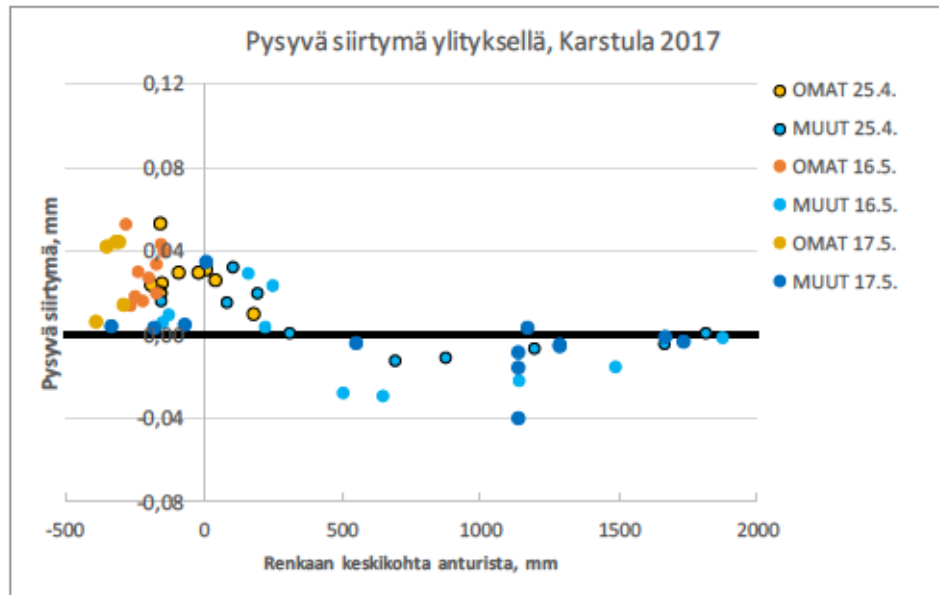
Kuva 84 Karstulassa 17.5. mitattujen ajoneuvojen ylitysten jälkeiset pysyvät siirtymät.

Kuvassa 85 on esitetty 17.5.2017 mitattujen ajoneuvojen aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteutettuna niiden ajolinjoihin. Ajolinjat on määritetty viimeisestä telistä. Kuvasta nähdään pysyviä siirtymiä pääosin muodostuvan, kun viimeisen telin renkaat kulkevat anturin yläpuolelta ja pysyvien siirtymien olevan negatiivisia ajoneuvon kulkiessa sopivalta etäisyydeltä anturin ohi.



Kuva 85 Karstulan kohteella 17.5.2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten pysyvät siirtymät suhteessa ajoneuvon viimeisen telin sijaintiin. Muiden ajoneuvojen sijainti ei ole tarkka, koska niissä on käytetty pyörän renkaalle oletusleveyttä.

Kuvassa 86 on esitetty kootusti keväällä 2017 mitattujen ajoneuvojen aiheuttamat pysyvät siirtymät suhteutettuna niiden ajolinjoihin. Ajolinjat on määritetty viimeisestä telistä. Kuvasta nähdään selkeästi ajolinjan sijainti, jolla raskas ajoneuvo aiheuttaa urassa pysyvän siirtymän palautumista eli ura syvyys pienenee. Muut ajoneuvot palauttavat pysyvää siirtymää niiden kulkiessa yli 1,5 metrin päässä anturista. Tämä saattaa tarkoittaa, että vastakkaiseen suuntaan kulkevat ajoneuvot tasoittavat ajokaistojen sisempiä pyöräuria, jonka vuoksi ajokaistojen sisemmät pyöräurat ovat normaalisti matalampia ja loivempia kuin ulkourat.

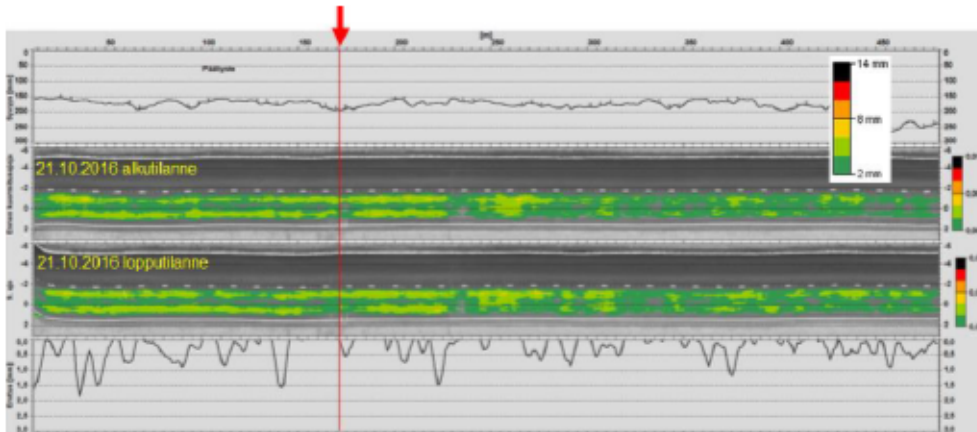


Kuva 86 Karstulan kohteella 2017 mitattujen ajoneuvojen ylitysten pysyvät siirtymät suhteessa ajoneuvon viimeisen telin sijaintiin. Muiden ajoneuvojen sijainti ei ole tarkka, koska niissä on käytetty pyörän renkaalle oletusleveyttä.

4.5.5 Urautuminen laserkeilauksella

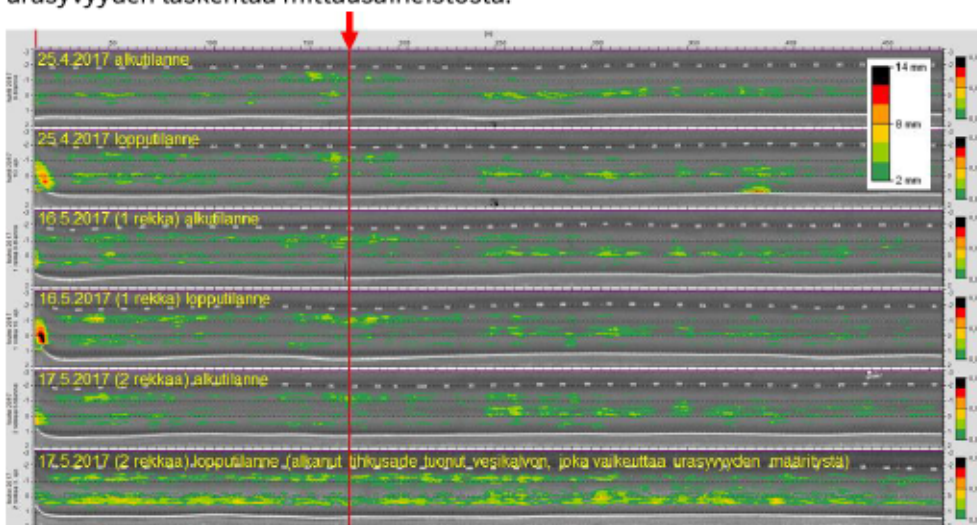
Kuvassa 87 on esitetty Karstulan kohteen (Kt 77) koko mittausjakson RDSV-urasyvyyskartat syksyltä 2016. Turpeisella pohjamaalla sijaitsevan 1,0 m paksuisen tie-rakenteen päällyste oli 180–200 mm. Kohteella ajettiin kahdella rekalla peräkkäin yhteensä kymmenen kuormitusajoa, eli yksittäisen rekan kuormituksia tuli yhteensä 20. Ylemmässä urakartassa on tilanne ennen kuormitusajoa ja alemmassa välittömästi 9. ajon jälkeen, koska viimeisen ajon jälkeinen mittausaineisto oli korruptoitunut. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä. Näiden yläpuolella on esitetty lisäksi maatutkadatasta tulkittu päällystepaksuus ja alimmassa ikkunassa mittausajojen aikana tapahtunut maksimiurasyvyyden kasvu. Percoaseman ja mittausantureiden sijainti on merkitty punaisella nuolella ja pystyviivalla.

Kohteen päällystepaksuus on suuri ja tietä on muutenkin vastikään parannettu, joten tällä kuormitusten määrällä ei vielä saada aikaan kartoista havaittavaa urasyvyyden kasvua. Urautumiskartoista kuitenkin havaitaan, että kohteen alkupäässä (noin paalulle 225 m asti) on hieman suurempaa urautumista havaittavissa verrattuna kohteen loppupäähän. Tuolla kohdalla tiessä oli päällystesauha, joten todennäköisesti alkupää on päällystetty jonkin verran aikaisemmin. Aivan kohteen lopussa, noin paalulta 425 m eteenpäin, päällystepaksuus kasvaa noin 250 millimetriin. Urakartoista havaitaan, että tällä jaksolla urautuminen on vielä vähäisempää kuin välillä 225–425 m, vaikka kyseessä on samaan aikaan päällystetty osuus. Laskennallinen mittausajojen aikana tapahtunut oikean ajouran maksimiurasyvyyden kasvu on hyvin vähäistä. Koko mittausjaksolta laskettu urakasvun keskiarvo on 0,15 mm, joka on tässä tapauksessa jo menetelmän mittaustarkkuuden rajoilla.



Kuva 87 RDSV-urasyvyyskartat Karstulan kohteelta syksyllä 2016. Ylemmässä urakartassa on tilanne ennen kuormitusajoja ja alemmassa välittömästi 9. ajon jälkeen. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja pystyviivalla. Näiden yläpuolella on esitetty lisäksi maatukadadatasta tullut päällystepaksuus ja alimmassa ikkunassa mittausajojen aikana tapahtunut maksimiurasyvyyden kasvu.

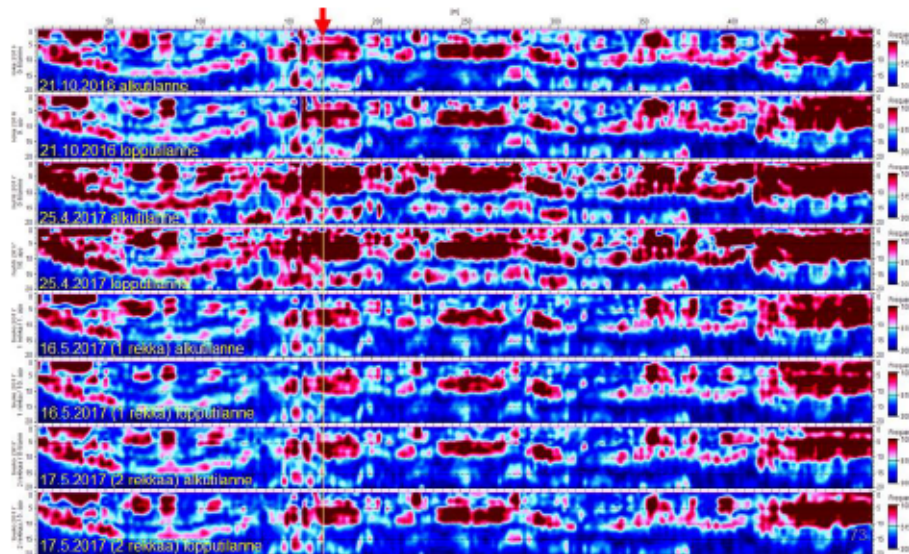
Kuvassa 88 on lisäksi esitetty urasyvyyskartat ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen 25.4.2017 (1 rekka), 16.5.2017 (1 rekka) ja 17.5.2017 (2 rekkaa). Urakasvu kuormitusajojen aikana on erittäin pientä, eroja ei käytännössä pystytä havaitsemaan mittaustarkkuuden rajoissa. Roudan sulamisen ollessa kesken huhtikuussa 2017 oli kuitenkin pientä uran kasvua ja 25.4.2017 koko mittausmatkalle laskettu keskimääräinen maksimiurasyvyyden kasvu oli 0,11 mm sekä siirtymäanturin ympäristössä 20 metrin matkalla 0,38 mm. Tämä anturin ympäristöstä mitattu urakasvu vastaa erittäin hyvin päällysteen alapinnasta mitattua 0,36 mm pysyvää pystysiirtymää. Vaikka viimeisessä urakartassa (2 rekkaa lopputilanne) näyttää olevan hieman enemmän uraa kuin muissa kartoissa, mutta todellisuudessa kyse on siitä, että mittausten aikana alkanut tihkusade on saanut aikaan vesikalvon tien pinnalle, mikä vääristää urasyvyyden laskentaa mittaussaineistosta.



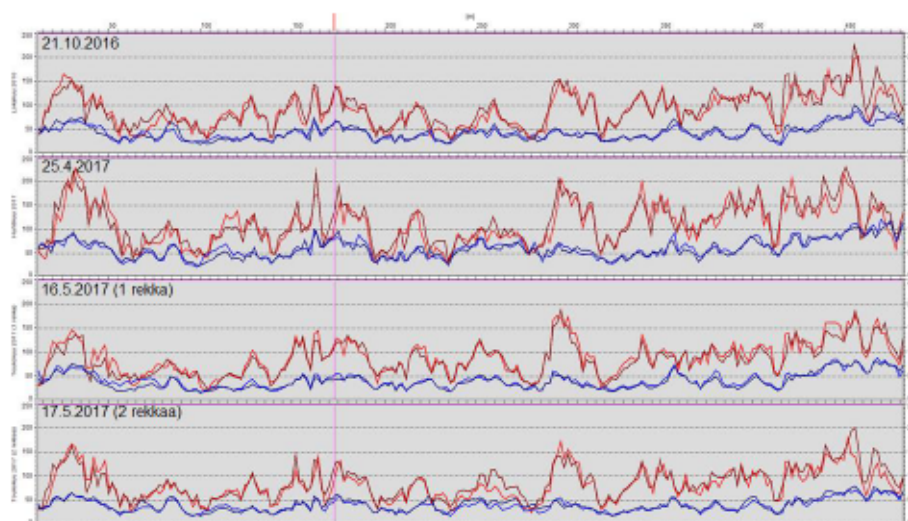
Kuva 88 RDSV-urasyvyyskartat Karstulan kohteelta (Kt 77) ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen 25.4.2017 (1 rekka), 16.5.2017 (1 rekka) ja 17.5.2017 (2 rekkaa). Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja pystyviivalla.

4.5.6 Kosteuden muutokset maatutkamittauksella

Maatutkan 400 MHz:n antennidatasta lasketut kosteusprofiilikuvat on esitetty kuvassa 89. Kuvassa on esitetty tilanne ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen neljänä eri ajankohtana: 21.10.2016 (2 rekkaa), 25.4.2017 (1 rekka), 16.5.2017 (1 rekka) ja 17.5.2017 (2 rekkaa). Kuvasta nähdään, että kosteusprofiilit ennen ja jälkeen kuormitusten ovat ajankohdittain käytännössä identtiset, eivätkä kosteusolosuhteet tierakenteessa ole muuttuneet kuormitusten aikana. Pumppautumiseen viittaavaa kosteuden nousua noin 1,0 m paksussa tierakenteessa ylöspäin ei siis havaita. Sama asia voidaan todeta kuvassa 90 esitetyistä MDI-arvojen kuvaajista, joissa ei havaita merkittäviä muutoksia ennen ja jälkeen kuormitusten.



Kuva 89 Maatutkan MDI (moisture damage index) analyysitulokset Karstulasta. Kuvassa on esitetty tilanne ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen neljänä eri ajankohtana. Pystymittakaava on nanosekunteja, jossa 1 ns vastaa noin 60 mm paksuutta. Punainen kuvaa korkeampaa materiaalin kyllästysastetta. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja keltaisella pystyviivalla.



Kuva 90 MDI-arvojen kuvaajat Karstulan kohteelta (Kt 77). **punainen = rakenteen alaosan MDI / sininen = Total MDI** ja vaaleampi väri = tilanne ennen kuormitusajoja / tummempi väri = tilanne viimeisen ajon jälkeen

4.5.7 Yhteenveto Karstulan (kt77/1/4845) mittauksista

- Karstulan kohteella kuormituksista ei juurikaan muodostunut pysyvää siirtymää eikä urautumista turpeisella pohjamaalla sijainneeseen 180–200 mm paksuisella päällysteellä olevaan noin 1,0 m paksuiseen tierakenteeseen.
- Kuitenkin kevätkelirikon aikana 25.4.2017 muodostui pysyviä siirtymiä ajoneuvojen ajaessa samaa ajolinjaa.
- Dielektrisyys- ja huokosvedenpainemittaukset sekä MDI-analyysi eivät osoitaneet merkkejä kosteuden lisääntymisestä.
- Turvemaalle perustetun hyvin rakennetun tien päällysteen alapinnan siirtymää saattaa muodostua koko tierakenteen painumisesta, josta huomattava osa palautuu suhteellisen pitkällä palautumisajalla. Tällöin ei päällysteen pintaan välttämättä muodostu uraa ja päällysteen alapintaan pitkäaikaisesti pysyviä siirtymiä.
- Karstulan kohteella pysyvää siirtymää palautui muiden mitattujen ajoneuvojen kulkiessa yli 1,5 metrin etäisyydellä anturista.
- Vahvarakenteinen Karstulan kantatie toimi odotusten mukaisesti.

4.6 Mt 16863 Kyyjärvi – syksy 2016 ja kevät 2017

4.6.1 Kuormituskokeiden aikana vallinneet olosuhteet

Kyyjärven kohteella ei ollut Percoasemaa, joten 30–40 mm ohuella päällysteellä olevan noin 0,6 m paksun tierakenteen olosuhteita turpeisella pohjamaalla seuraavaa pitkäaikaista mittausdataa ei ole. Syksyllä 2016 ennen 20.10.2016 mittauksia oli pitkä kuivahko kausi, jolloin tierakenne oli olettavasti tavallisesta syksyn tilanteesta kuivempi.

Kevään 2017 ensimmäisenä mittauspäivän aamuyönä alkoi lumisade, joka esti mittaukset. Koska lähellä olevalla Karstulan kohteella tehtävien mittausten alkaessa lumisateen mahdollisuudesta tiedettiin, käytiin Kyyjärven kohteella tekemässä alkumittaukset RDSV-autolla 25.4.2017 Karstulan mittausten loputtua. Kuvassa 91 on esitetty olosuhteita Kyyjärven kohteella 25. ja 26.4.2017. Kuormitusajoneuvo ajoi kohteen yli muutaman kerran 26.4.2017 ja renkaiden paineen alla tiellä oleva lumi teki tien liukkaaksi, koska lumisade esti järkevät mittaukset maatutkalla ja laserilla kuormitukset lopetettiin. Kuvasta nähdään lumeen muodostuneet urat ja lumisateen peittäneen uudestaan lumesta puhdistetun mittausmaton kymmenessä minuutissa. Kuvassa näkyy hyvin miltä kohdalta renkaat ovat kulkeneet.

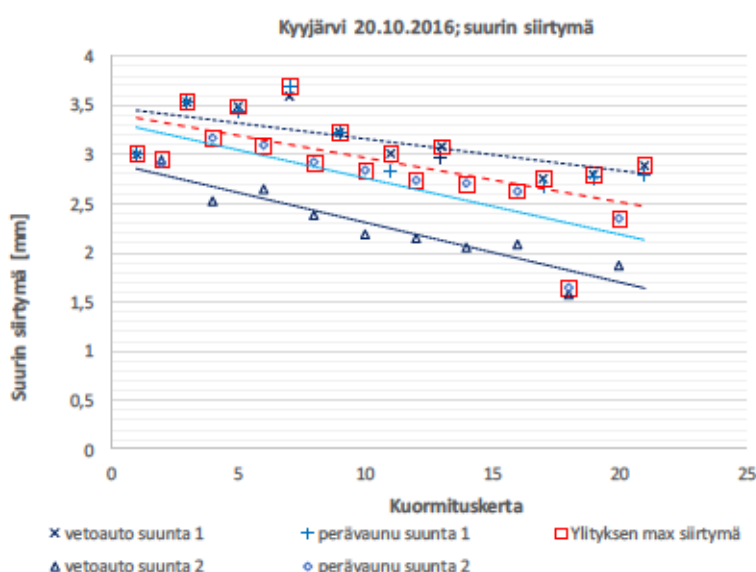
Peräkkäisistä mittauspäivistä toukokuun lopulla 30.5.2017 oli pilvipoutainen. Seuraavana päivänä aamu oli pilvinen ja päivällä alueella oli kuurostateita, joista muutamasta osui mittauspaikalle sataen kevyesti.



Kuva 91 Kyyjärven kohteen olosuhteita 25. ja 26.4.2017. Rekka oli ylittänyt mittauspisteen juuri ennen 26.4.klo 10.30 otettua kuvaa.

4.6.2 Päällysteen alapinnan pystysiiirtymät

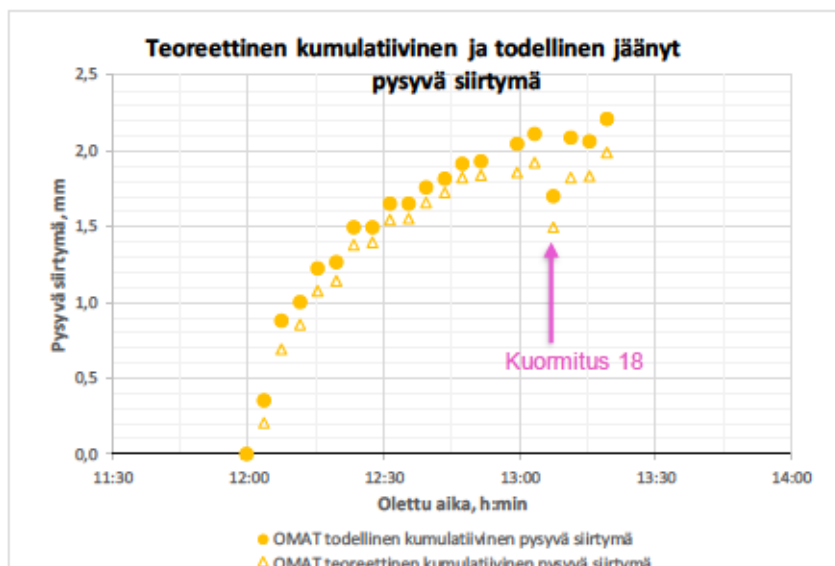
Kyyjärvellä syksyllä 2016 mitattiin päällysteen alapinnan pystysiiirtymää vain omasta kuormitusajoneuvosta. Kuormituksesta 15 ei tallentunut avautuvaa mittaustietoa. Kuvassa 92 on esitetty kuormitusajoneuvon vetoauton ja perävaunun aiheuttamat maksimisiirtymät ylityssuuntien mukaan erotettuina. Suuntaan 1 ajettaessa vetoauton ja perävaunun maksimisiirtymät olivat lähellä toisiaan. Suuntaan 2 ajettaessa vetoauton aiheuttamat maksimisiirtymät olivat selkeästi pienempiä kuin perävaunun aiheuttamat. Keskimääräiset ajolinjat olivat molempiin suuntiin ajettaessa suunnilleen samat, mutta vetoautolla ajolinjat suhteessa anturiin vaihteli enemmän eri suuntien välillä. Maksimisiirtymät pienenevät ylityskertojen kasvaessa ollen alussa 3,7–3,0 mm ja lopussa 3,0–2,5 mm. Poikkeavin arvo tuli 18. kuormituskerralla.



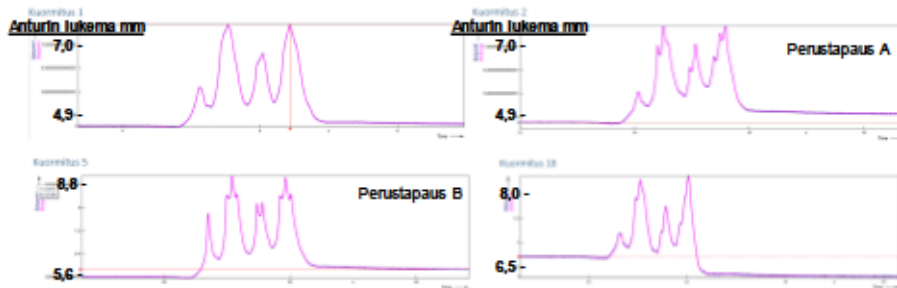
Kuva 92 Kyyjärven kohteella 20.10.2016 mitatut kuormitusajoneuvojen vetoauton ja perävaunun aiheuttamat maksimisiirtymät ylityksellä.

Kuvassa 93 on esitetty 20.10.2016 mittauksista määritetyt päällysteen alapinnan teoreettiset ja todelliset kumulatiiviset pysyvät siirtymät omasta kuormitusajoneuvosta, jolloin kohteella ei ollut juuri muuta liikennettä. Oman kuormitusajoneuvon aiheuttamassa teoreettisessa kumulatiivisissa pysyvässä siirtymässä havaittiin selkeä kasvun hidastuminen kuormituskertojen lisääntyessä. Todellinen kumulatiivinen pysyvä siirtymä oli hieman suurempi kuin teoreettinen. Kumulatiivisten pysyvien muodonmuutoksen tasaantuminen viittaa pohjamaan ja tierakenteen tiivistymiseen, koska pysyvä siirtymä ei palaudu lyhyellä neljän minuutin kuormitusvälillä. Selkeän poikkeuksen trendistä teki 18. kuormitus, jolla pysyvä siirtymä palautui ylityksellä. Sen ajolinja poikkesi toiseksi eniten muiden ajolinjoista. Poikkeavin ajolinja oli ensimmäisellä mittauksella. Jos ensimmäistä ja toisessa suunnassa eniten ajolinjasta poikennutta (20. kuormitus) ylitystä ei huomioida, ajolinjat pysyivät 0,35 m sisällä ja 17 parhainten anturin kohdalle osuneiden ylitysten ajolinjat pysyivät 0,2 m sisällä toisistaan.

Kuvassa 94 on esitetty neljän ylityksen aikana mitatut siirtymät ensimmäisestä, toisesta, viidennestä ja 18. kuormituksesta. Lähes kaikissa ylityksissä mitattu siirtymä oli muodoltaan perustapauksen A tai B kaltainen. Ero näiden kahden perustapauksen välillä on lähinnä ohjausakselilla, jolloin perustapauksessa A ohjausakselin rengas ei kulje mittausanturin yli riittävän läheltä, kun taas perustapauksessa B se kulkee mittausanturin yli. Lisäksi eroa muodostuu eri telien akselien mittaustuloksissa näkyemisessä. Ensimmäisen kuormituksen ajolinja oli kauimpana ja siirtymissä ei erotu enää telien akselit pysyvän muodonmuutoksen jäädessä alkutasolle. Kuormituksella 18, jonka ajolinja oli selkeästi lähempänä anturia kuin ensimmäisellä kuormituksella mutta kauempana kuin perustapauksen ajolinjat, pysyvä siirtymä palautui ja telien akselit eivät myöskään erotu mitatussa siirtymässä.



Kuva 93 Kyyjärven kohteella 20.10.2016 mitattujen kuormitusajoneuvojen ylitysten jälkeiset pysyvät siirtymät.

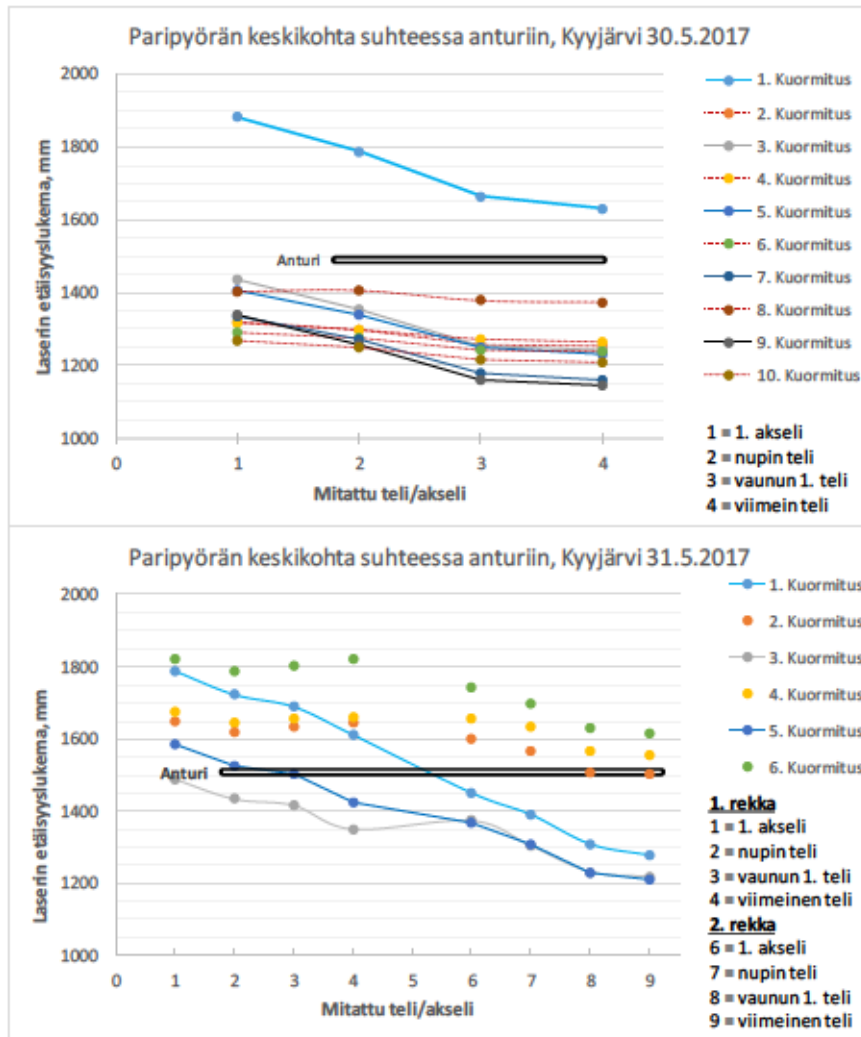


Kuva 94 Kyyjärven kohteella 20.10.2016 mitatut päällysteen alapinnan siirtymät ensimmäisellä, toisella, viidennellä ja 18. kuormituksella.

Keväällä 2017 Kyyjärven kohteelta ei saatu mitattua päällysteen alapinnan siirtymiä, koska anturi oli rikkoutunut. Kuvassa 95 on kohde mittauspisteen läheisyydestä kumpaankin suuntaan kuvattuna. Kuvista nähdään, että suunnasta 1 tultaessa mittauspistettä lähestytään omalla kaistalla kaarteessa ajaen ja suunnasta 2 tultaessa ajetaan alamäkeen koukaten toiselle kaistalle. Kuvassa 97 on esitetty kuormitusajoneuvojen ajolinjat ylityksillä. Kuvasta 96 nähdään ajolinjojen olleen erilaiset eri suuntaan ajettaessa. Parillisilla ylityksillä eli suuntaan 2 ajettaessa akselin renkaat ylittivät anturin kapeammalta alueelta. Suunnasta 2 ajettaessa mittauspistettä lähestytään pitemmältä suoralta vastaantulijoiden kaistalla, kun taas suunnasta 1 tultaessa mittauspiste on kaarteeseen jälkeen.



Kuva 95 Kyyjärven kohde 30.5.2017. Vasemman puoleisen kuvan suunnasta lähestyttäessä ajetaan suuntaan 1 ja oikean puoleisen kuvan suunnasta taas suuntaan 2.

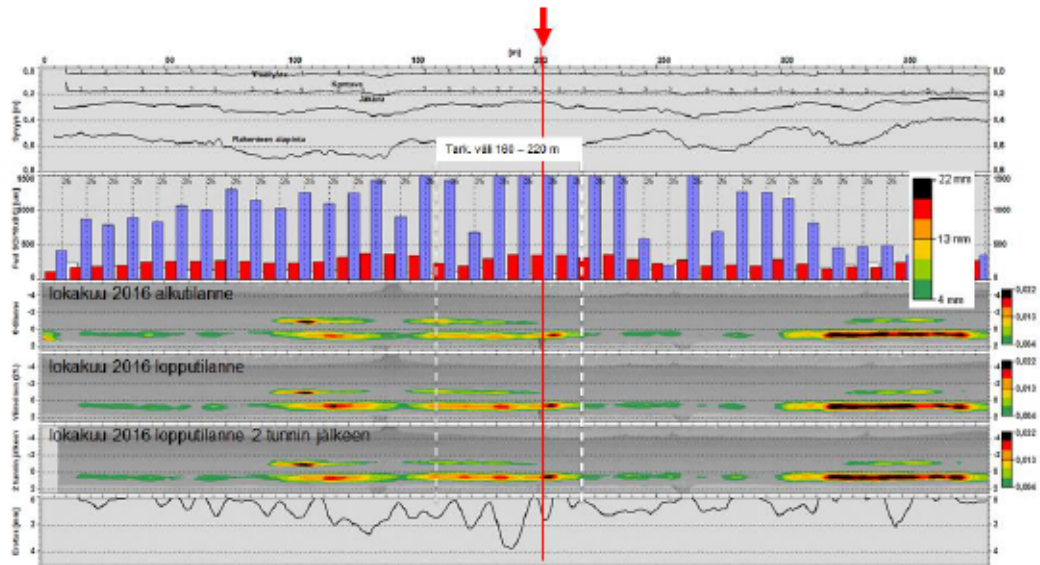


Kuva 96 Kyyjärvellä 30. ja 31.5.2017 kuormitusajoneuvojen akseleiden tai telin renkaiden keskikohtien sijainti suhteessa anturiin etäisyyslaseilla määritettynä. Tuplaviivan päällä paripyörä oli keskellä anturia. Parittomat kuormitukset on ajettu suuntaan 1 ja parilliset suuntaan 2.

4.6.3 Urautuminen laserkeilauksella

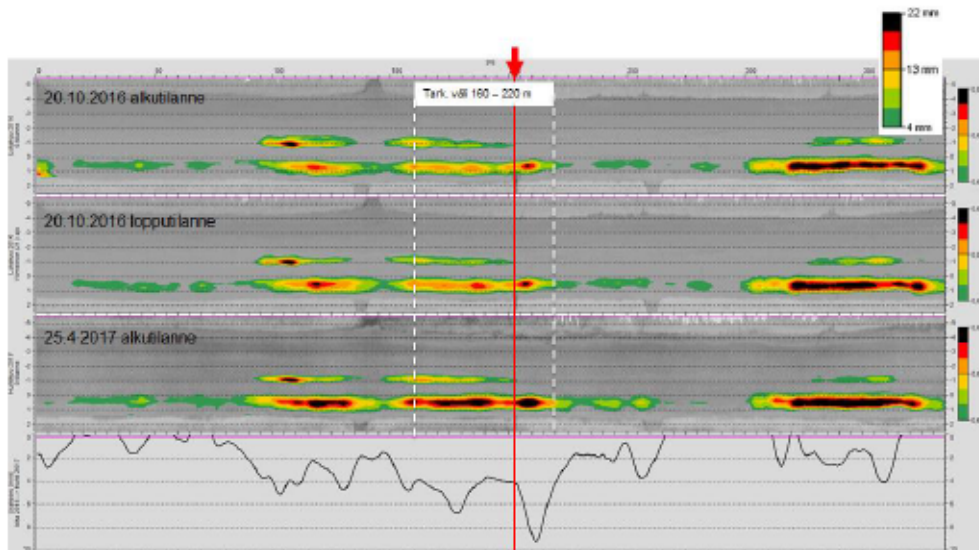
Kuvassa 97 on esitetty RDSV-urasyvyyskartat turpeisella pohjamaalla sijaitsevalta erittäin ohuesti päällystetyltä Kyyjärven (Mt 16863) kohteen mittausjaksolta 20.10.2016. Ylimmässä urakartassa on tilanne ennen kuormitusajoja, keskimmaisessä tilanne välittömästi viimeisen ajon jälkeen ja alimmassa tilanne kaksi tuntia viimeisen ajon jälkeen. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä. Näiden yläpuolella ylimpänä on esitetty lisäksi maatutkatatista tulkitut rakennekerrokset ja toisena ylhäältä TSD-mittauksen (vuodelta 2015) perusteella lasketut kantavuusindeksit. TSD-tuloksissa punaiset pylväät kuvaavat pintakantavuusindeksiä (SCI) ja siniset pylväät pohjamaan kantavuusindeksiä (BCI x 10). Tiehen asennetun siirtymäanturin sijainti on merkitty punaisella nuolella ja pystyviivalla.

Tuloksia tarkasteltiin erityisesti 60 metrin matkalla paaluvälillä 160–220. Urasyyvyyskarttojen välillä havaitaan pieniä eroavaisuuksia, erityisesti juuri kaikkein pehmeimän pohjamaan kohdalla paaluvälillä 160–220 m, mutta käytännössä eroja on melko vaikea erottaa visuaalisesta kartasta, jossa yksi väri vastaa kolmea millimetriä. Kuvassa alimmaisena esitetään lisäksi mittausajojen aikana tapahtunutta oikean ajouran maksimiurasyvyyden kasvua. Tästä kuvaajasta havaitaan, että urasyvyys oli kasvanut monin paikoin. Paaluväliltä 160–220 m laskettu urakasvun keskiarvo oli 1,13 mm. Urakasvu tiehen asennetun siirtymäanturin kohdalla oli noin 1,8 mm, mikä vastaa varsin hyvin anturilla mitattua tien pinnan pysyvää pystysiirtymää.



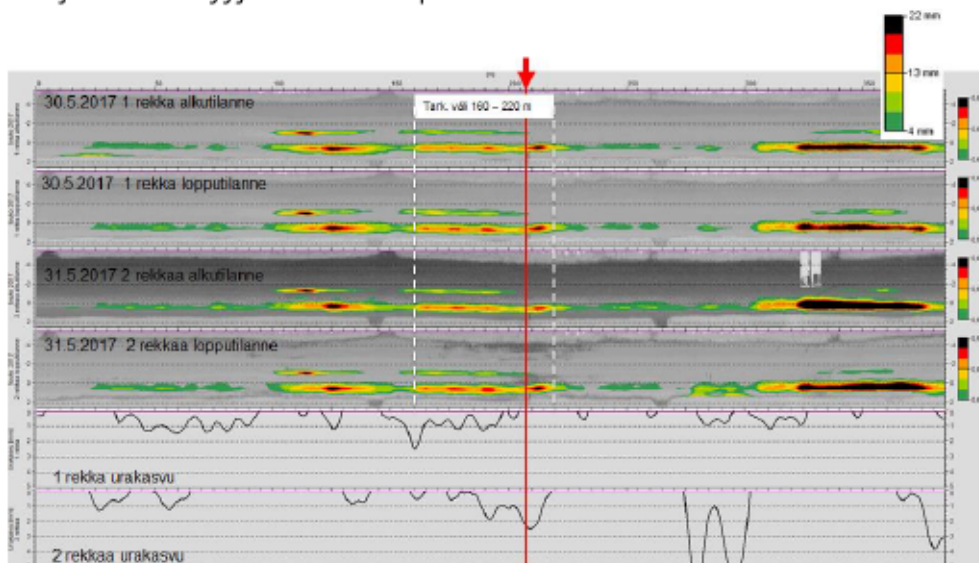
Kuva 97 RDSV-urasyvyyskartat Kyyjärven kohteelta (Mt 16863) 20.10.2016. Ylimmässä urakartassa on tilanne ennen kuormitusajoja, keskimmaisessä tilanne välittömästi viimeisen ajon jälkeen ja alimmassa tilanne kaksi tuntia viimeisen ajon jälkeen. Karttojen taustalla näkyy laserkeilaimen remissiodata päällysteestä. Tiehen asennetun siirtymäanturin kohta on merkitty punaisella nuolella ja pystyviivalla. Näiden yläpuolella ylimpänä on esitetty lisäksi maatutkadatasta tulkitut rakennekerrokset ja toisena ylhäältä TSD-mittauksen (vuodelta 2015) perusteella lasketut kantavuusindeksit. TSD-tuloksissa punaiset pylväät kuvaavat pintakantavuusindeksiä (SCI) ja siniset pylväät pohjamaan kantavuusindeksiä (BCI x 10). Alimmassa ikkunassa esitetään mittausajojen aikana tapahtunutta maksimiurasyvyyden kasvua.

Kuvassa 98 on esitetty RDSV-urasyvyyskartat Kyyjärven (Mt 16863) mittausajalta 20.10.2016. ennen kuormitusajoja ja niiden jälkeen, sekä lisäksi 25.4.2017 mitattu alkutilanne. Talven aikana (lokakuun lopputilanteesta huhtikuun alkutilanteeseen) urasyvyys koko kohteen matkalla on kasvanut keskimäärin 1,75 mm. Paaluvälillä 16–220 m urasyvyys on kasvanut talven aikana keskimäärin peräti 5,18 mm. Todennäköisesti osa tästä urakasvusta johtuu routanousun aiheuttamasta tien pinnan muutoksesta, sillä runsas kuukausi myöhemmin toukokuun lopussa (jolloin routa oli kokonaan sulanut) tehtyjen mittausten alkutilanteessa urasyvyys on taas pienempi (kuva 100).



Kuva 98 RDSV-urasyvyyskartat Kyyjärven (Mt 16863) kohteelta 20.10.2016 ennen kuormitusajoja ja niiden jälkeen, sekä lisäksi 25.4.2017 mitattu alkutilanne. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja pystyviivalla.

Kuvassa 99 on esitetty RDSV-urasyvyyskartat Kyyjärven (Mt 16863) mittausjaksolta toukokuun lopussa 2017 yhden ja kahden rekkan päiviltä ennen kuormitusajoja ja niiden jälkeen. Yhdellä rekalla kuormitettaessa urakasvun keskiarvo paaluvälillä 160–220 m oli 0,35 mm, ja seuraavana päivänä kahdella rekalla kuormitettaessa 0,69 mm. Tästä saadaan kertoimeksi noin 2. Kyyjärven kohteen tapauksessa, jossa päällysteen paksuus oli 30–40 mm ja tierakenteen paksuus noin 0,6 m turpeisella pohjamaalla, urautuminen oli siis ollut noin kaksinkertaista kahden rekkan ajaessa peräkkäin verrattuna yksi rekka kerrallaan ajamiseen, vaikka kuljetettu kuorma oli ollut saman suuruisen. Taulukkoon 2 on vielä koottu yhteen urakasvun määrä rekkan ylityskertaa kohden eri ajankohtina Kyyjärven kohteen paaluväliltä 160–220 m.



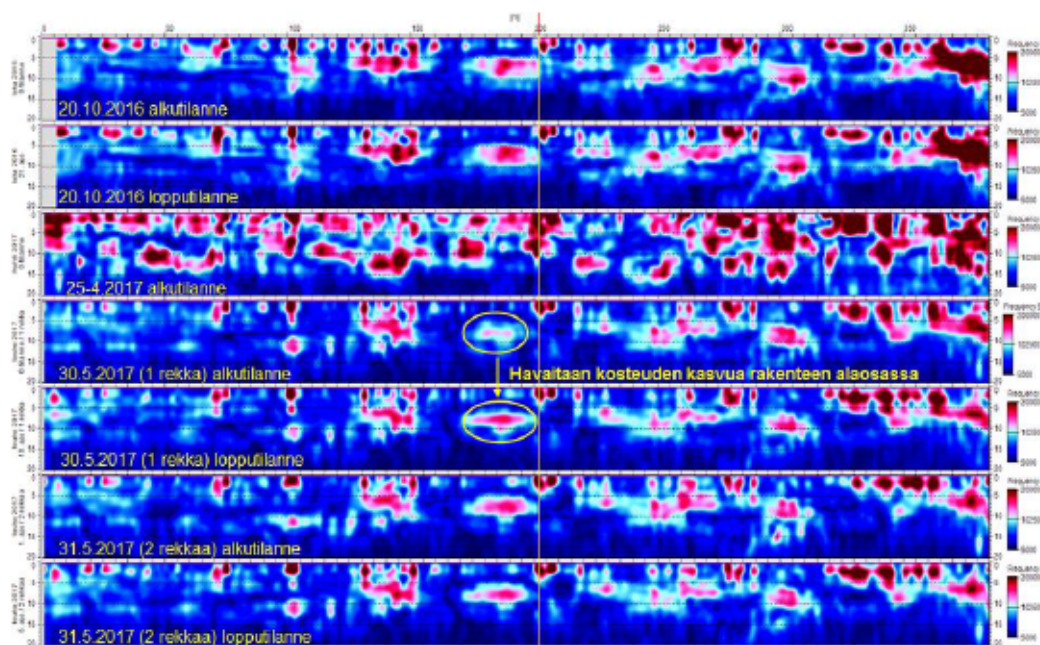
Kuva 99 RDSV-urasyvyyskartat Kyyjärven (Mt 16863) kohteelta toukokuun lopussa 2017 yhden ja kahden rekkan päiviltä ennen kuormitusajoja sekä niiden jälkeen. Percoaseman kohta on merkitty punaisella nuolella ja pystyviivalla.

Taulukko 2 Urakasvu määrä rekan ylityskertaa kohden eri ajankohtina paaluvälillä 160–220 m Kyyjärven kohteella, jossa päällysteen paksuus oli 30–40 mm ja tierakenteen paksuus noin 0,6 m turpeisella pohjamaalla. Vuonna 2016 ylitykset tehtiin 9-akselisella ja vuonna 2017 ajoneuvossa oli 7-akselia.

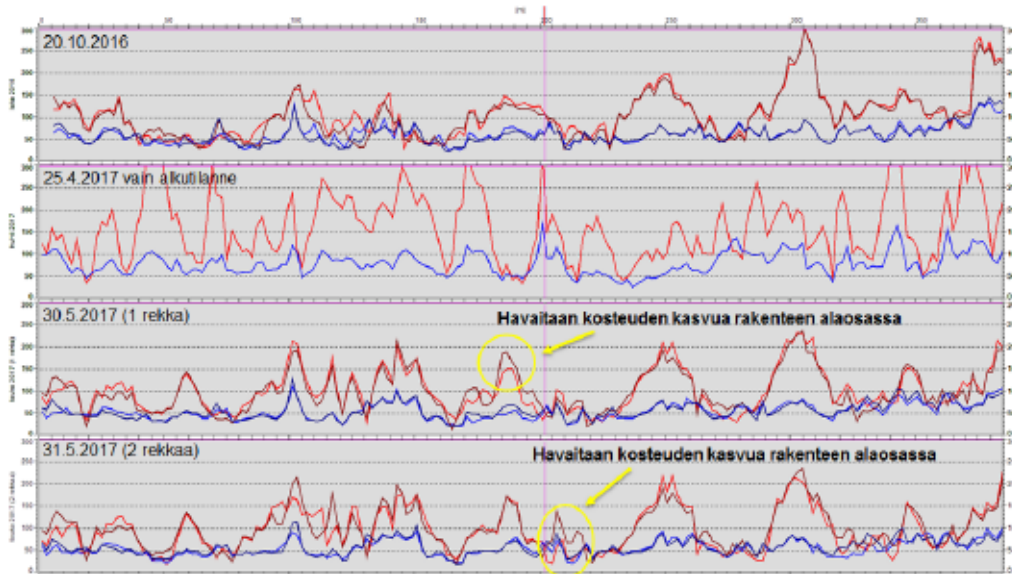
	urakasvu [mm]	ylityksiä [kpl]	urakasvu/rekka [mm]	
lokakuu 2016	1,13	21	0,054	ajettu noin 5 min välein
toukokuu 2017 1 rekka	0,35	10	0,035	ajettu noin 30 min välein
toukokuu 2017 2 rekkaa	0,69	5 (2 rekkaa ylityksellä)	0,069	ajettu noin 60 min välein

4.6.4 Kosteuden muutokset maatutkamittauksella

Maatutkan 400 MHz:n antennidatasta lasketut kosteusprofiilikuvat turpeisella pohjamaalla sijainneesta erittäin ohuesti päällystetystä noin 0,6 m paksuisesta tierakenteesta on esitetty kuvassa 100. Kuvassa on esitetty kosteusprofiilit neljänä eri ajankohtana: 20.10.2016 (1 rekka), 25.4.2017 (1 rekka), 30.5.2017 (1 rekka) ja 31.5.2017 (2 rekkaa). Kaikkina muina ajankohtina on esitetty tilanne ennen kuormitusajoja ja viimeisen ajon jälkeen, mutta huhtikuussa 2017 on vain mitattu alkutilanne. Kuvasta voidaan havaita, että 30.5.2017 yhdellä rekalla kuormitettaessa oli tapahtunut kosteuden kasvua tierakenteen alaosassa paikallisesti noin paaluvälillä 170–200 m. Tämä voidaan todeta myös kuvassa 101 esitetyistä MDI-arvojen kuvaajista. Kyseisestä kohdasta mitattiin myös uran kasvua. (kuva 99) Rakenteen alaosan MDI:ssä oli tapahtunut kasvua kyseisessä kohdassa. Seuraavana päivänä kahdella rekalla kuormitettaessa tierakenteen kosteus ei ollut kuitenkaan enää entisestään lisääntynyt, vaan kosteustila pysyi kuormitusten ajan jokseenkin edellisen päivän lopputilanteen tasolla.



Kuva 100 Maatutkan MDI (moisture damage index) analyysitulokset Kyyjärven kohteelta (Mt 16863). Kuvassa on esitetty tilanne ennen kuormitusajoja sekä viimeisen ajon jälkeen neljänä eri ajankohtana. Pystymittakaava on nanosekunti (ns), jossa yksi nanosekunti vastaa noin 60 mm paksuutta. Punaiset kohdat kuvaavat korkeampaa materiaalin kyllästysastetta. Tiehen asennetun siirtymäanturin kohta on merkitty punaisella nuolella ja keltaisella pystyviivalla.



Kuva 101 MDI-arvojen kuvaajat Kyyjärven kohteelta (Mt 16863). **punainen = rakenteen alaosan MDI / sininen = Total MDI** ja vaaleampi väri = tilanne ennen kuormitusajoja / tummempi väri = tilanne viimeisen ajon jälkeen.

4.6.5 Yhteenveto Kyyjärven mittauksista

- Toukokuussa 2017 tunnin välein kaksi peräkkäin ajanutta rekkaa aiheuttivat kaksinkertaisen urakasvun verrattuna edellisenä päivänä puolen tunnin välein yksin ajaneeseen rekkaan nähden turpeisella pohjamaalla sijainneeseen 30–40 mm päällysteellä olevaan noin 0,6 m paksuiseen tierakenteeseen 60 metrin tarkasteluvälillä.
- Lokakuussa 2016 9-akselinen rekka aiheutti hieman isomman urakasvun akselia kohden ja kuin toukokuussa 7-akselinen rekka ja suhteessa suuremman verrattaessa kulkenutta rekkaa kohden. Tosin syksyn 2016 keskimäärin 8 minuutin kuormitusväli oli tiheämpi kuin kevään 2017 30 min.
- Kosteutta pumpputui paikallisesti pl 170–200 m 30.5.2017, mutta kosteuden ei havaittu kasvavan enää 31.5.2017. Ura myös kasvoi kyseissä kohdassa 30.5.2017, mutta ei juuri lainkaan 31.5.2017.

5 Johtopäätöksiä ja pohdintaa mittaus- tuloksista

5.1 Kosteus (dielektrisyys, huokosvedenpaine ja kosteus maatutkalla)

Vuosina 2016–2017 huokosvedenpaineantureilla tehdyissä mittauksissa ei havaittu merkittäviä muutoksia kuormitusten aikana lukuun ottamatta roudan sulamisen alkuvaiheen mittauksia, joissa anturit olivat vielä jäässä olevien rakennekerrosten alapuolella. Jäätynneen rakenteen alta mitatuilla huokosvedenpaineiden muutoksilla on epätodennäköisesti vaikutusta sulana olevan tierakenteen osan käyttäytymiseen.

Mitatuissa dielektrisyyksissä kuormitukset eivät aiheuttaneet merkittäviä hetkellisiä tai pitkän aikavälin muutoksia.

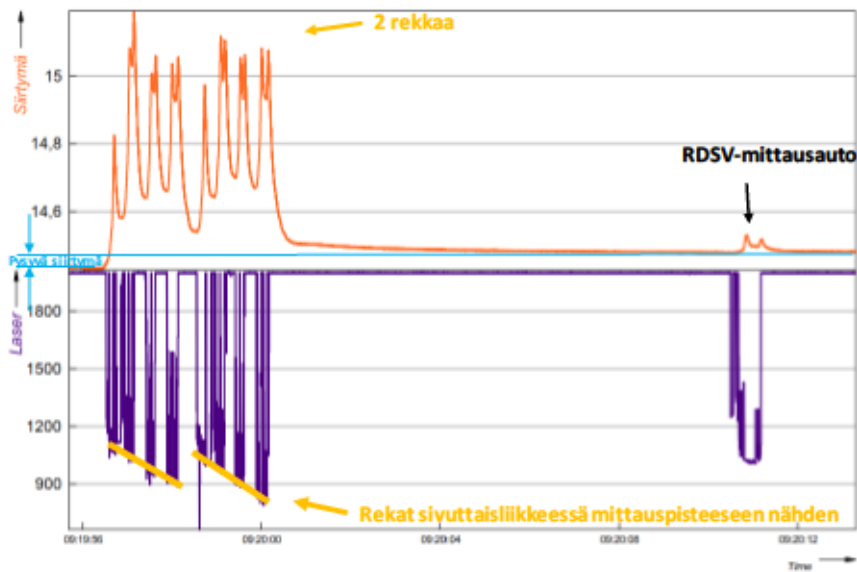
Maatutkasignaalin taajuusspektrin muutoksiin perustuvassa MDI-analyysissä havaittiin kahdessa päällystetyssä kohteessa (Inari ja Kyyjärvi) kosteuden lisääntymistä. Kosteuden lisääntyminen ei tapahtunut tierakenteisiin sijoitettujen antureiden lähellä. Kohdissa, joissa havaittiin kosteuden lisääntymistä, myös urasyvyys kasvoi selkeästi.

5.2 Pysyvät siirtymät ja urat

5.2.1 Miten pysyvien siirtymien mittaustuloksiin vaikuttavat muut ajoneuvot?

Mittaustuloksia analysoitaessa havaittiin monen tekijän vaikuttavan ylityksen jälkeiseen pysyvään siirtymään. Varsinaisen kuormitusrekan lisäksi pysyvään tien pinnan pystysiirtymiin muodonmuutokseen vaikuttaa jo aiemmin mainitut ajoneuvojen ajo-
linjat (kuva 95) ja ajoneuvojen ajojärjestys (kuvat 57, 60, 63 ja 83). Lisäksi, kun tarkoituksena oli määrittää pysyvä siirtymä noin 30 sekuntia kuormitusrekan ylityksen jälkeen, ehti mittauskohtaan tässä ajassa myös muita ajoneuvoja.

Tutkimuskohteilla jokaisen oman kuormitusajoneuvon ylityksen jälkeen mitattiin RDSV-autolla muutoksia tierakenteessa. Mittauspaikasta ja ylityssuunnasta riippuen RDSV-auto oli mittausanturin kohdalla mahdollisesti jo reilun 10 sekunnin kuluttua. Mikäli se on kulkenut täsmälleen samaa uraa kuin kuormitusajoneuvo, pysyvissä siirtymissä ei havaittu juurikaan muutoksia. Kuvassa 102 on esitetty esimerkki kahden peräkkäin ajaneen rekan ja RDSV-auton ylityksen aiheuttamista päällysteen alapinnan siirtymistä ja ajoneuvojen sivuttaisetäisyyksistä etäisyyslaserilla mitattuna Karsulassa 17.5.2017. Kuvassa rekkojen ja RDSV-auton renkaat ovat menneet siirtymäanturin päältä, vaikka rekat ovat olleet siirtymäanturiin nähden sivuttaisliikkeessä. Kuvasta nähdään rekkojen aiheuttaneen pysyvää siirtymää, johon 10 sekuntia rekkojen perässä tulleella RDSV-autolla ei ollut havaittavaa vaikutusta tai erittäin pieni lisäävä vaikutus pysyvään siirtymään.



Kuva 102 Kahden peräkkäin ajaneen rekan ja RDSV-auton ylityksen aiheuttamat päällysteen alapinnan siirtymät ja ajoneuvojen sivuttaisetäisyydet etäisyyslaserilla mitattuna Karstulassa 17.5.2017. Mittauspäivän ensimmäinen oma kuormitus.

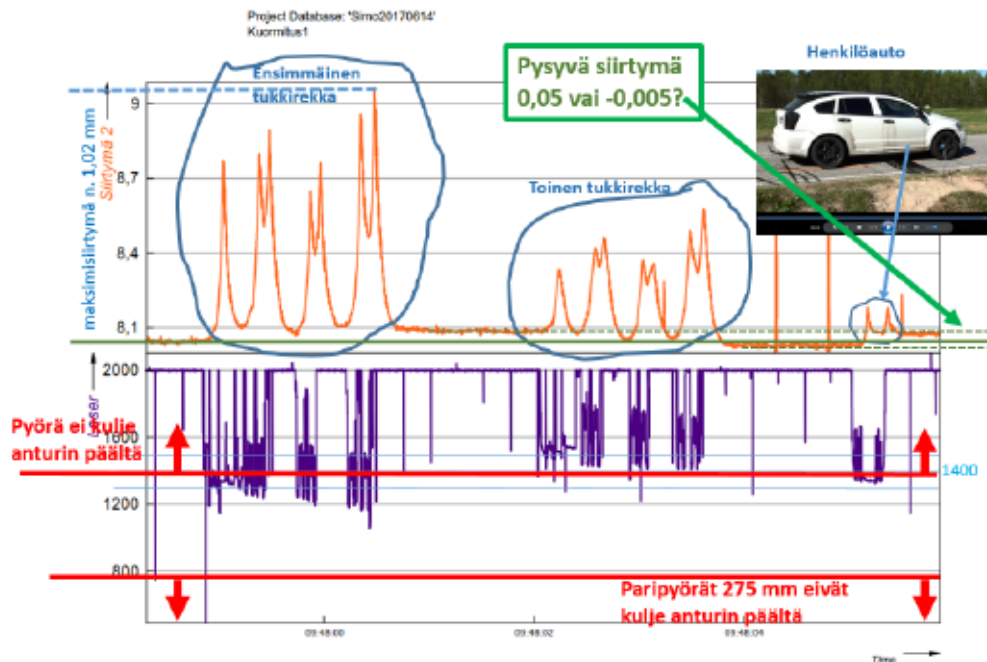
Kuvassa 103 on esitetty esimerkki rekan ja RDSV-auton ylityksen aiheuttamista päällysteen alapinnan siirtymistä ja ajoneuvojen sivuttaisetäisyyksistä etäisyyslaserilla mitattuna Simossa 27.4.2017. Kuvassa rekan ajolinja on suorassa siirtymäanturiin nähden. Rekan renkaat ovat kulkeneet siirtymäanturin päältä ja RDSV-auton renkaat ovat menneet joko siirtymäanturin päältä tai hyvin läheltä. Kuvasta nähdään rekan aiheuttaneen pysyvää siirtymää, johon noin 30 sekuntia rekan perässä tulleella RDSV-autolla oli pieni pysyvään siirtymää vähentävä vaikutus.



Kuva 103 Rekan ja RDSV-auton ylityksen aiheuttamat päällysteen alapinnan siirtymät ja ajoneuvojen sivuttaisetäisyydet etäisyyslaserilla mitattuna Simossa 27.4.2017. Mittauspäivän 7. oma kuormitus.

Kuvassa 104 on esitetty ajoneuvojen aiheuttamat päällysteen alapinnan siirtymät ja ajoneuvojen etäisyydet laserista, kun kahta kuormitusajoneuvoa seuraa heti perässä henkilöauto. Kuvasta nähdään, että jälkimmäinen rekka ei ole ajanut anturin päältä ja sen aiheuttamat siirtymät ovat selvästi pienemmät kuin ensimmäisen rekan vaikka ovat muodoiltaan identtiset. Heti rekkojen kuormitusajon jälkeen päällysteen alapinnan taso on noussut, mutta vajaan kaksi sekuntia jälkimmäisen rekan perässä tullut mittausanturiin päältä kulkenut henkilöauto on aiheuttanut pysyvän siirtymän, joka palauttaa siirtymäanturin lukeman tasolle, jossa se oli heti ensimmäisen rekan ylityk-

sen jälkeen. Merkittävää pysyvän siirtymän muodostumisessa henkilöauton ylityksessä lienee se, että henkilöauto seuraa lähellä edellä ajavia raskaita ajoneuvoja, jotka ovat saaneet tierakenteen rakeet edestakaiseen liikkeeseen ja sitomattoman kerroksen rakeet ovat toistensa suhteen vielä herkästi liikkuvassa tilassa. Voidaankin kysyä, että mikäli henkilöauton ylitys olisi tapahtunut myöhemmin, olisiko sen aiheuttama pysyvä siirtymä ollut pienempi?



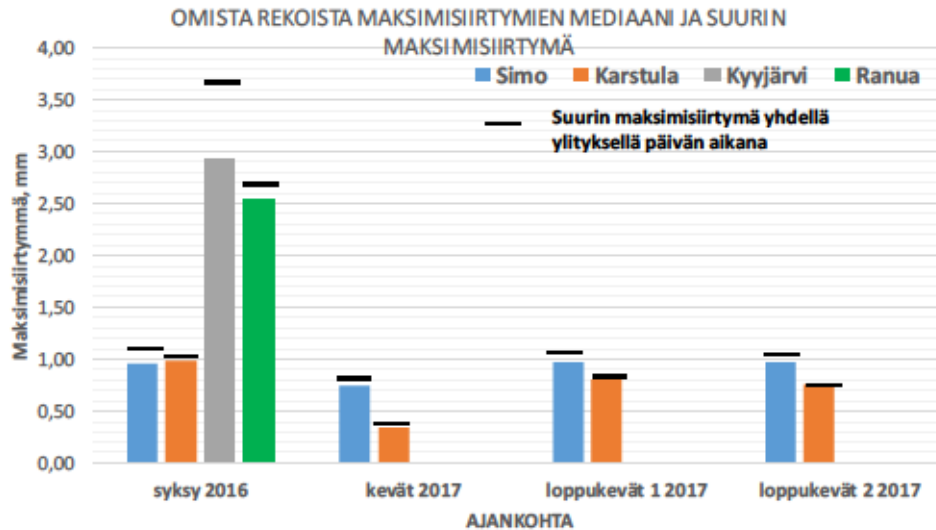
Kuva 104 Kahden peräkkäin ajaneen rekan ja henkilöauton ylityksen aiheuttamat päällysteen alapinnan siirtymät ja ajoneuvojen sivuttaisetäisyydet etäisyyslaserilla mitattuna Simossa 14.6.2017.

Tutkimustuloksia analysoidessa vaikutti selkeästi, että edellisen raskaan ajoneuvon ylityksestä kuluneella ajalla seuraavan ajoneuvon ylitykseen oli myös merkitystä määritettyyn pysyvään siirtymään. Esimerkiksi Ranuan soratiekohteella (kuva 43) tämä tuli hyvin selkeästi esille. Tierakenteen ollessa parempilaatuinen tämä vaikutus oletettavasti pienenee. Lisäksi pohjamaan materiaalilla (turve/moreeni) saattaa olla vaikutusta raskaan ajoneuvon pysyvän siirtymän määrittämiseen tarvittavaan aikaan.

5.2.2 Kohteilla mitatut siirtymät

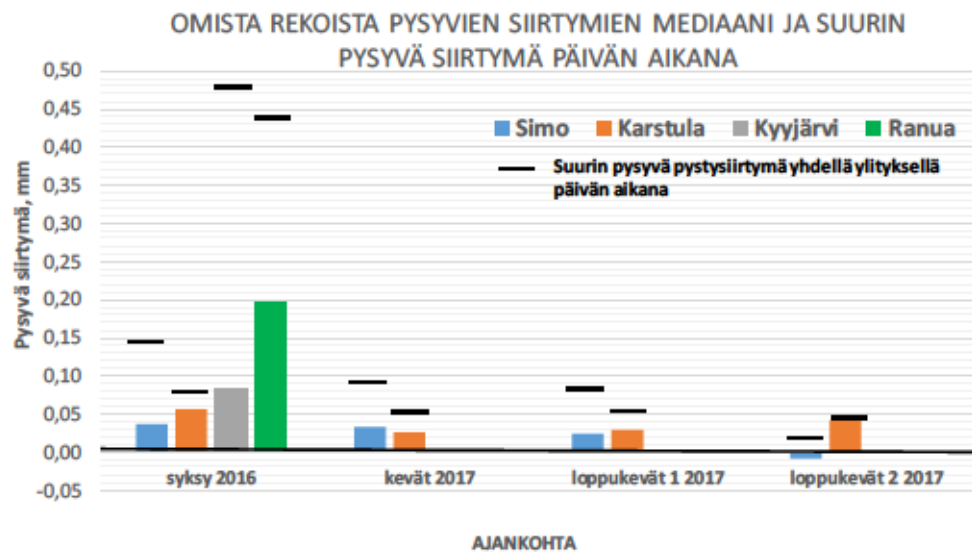
Kuvassa 105 on esitetty koekohteilla mittauspäivän aikana omien kuormitusajoneuvojen ylityksistä mitatut suurimmat maksimisiirtymät ja maksimisiirtymien mediaanit. Yllättäen Kyyjärven ohutpäällysteisellä kohteella oli syksyllä suurimmat maksimisiirtymät, selkeästi suuremmat kuin Ranuan soratiekohteella. Kyyjärvellä suurin maksimisiirtymä erosi prosentuaalisesti eniten maksimisiirtymän mediaanista, koska päivän mittauksen edetessä mitatut maksimisiirtymät pienenevät (kuva 92). Kuvasta 105 havaitaan keväällä 2017 Simon ja Karstulan mittauksissa olleen pienemmät maksimisiirtymät kuin muina kertoina johtuen osittain jääntyneenä olleesta tierakenteesta. Karstulassa maksimisiirtymät pienenevät selkeästi enemmän kuin Simossa, mikä on todennäköisesti johtunut Karstulan kohteen parempilaatuisesta tierakenteen yläosasta ja Karstulan kohteen alla olevasta turpeesta. Syksyllä 2016 Karstulan ja Simon kohteiden maksimisiirtymät olivat noin 1 mm. Loppukevällä Simossa maksimisiirtymät

olivat edelleen samalla tasolla, mutta Karstulassa hieman pienempiä. Pääasiallisesti voidaan kuvan 105 perusteella kiteyttää odotetusti maksimisiirtymien olleen loogisesti heikommassa tierakenteissa suurempia.



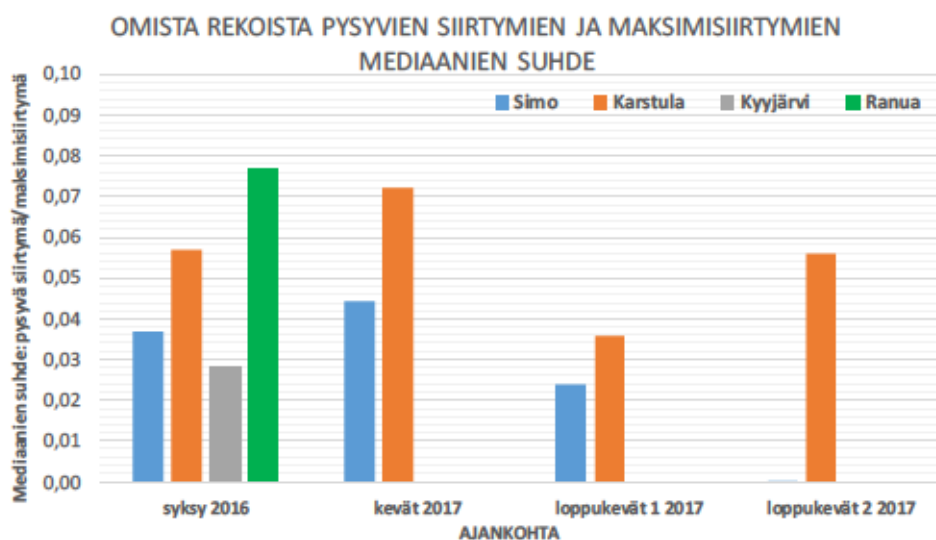
Kuva 105 Koekohteista omien kuormitusajoneuvojen ylityksistä mittauspäivän aikana mitatut suurimmat maksimisiirtymät ja maksimisiirtymien mediaanit.

Kuvassa 106 on esitetty koekohteilla mittauspäivän aikana omien kuormitusajoneuvojen ylityksistä mitatut suurimmat pysyvät siirtymät ja pysyvien siirtymien mediaanit. Karkeasti yleistäen pysyvien siirtymien mediaanit olivat alle puolet suurimmista pysyvistä siirtymistä. Tästä poikkeuksena oli rakenteeltaan paras kohteista eli Karstulan kohde, jossa mediaanit olivat yli puolet suurimmista pysyvistä siirtymistä. Suurimmat pysyvät siirtymät mitattiin odotetusti heikoimmista tierakenteista Kyyjärveltä ja Ranualta. Vaikka Kyyjärven ohutpäällysteisestä kohteesta mitattiin suurin yksittäinen pysyvä siirtymä, kohteen pysyvien siirtymien mediaani oli huomattavasti pienempi kuin Ranuan soratiellä. Hieman yllättäen rakenteeltaan paremmassa Karstulan kohteessa pysyvien siirtymien mediaani oli suurempi kuin Simon kohteessa. Tämä johtunee osittain muun liikenteen vaikutuksesta Simon kohteella sekä näiden kohteiden pohjamaiden eroavaisuuksista Simon kohteen pohjamaan ollessa hiekkaa ja Karstulan kohteen turvetta.



Kuva 106 Koekohteista omien kuormitusajoneuvojen ylityksistä mittauspäivän aikana mitatut suurimmat ajoneuvokohtaiset pysyvät siirtymät ja pysyvien siirtymien mediaanit.

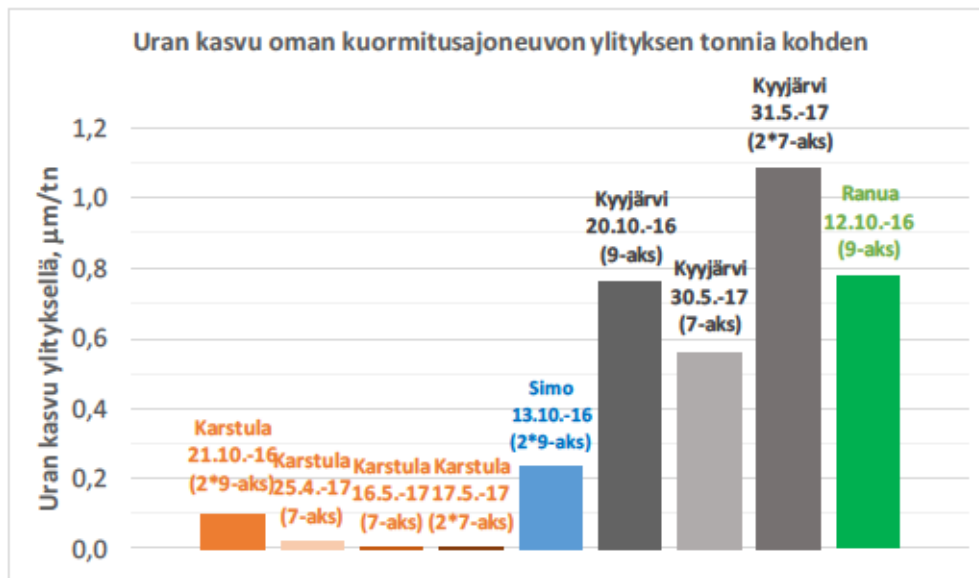
Kuvassa 107 on esitetty koekohteilta mitattujen maksimipystysiirtymien mediaanien ja pysyvien pystysiirtymien mediaanien suhde. Kuvasta nähdään soratiellä pysyvän siirtymän kasvun olleen suurinta suhteessa maksimisiirtymään. Kevään 2017 mittauksissa, jolloin tierakenne oli sulanut noin 0,5 m syvyyteen, havaittiin kohteidensa suurimmat pysyvien siirtymien ja maksimisiirtymien suhteet, mikä indikoi tierakenteen alttiutta pysyville siirtymille pohjamaan ollessa jäässä. Loppukevään 2 2017 Simon kohteen arvo oli negatiivinen johtuen oman kuormitusajoneuvon ylitysten (5 kpl) vähyydestä ja ajolinjojen vaihtelusta sekä erittäin runsaasta muusta raskaasta liikenteestä.



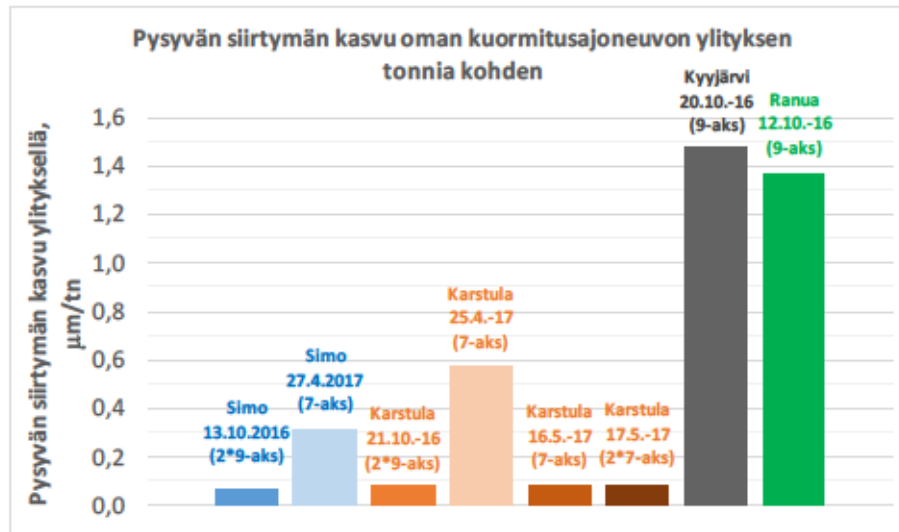
Kuva 107 Omien kuormitusajoneuvojen ylityksistä määritettyjen maksimipystysiirtymien ja pysyvien pystysiirtymien mediaanien suhteet.

Kuvassa 108 on esitetty koekohteilla mittausalueen laserkeilauksesta määritetyt urakasvut omien kuormitusajoneuvojen ylityksen 1000 kg kohden. Kuvasta on jätetty pois Simon kohde, koska 30. ja 31.5.2017 muun liikenteen vaikutus oli ollut huomattava, ellei jopa määräävä, pysyvien siirtymien kasvuun ja 27.4.2017 uran mittaukseen on vaikuttaneet päivän mittaan muuttunut lumi- ja vesitilanne päällysteen pinnalla. Kuvasta nähdään urakasvun olleen Karstulassa 2017 tuskin havaittavaa, mutta syksyllä 2016 selkeästi mitattava. Kuvasta näkyy myös selkeästi Kyyjärven kohteella urakasvun olleen kaksinkertainen 31.5.2017 ajettaessa kahdella rekalla peräkkäin verrattuna tilanteeseen, jossa sama massa on ajettu yhdellä rekalla 30.5.2017 samassa ajassa. Kuvasta nähdään 20.10.2016 9-akselisella rekalla kuormitettaessa urakasvun olleen suuruudeltaan vuoden 2017 mittausten välissä. Tällöin on kuitenkin huomattava kuormitustiheyden olleen vuonna 2016 noin lähes kahdeksankertainen vuoteen 2017 verrattuna.

Kuvassa 109 on esitetty koekohteilla mittauspisteestä määritetyt pysyvät siirtymät omien kuormitusajoneuvojen ylityksen 1000 kg kohden. Kuvasta on jätetty pois Simon kohde, koska 30. ja 31.5.2017 muun liikenteen vaikutus oli ollut huomattava, ellei jopa määräävä, uran kasvuun. Kyyjärven siirtymäanturin rikkoutumisen vuoksi kuvassa ei ole tietoa Kyyjärven pysyvistä siirtymistä vuodelta 2017. Kuvasta nähdään pysyvän siirtymän olleen Karstulassa mittauspäivinä sama paitsi 25.4.2017, jolloin pysyvät siirtymät olivat moninkertaiset tierakenteen ollessa sulanut noin 0,5 metrin syvyyteen. Sama ilmiö oli havaittavissa Simon kohteen 13.10.2016 ja 27.5.2017 mittausten kohdalla. Kuvasta näkyy vuonna 2016 Ranuan soratiellä ja ohutpäällysteisellä Kyyjärven kohteella pysyvien siirtymien kasvun ylitse kuljetettua tonnia kohden olleen yli kymmenen kertaa suuremman kuin Simon ja Karstulan kohteissa.

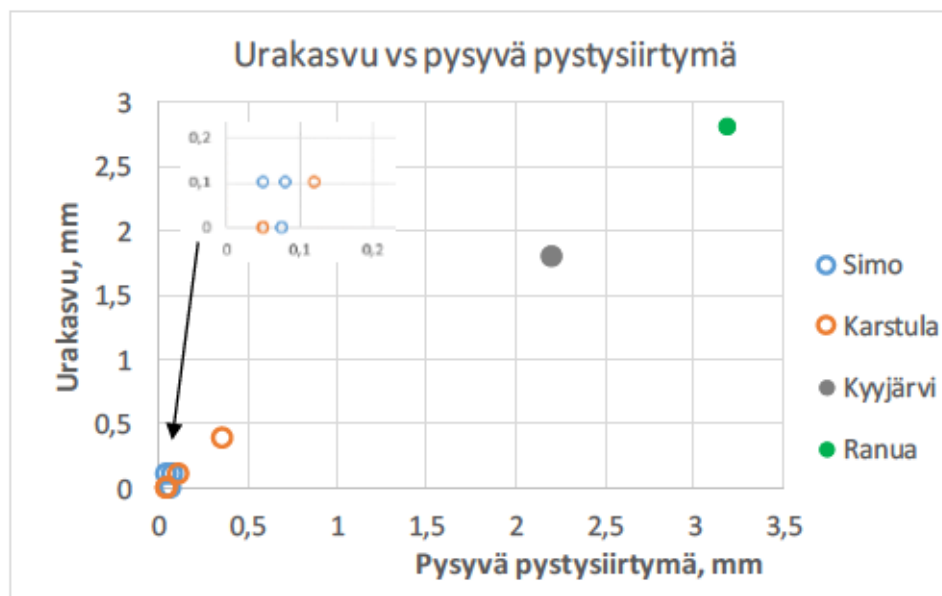


Kuva 108 Koekohteista, joissa muu liikenne ei suuresti vaikuttanut mittaustuloksiin, laserkeilaimella määritetyt urakasvut oman kuormitusajoneuvon ylityksen massaa kohden.



Kuva 109 Koekohteista, joissa muu liikenne ei suuresti vaikuttanut mittaustuloksiin, määritetyt pysyvien siirtymien kasvat mittauspisteessä oman kuormitusajoneuvon ylityksen massaa kohden.

Kuvassa 110 on esitetty mittauspäivinä mitatut pysyvät pystysiirtymät ja urakasvu. Laserkeilaimella urakasvun erottelukyky oli 0,1–0,15 mm suuruusluokkaa, joten kuvaajaa varten urakasvulle on hyvin pienillä urakasvulle valittu joko arvo 0,0 mm tai 0,1 mm. Kuvassa ei ole mukana Simon 27.4.2017 ja Karstulan 17.5.2017 mittauspäiviä, joissa vesi olivat haitanneet mittaustarkkuutta. Kuvasta havaitaan pysyvän pystysiirtymän ja laserkeilaimella mitatun urakasvun vastaavan toisiaan hyvin.



Kuva 110 Koekohteista mittauspäivän aikana määritetyt pysyvät pystysiirtymät ja urakasvu mittaasanturin kohdalta.

Siirtymä- ja etäisyysmittausten perusteella ajolinjojen muuttuessa tierakenteen materiaali näyttäisi liikkuvan päällysteen pinnan alla edestakaisena liikkeenä. Liikkeen suurentuessa ylitystä kohden se todennäköisesti sileyttää ja hioo materiaalien rakeiden pintoja. Tämä hioutuminen lisää kolloidista raekokoa olevien hiukkasten määrää tien rakennekerroksissa ja muuttaa kerroksen materiaalia kosteustilaherkemmäksi. Pitkällä aikavälillä raepintojen hioutuminen vähentää myös materiaalien leikkauslujuutta. Leikkauslujuuden pienentyminen ja kosteustilaherkyyden tuoma lisävesi yhdessä heikentävät materiaalin kykyä vastustaa leikkausmuodonmuutoksia ja edistävät näin pysyviä muodonmuutoksia tierakenteessa. Tämän vuoksi erityisesti kantavan kerroksen materiaalin laatuun on jatkossakin kiinnitettävä huomiota varsinkin teillä, joilla kulkee runsaasti raskasta liikennettä.

Ylitysten ajolinjojen vaihteluiden aiheuttamasta tiessä olevien materiaalien edestakaisesta siirtymisestä johtuen voidaan olettaa, että tässä tutkimuksessa mitatut teoreettiset pysyvät siirtymät ovat suurempia ainakin pienellä kuormitusotannalla verrattuna tilanteeseen, jossa ajoneuvojen oletetaan ajaneen aina täsmälleen samalla ajouralla. Samalla tavalla voidaan olettaa, että tässä tutkimuksessa mitatut todelliset pysyvät siirtymät ovat pienempiä ainakin pienellä kuormitusotannalla verrattuna tilanteeseen, jossa ajoneuvojen oletetaan ajavan aina täsmälleen samalla ajouralla.

Ajourien ja niiden ohjauksen vaikutusta tien päällysrakenteen kannalta voidaan kiteyttää seuraavasti:

- Jos ihminen ajaa, niin renkaat eivät mene aivan samaa ajolinjaa, mikä on hyvä asia päällysrakenteen kannalta.
- Autonomisella rekalla, joka ohjataan aina samaa ajolinjaa pitkin, tämä yllä mainittu hyvä asia menetetään ja ura keskittyy aiempaa enemmän.
- Autonomisella rekalla, jonka ajolinjoja poikkeutetaan suhteessa toisiinsa autonomisiin rekkoihin, saatetaan päästä jopa parempaan tilanteeseen kuin ihmisen ajaessa riippuen ajolinjojen poikkeutukseen valituista ohjelmoinneista.

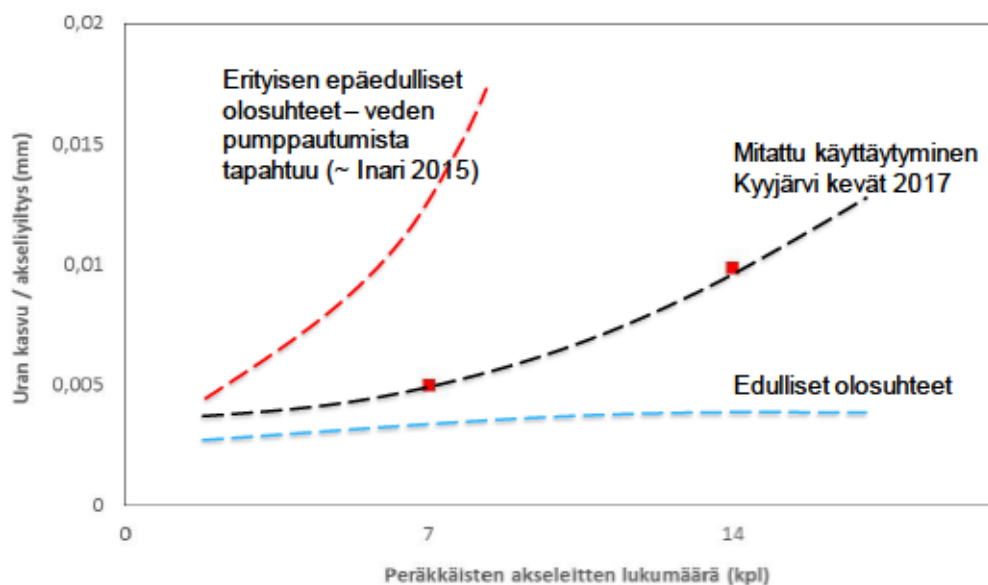
5.2.3 Akselimäärien vaikutus uran kasvuun

Yksi vuoden 2017 mittausten tavoitteista oli verrata yhden 7-akselisen rekan ja kahden peräkkäin ajaneen 7-akselisen rekan aiheuttamia vasteita tierakenteessa, kun samassa ajassa mittauskohteen yli kulkee kuitenkin sama omien kuormitusajoneuvojen akselimäärä ja massa. Simon kohteessa tämän vertailun esti runsas muu raskas liikenne ja peräkkäisten omien kuormitusajoneuvojen epätasaiset ajolinjat 13. ja 14.6.2017. Simossa mittauskaistalla kulki aamuisin noin kuusi täyttä tukkirekkaa tunnissa, mikä oli noin kolminkertainen määrä omien kuormitusajoneuvojen ylityksien määrään nähden. Muiden tukkirekkojen ylitykset harventuivat päivän edetessä.

Karstulassa tien rakenne oli mittauskohteista paras ja tien päällysteen alapinnan todellinen pysyvä siirtymä oli kummankin päivän (16. ja 17.5.2017) jälkeen sama 0,05 mm. Laserkeilauksella mitatut urakasvut olivat laitteen mittauskyvyn rajoilla. Lisäksi jälkimmäisen mittauspäivän lopulla alkanut tihkusade häiritsi mittausten tulkitsemistä. Laserkeilauksen perusteella voitaneen kuitenkin sanoa, ettei Karstulassa ollut käytännössä eroa uran muodostumiseen ajoiko yksi rekka mittauskohteen yli puolen tunnin välein tai kaksi rekkaa peräkkäin tunnin välein.

Kyyjärvellä, jossa tutkituista päällystetyistä kohteista tierakenne oli heikoin, 30. ja 31.5.2017 RDSV-auton laserkeilauksella mitattujen urasyvyyksien perustella kaksi peräkkäin tunnin välein ajavaa tukkirekkaa aiheutti suuremman urasyvyyden kuin puolen tunnin välein ajava yksi tukkirekka kulkiessaan suurin piirtein samalla ajolinjalla. Mitattu ero urasyvyydessä oli melkein kaksinkertainen (taulukko 2 ja kuva 108).

Kahden pisteen perusteella tehtävä oikean suuruusluokan antava interpolointi pisteiden ulkopuolella on erittäin haastava tehtävä. Raskailla ajoneuvoilla yleensä jo ensimmäinen akseli voi aiheuttaa merkittävän uran kasvun riippuen sen renkaista ja sillä olevasta massasta. Sitä seuraavat akselit joko lisäävät uran kasvua tai pitävät uran syvyyden ensimmäisen akselin aiheuttamalla tasolla. Riippuen tierakenteen olosuhteista suhteessa kuormituksen suuruuteen uran kasvu voi nopeutua tai jopa hiipua ylittävien akseleiden lukumäärän lisääntyessä johtuen esimerkiksi tierakenteen tiivistymisestä. Kuvassa 111 on esitetty erilaisia interpolointiskenaarioita uran kasvulle peräkkäisten akselien lukumäärän kasvaessa. Erityisen epäedullisissa olosuhteissa uran kasvu nopeutuu akselien ylitysten lukumäärän kasvaessa johtaen lopulta tierakenteen nopeaan vaurioitumiseen. Edullisissa olosuhteissa uran kasvu säilyy vakiona tai voi jopa hidastua. Kuvaan 111 on sijoitettu Kyyjärven mittaustulokset 30. ja 31.5.2017 päiviltä ja hahmoteltu suuntaa-antavasti uran kasvunopeutta akseleiden lukumäärän lisääntyessä.



Kuva 111 *Epäedullisissa olosuhteissa (joustava pohjamaa, pohjavedenpinta korkealla) uran kasvu akseliylitystä kohti nopeutuu ensimmäisten akselien määrittämään tasoon verrattuna. Edullisissa olosuhteissa (vahva rakenne, toimiva kuivatus) uran kasvunopeus säilyy vakiona tai voi jopa hidastua.*

6 Koekohteiden mallintaminen

6.1 Mallinnuksen tavoite

Mallinnuksen avulla pyrittiin selvittämään koekohteiden rakenteissa vallitsevaa jännitys- ja muodonmuutostilaa erilaisissa kosteusolosuhteissa. Mallinnuksen lähtökohtana käytettiin Raskaiden ajoneuvojen aiheuttamien tierasitusten tutkimiseen keskittyvien tutkimusprojektien aiemmissa vaiheissa käytettyjä rakennemalleja (esim. Haakana et. al. 2015). Tässä tutkimuksessa käytettävään malliin oli tarkoituksena lisätä myös tierakenteen luiskat ja rakenteen päällä liikkuva kolmiakselinen teli.

Mallinnuksen alkuvaiheessa kuitenkin todettiin, että tutkimuksen aiemmissa vaiheissa käytetty lähestymistapa johtaa epäuskottavaan jännitystilaan sitomattomissa rakennekerroksissa tilanteissa, joissa päällystekerroksen paksuus on noin 80–100 mm tai enemmän. Tämän vuoksi mallin rakennetta jouduttiin tarkastelemaan aiottua enemmän, ja varsinainen koekohteiden replikointi sai pienemmän painoarvon. Mallinnustarkasteluissa on valtaosiltaan rajauduttu Simon koekohteen tarkasteluun.

Päällystekerrosten mallintaminen päätettiin tarkastelujen jälkeen toteuttaa Platelementin avulla (kappale 6.2). Koska kyseessä on tasomainen elementti, olisi lähestymistavan verifioimiseksi tarvittu enemmän myös kentältä mitattuja jännitysmuutoksia rakennekerroksista. Kun päällysteen paksuus kasvaa noin 100 mm suuremmaksi, ei nyt käytettyä lähestymistapaa ole toistaiseksi verifioitu kenttädatan avulla. Oikein valittujen alapuolisten rakennekerrosten (käytännössä kantavan kerroksen yläosan) paksuus perustuu näin ollen tekijöiden tämänhetkiseen näkemykseen ja voi validin kenttädatan lisääntyessä muuttua. Käytännössä mallissa on 100 mm paksumpi kantava kerros kuin koekohteella fyysisesti, koska päällystelaattaelementillä on vain virtuaalinen paksuus.

6.2 Mallin rakenne

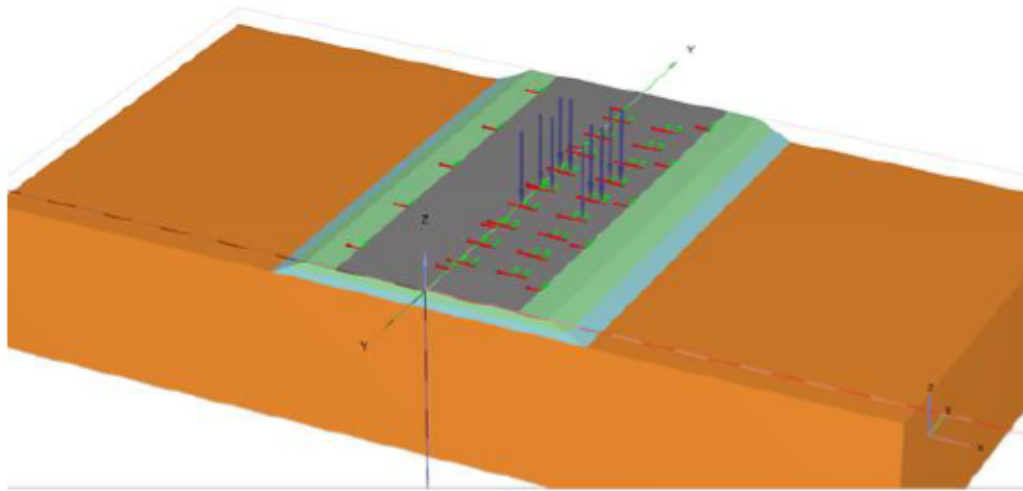
6.2.1 Mallin periaate

Tässä tutkimuksessa käytetty rakennemalli on tehty hollantilaisella PLAXIS 3D-ohjelmistolla (versio 2016.0). PLAXIS on elementtimenetelmään perustuva, ensisijaisesti geoteknisten ongelmien (painumat, stabiliteetti, deformaatiot jne.) ratkaisemiseen kehitetty ohjelmisto. Ohjelmiston kehitystyö on alkanut jo vuonna 1986, jolloin Delftin yliopisto julkaisi ensimmäisen version kaksiulotteisesta ohjelmistosta. Vuodesta 1993 alkaen ohjelmiston kehityksestä on vastannut PLAXIS BV-yhtiö. (Mansikkamäki 2009) TTY:llä PLAXIS 3D-ohjelmisto on ollut käytössä loppuvuodesta 2009 alkaen, jolloin kolmiulotteisesta työkalusta julkaistiin beta-versio. Ensimmäinen kaupallinen versio ohjelmistosta on ollut saatavilla alkuvuodesta 2010 alkaen. (Haakana et. al. 2014)

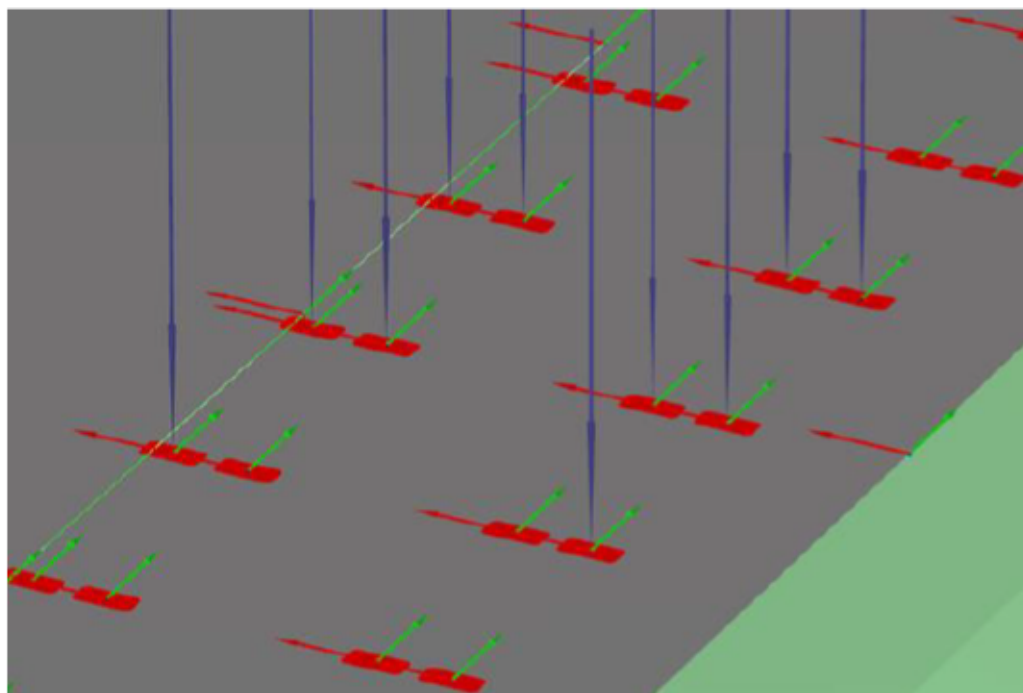
Tutkimuksessa käytetyn rakennemallin periaate on esitetty kuvassa 112. Simon koekohteen tierakenne koostuu neljästä rakennekerroksesta ja päällystelaatasta (Platelementti). Kuormittavina elementteinä käytettiin tasaisesti jakautuneita pintakuormia, jotka simuloivat renkaan kosketuspintaa (kuva 113). Elementti luotiin siten, että kosketuspinnasta muodostui kahdeksankulmainen. Neliskulmaista elementtiä ei käy-

tetty, koska teräviin kulmiin saattaa mallinnuksessa muodostua jännityskeskittymiä, jotka vääristävät mallinnustuloksia. Käytetty pintakuorman suuruus oli 800 kPa, mikä vastaa aiempaan kokemukseen perustuen todennäköisesti hyvin ajoneuvojen renkaiden rengaspainetta.

Tien pintaan mallinnettuja kosketuspintoja kuormitettiin vuorotellen siten, että raskaan ajoneuvon kolmiakselista teliä vastaava kuorma liikkuu tien pituussuunnassa. Akseliryhmän paikkaa vaihdettiin yhden telivälin verran kerrallaan. Itse laskenta perustuu staattiseen laskentaan, mutta liikuttamalla teliryhmää tien pituussuunnassa pyrittiin simuloimaan oikean liikkuvan kuorman aiheuttamaa pääjännityssuuntien kiertymistä liikennekuormituksen eri vaiheissa.



Kuva 112 Rakennemallin periaate.



Kuva 113 Mallin kuormittaminen. Siniset nuolet kuvaavat pyöräkuormien paikkoja tietyssä laskentavaiheessa ja punaiset alueet tien pinnassa olevia kosketuspintoja, joille kuorma jakautuu eri laskentavaiheissa.

6.2.2 Rakenteiden mallintamisessa käytetyt materiaalmallit ja laskenta-parametrit

Päällystekerrosta simuloiva laattaelementti mallinnettiin lineaarielastisen materiaalmallin avulla, joten näiden materiaalien jäykkyys määräytyy kimmomoduulin E ja Poissonin luvun ν avulla. Päällystekerroksen moduularvona käytettiin likiarvoa 2500 MPa ja Poissonin lukuna 0, koska kyseessä on laattaelementti, jolla on imaginaarinen paksuus. Laatan laskennallisena paksuutena käytettiin 110 mm. Päällystelaatta on pehmeää asfalttibetonia (PAB-B), joten sen jäykkyys on määritetty julkaisussa ”Tietoa tiensuunnitteluun 71D” (Tiehallinto 2005) analyyttiselle mitoitukselle esitetyn mukaisesti. Lämpötilakorjausta ei käytetty, nopeuden korjauskertoimena käytettiin koekohteella toteutunutta kuormitusajoneuvon nopeutta 65 km/h (2400 MPa $\times f(T) \times f_4(V) = 2400 \times 0,1584 \times 65^{0,45} = 2488$ MPa).

Tien rakennekerroksille käytettiin Hardening Soil- materiaalmallia (HS). HS-malli kuvaa materiaalia isotrooppisen myötölujittumisen avulla. Toisin sanottuna materiaalin myötöpinta ei ole kiinteä, kuten esim. MC-mallissa, vaan myötöpinta voi laajeta joko deviatorisen kuormituksen (leikkausmyötölujeneminen) vaikutuksesta tai/ja hydrostaattisen akselin suunnassa (kokoonpuristuvuus myötölujeneminen). Varsinainen deviatorinen myötöpinta kuitenkin perustuu lähtökohdaltaan Mohr-Coulombin myötöpintaan, joten maan lujuutta kuvataan samoilla parametreilla kuin MC-mallissa. Sen sijaan materiaalin jäykkyyttä kuvataan kolmen moduulin, ensikuormituksen sekanttimoduulin E_{50} , ödometrimoduulin E_{oed} ja kuorman palautuksen tai toistokuormituksen sekanttimoduulin E_{ur} , sekä materiaalin jännitystilariippuvuutta kuvaavan jännitysekspONENTIN m avulla. (Brinkreve et. al. 2012)

Pohjamaalle käytettiin Mohr-Coulomb-materiaalmallia (MC). MC-malli on joko lineaarielastinen tai ideaaliplastinen materiaalmalli riippuen siitä, kummalla puolella myötöpintaa jännityspolku on. Myötöpinnan sisäpuolella materiaali käyttäytyy lineaarielastisesti. Myötöpinnan ulkopuolella materiaali käyttäytyy ideaaliplastisesti, eli kaikki muodonmuutokset ovat pysyviä eikä materiaaliin mobilisoituva jännitys kasva. Tällöin materiaalia kuvataan yleensä leikkauskestävyyskulman ϕ , koheesion c ja dilataatiokulman ψ avulla. (Brinkreve et. al. 2012)

Maamateriaalien lujuus- ja jäykkyysparametrit valittiin käytännössä olemassa olevaan aikaisempaan kokemukseen perustuen. Tien rakennekerrosten laskentaparametrit ovat hyvin lähellä esim. ROADDEX-tutkimushankkeessa määritettyjä hyvien tai kohtuullisen hyvien rakennekerrosmateriaalien materiaaliparametreja (esim. Kolisoja 2012). Tien rakennekerrosmateriaalien laskentaparametrit on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Tien rakennekerroksille käytetyt materiaaliparametrit.

Parametri	Materiaalmalli	c'	ϕ'	ψ	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	m	ν_{ur}	p^{ref}	K_0^{nc}	R_f
Yksikkö		kN/m ²	°	°	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	-	-	kN/m ²	-	-
Kantava kerros	HS	20	50	20	300 000	285 000	600 000	0,5	0,2	100	0,30	0,9
Tierakenne	HS	10	45	15	250 000	235 000	500 000	0,5	0,2	100	0,32	0,9

Pohjamaakerrokselle käytetyt laskentaparametrit on esitetty taulukossa 4. Mallissa käytettiin pohjamaakerroksen paksuutena 6 metriä.

Taulukko 4. Pohjamaan materiaaliparametrit.

Parametri	Materiaali-malli	c'	φ'	ψ	E'	ν
Yksikkö		kN/m ²	°	°	kN/m ²	-
Pohjamaa	MC	1	32	2	50 000	0,3

Tierakenteen kosteustilan vaikutusten simuloimiseksi tien rakennekerrosten laskentaparametreja alennettiin vastaamaan täysin vedellä kyllästynyttä tilannetta. Materiaalin lujuusparametreista poistettiin näennäisen koheesion vaikutus ja jäykkyyttä alennettiin noin 30 %. Kostean tilanteen laskentaparametrit tien rakennekerroksille on esitetty taulukossa 5.

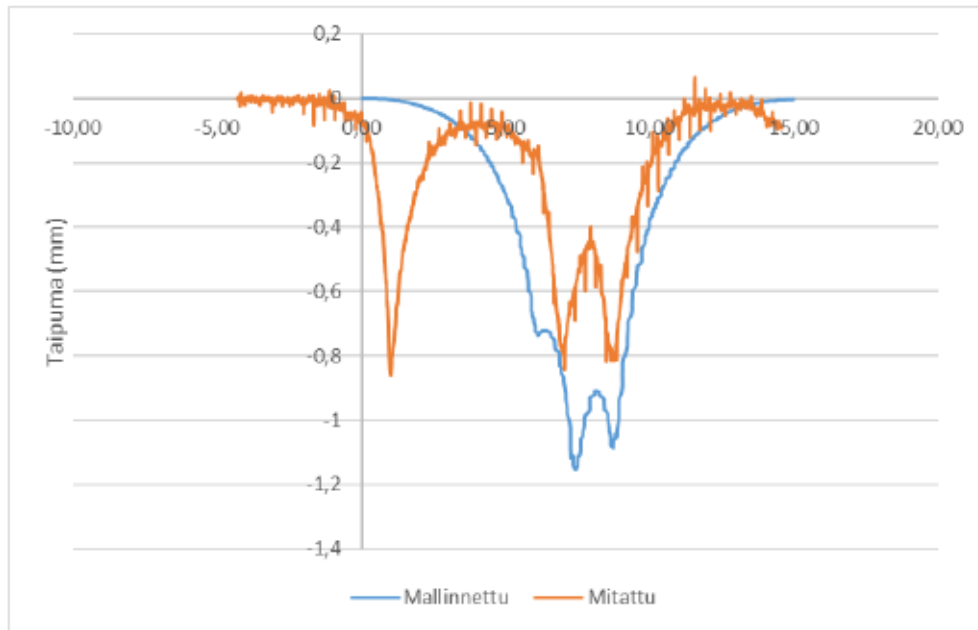
Taulukko 5. Tierakenteen laskentaparametrit vedellä kyllästetyssä tilanteessa.

Parametri	Materiaali-malli	c'	φ'	ψ	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	m	ν_{ur}	p^{ref}	K_0^{nc}	R_f
Yksikkö		kN/m ²	°	°	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	-	-	kN/m ²	-	-
Kantava kerros, kyllästynyt	HS	0,1	45	15	200 000	185 000	400 000	0,5	0,2	100	0,32	0,9
Tierakenne, kyllästynyt	HS	0,1	40	10	175 000	170 000	350 000	0,5	0,2	100	0,357	0,9

6.3 Laskentatulokset

6.3.1 Mallin verifiointi

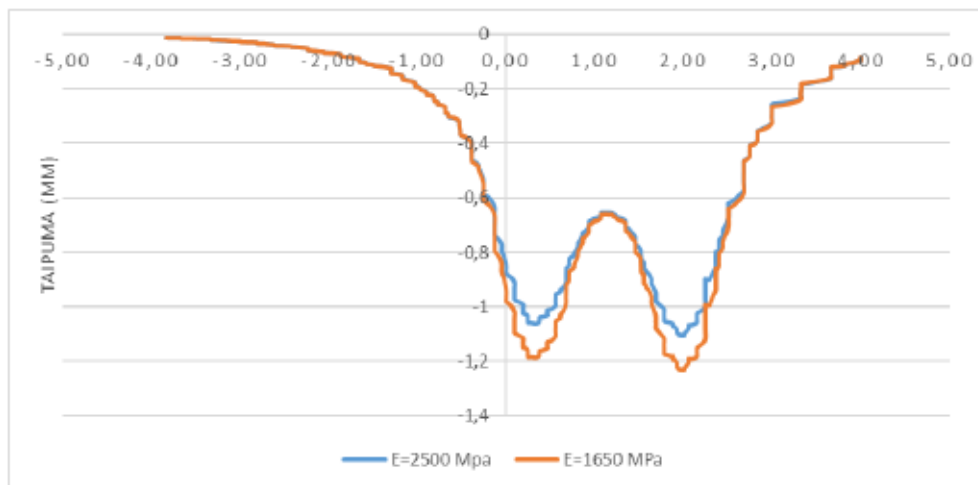
Koekohteilta ei ollut käytössä mittaustuloksia tierakenteeseen raskaasta ajoneuvosta mobilisoituvista jännityksistä. Käytössä oli oikeastaan vain tien pinnan taipumamittauksia. Simon koekohteella mitattuja taipumia verrattiin mallinnuksessa saavutettuihin päällystelaatan taipumiin. Vertailu on esitetty kuvassa 114. Mittaustuloksista on valittu yksi satunnainen ajoneuvonylitys. Mitatusta taipumasta on määritetty ajoneuvon nopeudeksi noin 65 km/h. Tätä skaalaa käyttämällä on muutettu mitattu siirtymäanturin aikasarja etäisyydeksi. Etäisyyden nollakohta on sen jälkeen siirretty vastaamaan mallinnettua telin viimeistä, kuvassa oikeanpuolimmaista akselia. Kuvan perusteella malli kuvaa uskottaviksi arvioituilla materiaaliparametreilla tien taipumamuotoa varsin hyvin, vaikka mallin rakenteeseen toistaiseksi liittyykin joitain epävarmuuksia. Näillä epävarmuuksilla on oletettavasti myös vaikutusta mallinnuksen tuottamiin maksimitaipumiin.



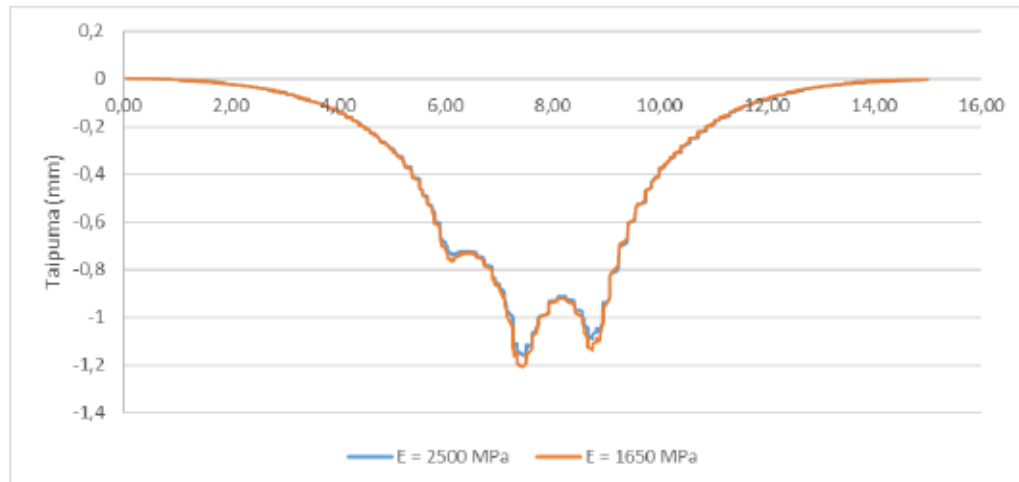
Kuva 114 Mitatun ja mallinnetun tien pinnan taipuman vertailu.

6.3.2 Päällystelaatan jäykkyyden vaikutus

Päällystelaatan jäykkyyden vaikutusta testattiin käyttämällä kerrokselle kahta eri moduuliarvoa. Normaalityapauksessa päällystekerrokselle käytettiin pehmeälle asfalttikonille edellä määritettyä arvoa 2500 MPa. Vertailusimulaatiossa käytettiin pehmeällä asfalttikonille perinteisessä kantavuusmitoituksessa tyypillisesti käytettävää mitoitusrvoa 1650 MPa. Taipumavertailu tierakenteen poikkileikkauksen suunnassa on esitetty kuvassa 115. Vastaava taipumamuoto tien pituussuunnassa ulomaisen rengasparin keskilinjalla on esitetty kuvassa 116. Päällystekerroksen moduulin muuttaminen näyttää kasvattavan taipuman maksimiarvoa noin 10 %, mutta taipumamuotoon tien pituus- tai poikisuunnassa ei näytä syntyvän merkittävää eroa. Jos molemmissa tapauksissa olisi lisäksi käytetty päällysteelle lämpötilakorjattua moduuliarvoa, olisivat maksimitaipumat todennäköisesti lähempänä mitattuja arvoja, koska mittaushetkellä päällystekerroksen lämpötila on mitä todennäköisimmin ollut jonkin verran alle 20 °C.



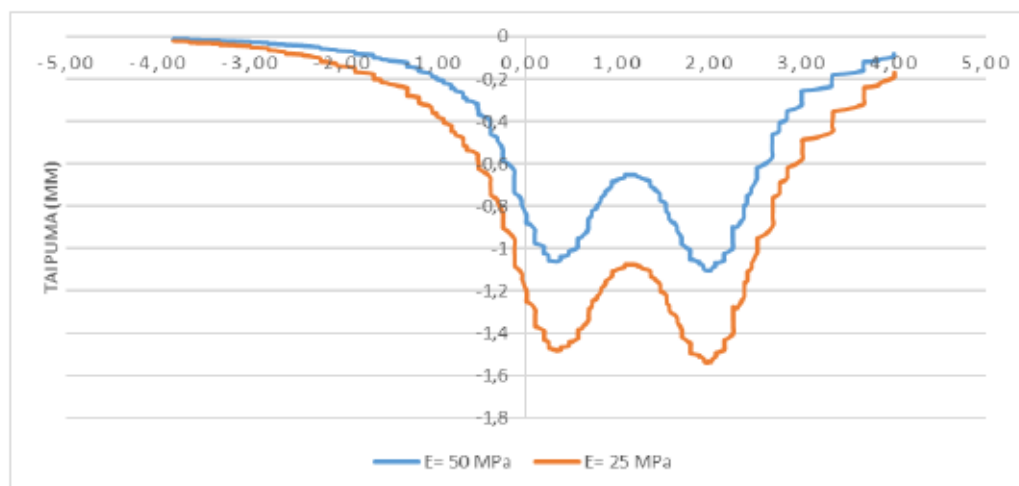
Kuva 115 Tien pinnan taipuma rakenteen poikkileikkauksessa eri päällystekerroksen jäykkyyksillä.



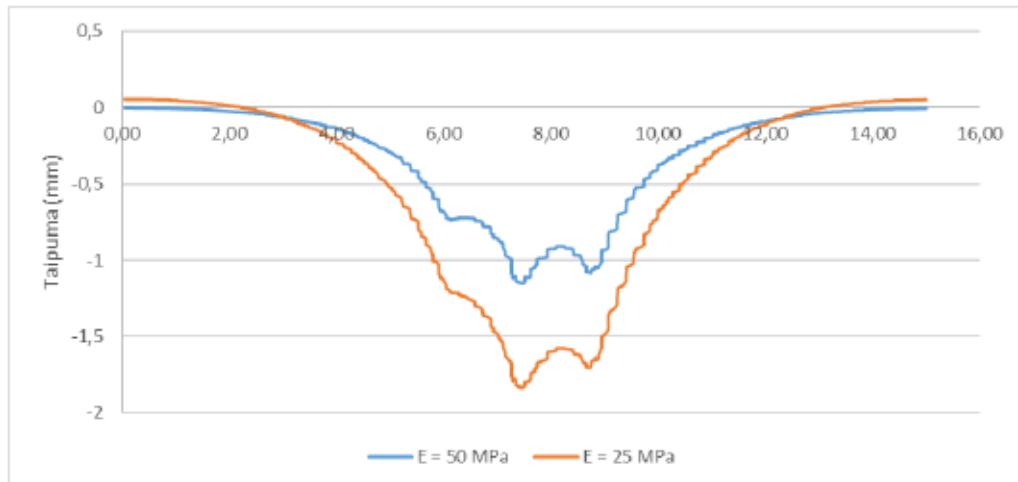
Kuva 116 Tien pinnan taipuma rakenteen pituusleikkauksessa eri päällystekerroksen jäykkyyksillä.

6.3.3 Pohjamaan jäykkyyden vaikutus

Simon koekohteen mallinnuksen yhteydessä tarkasteltiin kahden erityyppisen pohjamaan vaikutusta tien pinnan taipumamuotoon. Pehmeän pohjamaan jäykkyys oli puolet verrattuna Simon koekohteella vallitsevaksi arvioituun tilanteeseen. Taipumat poikkileikkauksen suunnassa on esitetty kuvassa 117 ja pituusleikkauksen suunnassa kuvassa 118. Kuvista havaitaan, että pehmeä pohjamaa kasvattaa taipumaa noin 50 % ja laajentaa taipumasuppiloa lähellä maksimikuormitusta. Sen sijaan kuormittavan telin vaikutus tien pituus suunnassa puristussuuntaan on jokseenkin yhtä pitkä. Pehmeän pohjamaan tapauksessa päällystelaatta pyrkii siirtymään ylöspäin suhteellisen etäällä kuormituksesta. Tämä saattaa osin olla mallitekkinen asia, joka pitää ratkaista, tai kyse voi olla siitä, että ennen liikkuvaa kuormaa päällysteen yläpintaan muodostuu vetojännityksiä.



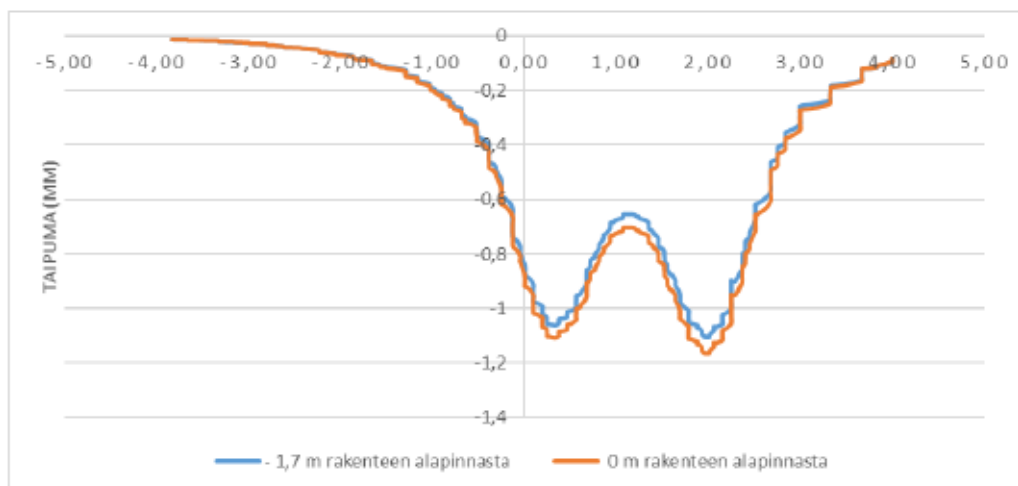
Kuva 117 Tien pinnan taipuma rakenteen pituusleikkauksessa eri pohjamaakerroksen jäykkyyksillä.



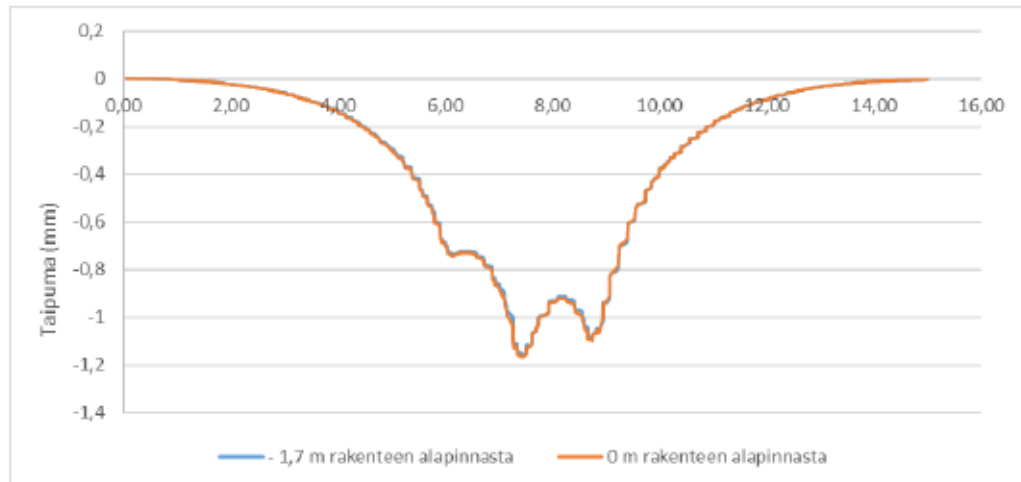
Kuva 118 Tien pinnan taipuma rakenteen pituusleikkauksessa eri pohjamaakeroksen jäykkyyksillä.

6.3.4 Rakenteen kosteustilan vaikutus

Simon koekohteella pohjaveden pinta oli noin tasolla -1,7 m. Pohjaveden pinnan tason vaikutusta mallin käyttäytymiseen testattiin simulaatiolla, jossa pohjaveden pinta nostettiin rakenteen alapinnan tasolle. Taipumat poikkileikkauksessa on esitetty kuvassa 119 ja pituusleikkauksessa kuvassa 120. Pohjaveden pinnan tason vaikutus tuloksiin oli melko pieni. Rakennekerrosten laskentaparametreja ei varioitu näissä pelkän pohjaveden pinnan vaikutusta tarkastelleissa simulaatioissa.

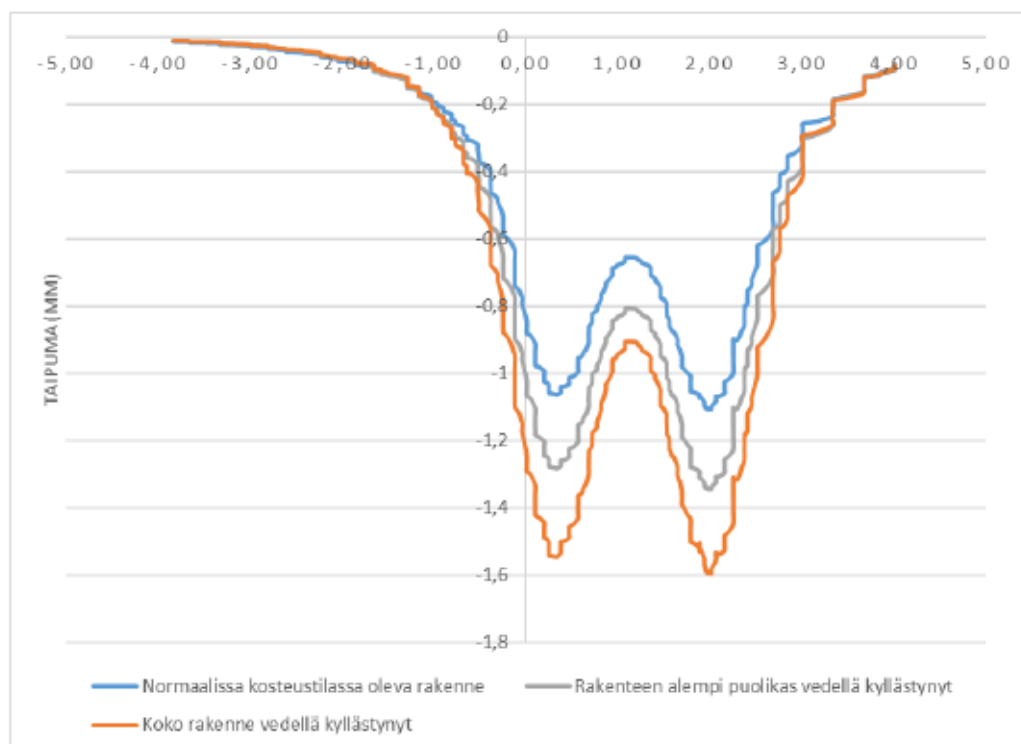


Kuva 119 Tien pinnan taipuma rakenteen poikkileikkauksessa eri pohjaveden pinnan tasoilla.

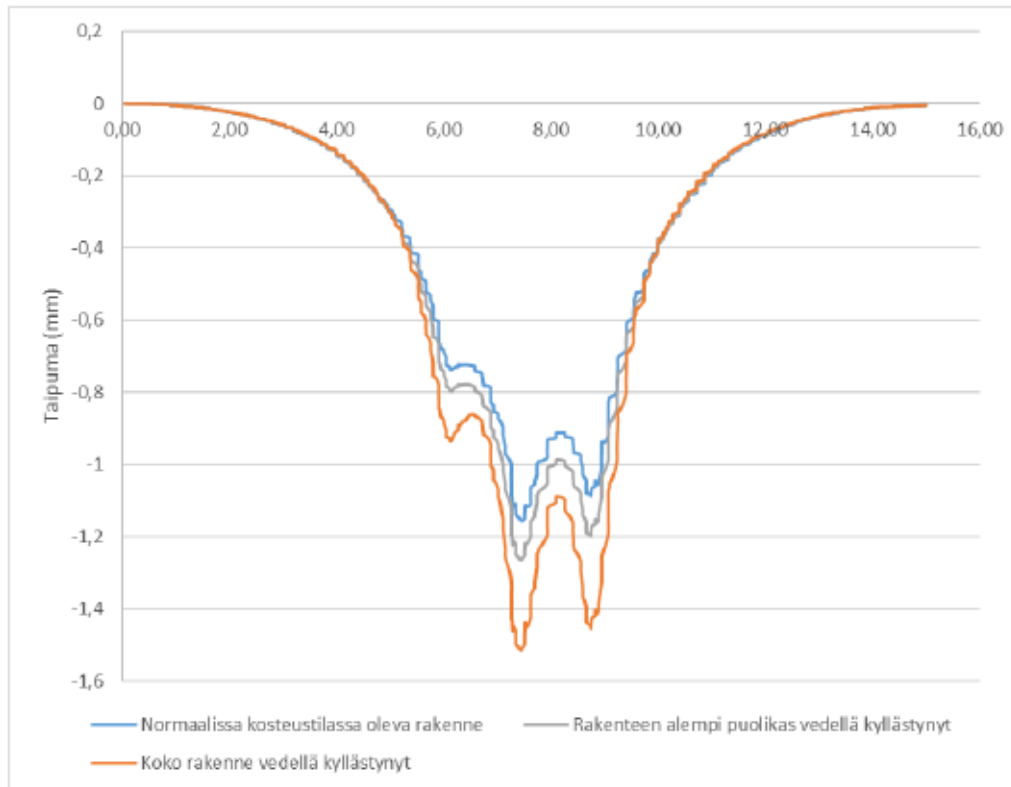


Kuva 120 Tien pinnan taipuma rakenteen pituusleikkauksessa eri pohjaveden pinnan tasoilla.

Varsinaisissa rakenteen kosteustilaa tarkastelleissa simulaatioissa tien rakennekerrosten laskentaparametreja (taulukko 5) alennettiin vaiheittain, 150 mm paksuinen rakennekerros kerrallaan tierakenteen alapinnasta alkaen. Kuvassa 121 on esitetty simuloitua taipumaa poikkileikkauksen suunnassa ja kuvassa 122 pituusleikkauksen suunnassa. Kun koko rakenteen laskentaparametrit ovat vedellä kyllästynyttä tilaa kuvaavaksi otaksutut, näyttää rakenteen taipuma kasvavan noin 40 %. Laskenta ei huomioi veden kyllästämää rakenteeseen mahdollisesti kehittyvän huokosveden ylipaineen vaikutusta, vaan tulokset kuvaavat märän rakenteen kuormittamista yksittäisen kuormituskerran alaisena.



Kuva 121 Kosteustilan vaikutus taipumiin tierakenteen poikkileikkauksen suunnassa.

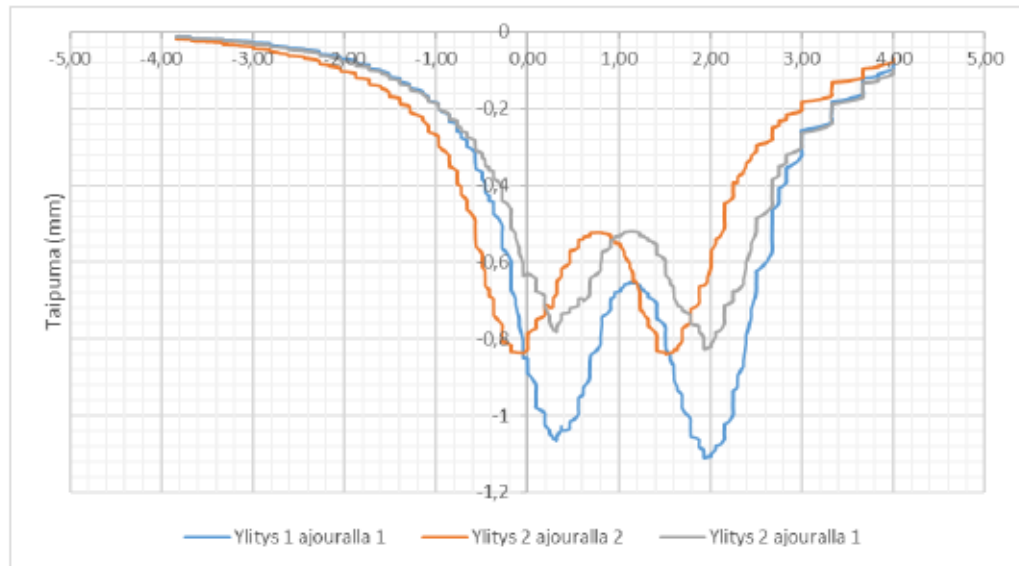


Kuva 122 Kosteustilan vaikutus taipumiin tierakenteen pituusleikkauksen suunnassa.

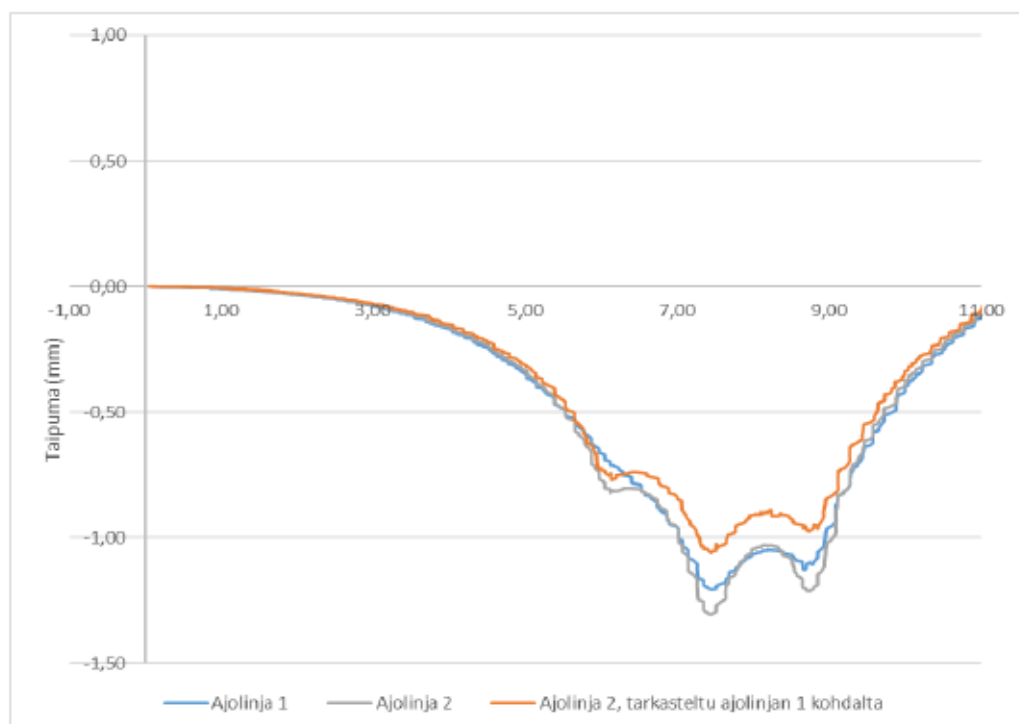
6.3.5 Ajoneuvon ajolinjan vaikutus

Liikkuvan ajoneuvon ajolinjan vaikutusta rakenteen taipumiin tarkasteltiin simulaatioissa, jossa rakennetta kuormitettiin ensin samalta ajolinjalta kuin muissakin simulaatioissa. Tämän jälkeen simulaatiota jatkettiin kahdessa osassa, joista ensimmäisessä samaa ajolinjaa kuormitettiin uudelleen. Toisessa osassa ajolinjaa siirrettiin puolikkaan paripyörän leveyden verran tien keskilinjan suuntaan.

Kuvassa 123 on esitetty tien pinnan taipuma rakenteen poikkileikkauksen suunnassa eri ajolinjoilla. Pituussuuntaiset taipumat on esitetty kuvassa 124. Kuvasta 124 voidaan havaita, että toisella kuormitusyhdöllä taipumat pienenevät molemmilla ajolinjoilla. Tämä johtuu tien rakennekerroksille käytetystä myötölujittuvasta materiaalmallista. Kuvasta 124 havaitaan ensisijaisesti mittaamisen haasteellisuus. Jos ajoneuvo ei aja tismalleen oikeaa ajolinjaa, voi ero taipumissa olla hyvinkin merkittävä. Näin ollen nyt käytetty malli saattaa olla hyvinkin toimiva, mutta asia tulee varmistaa vielä tulevaisuudessa riittävän laajojen kenttämittausten avulla ennen mallin laajempaa käyttöä.



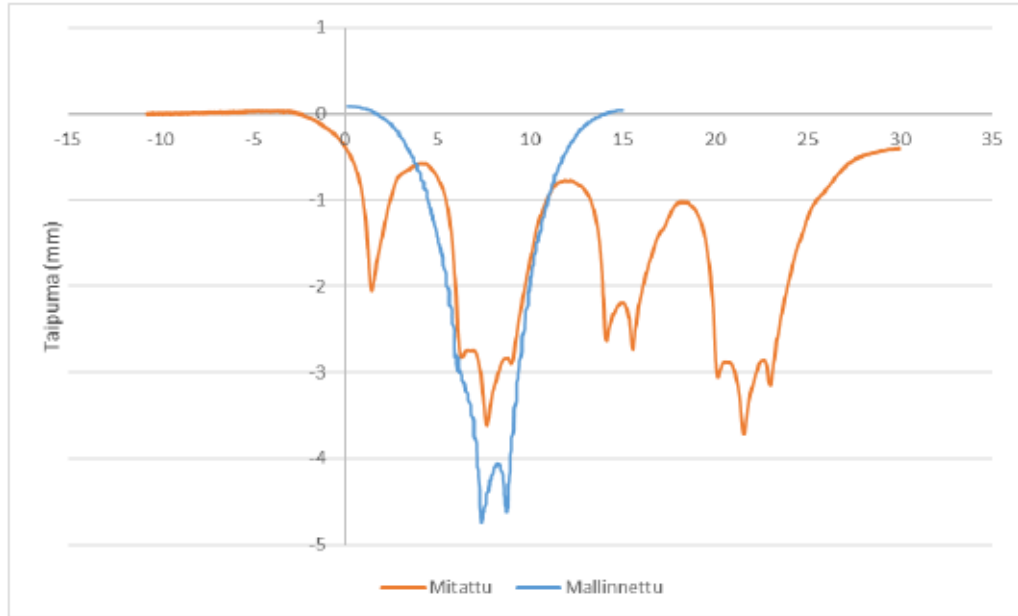
Kuva 123 Ajolinjan vaikutus tien pinnan taipumiin rakenteen poikkileikkauksen suunnassa.



Kuva 124 Ajolinjan vaikutus tien pinnan taipumiin rakenteen pituusleikkauksen suunnassa.

6.3.6 Kyyjärven koekohteen simulaatiot

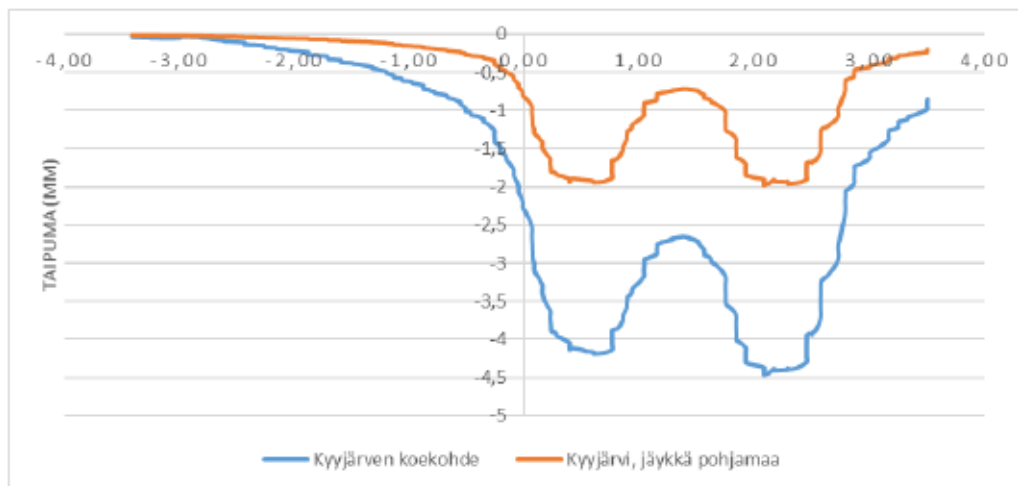
Simon koekohteen lisäksi tehtiin simulaatioita Kyyjärven koekohteesta. Laskelmat tehtiin koekohteella vallitseviksi arvioituille olosuhteille ja tätä jäykemmälle pohjamaalle. Ensi vaiheessa mitattua tien pinnan pystysiirtymää vertailtiin samaan tapaan kuin Simon koekohteessa (kuva 125). Mallinnettu maksimitaipuma on jonkin verran suurempi kuin mitattu vastaava, mutta taipumamuodot vastaavat toisiaan varsin hyvin, kun huomioidaan, että mittauksessa on mukana myös kolmiakselista teliä ympäröiviä akseleita, eikä pystysiirtymä ehdi palautua täysin ennen seuraavan akselin/telin kuormitusvaikutusta.



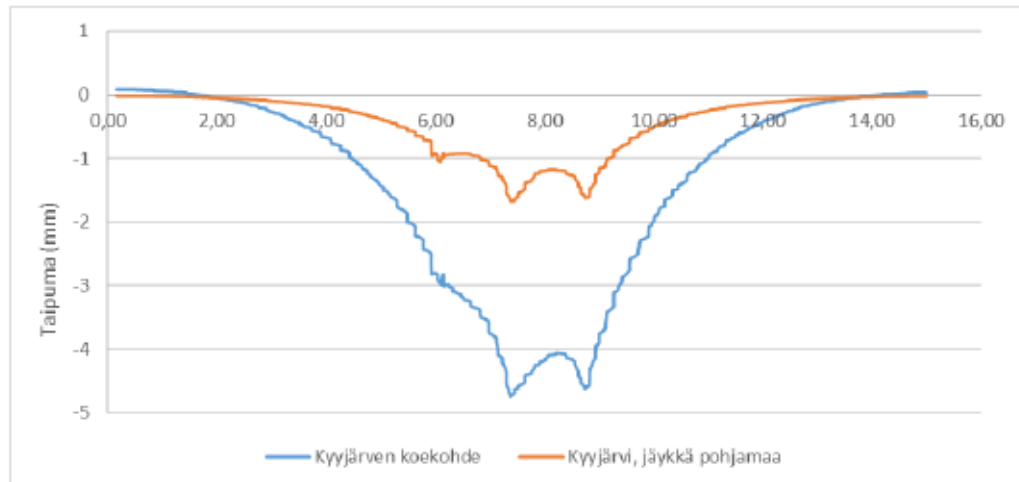
Kuva 125 Kyyjärven koekohde, mitatun ja mallinnetun pystysiirtymän vertailu.

Jäykemmän pohjamaan simulaatiossa pohjamaan materiaaliparametrit vastasivat Simon koekohteen tilannetta. Kuvassa 126 on esitetty Kyyjärven koekohtetta koskevien simulaatioiden tuottamat tien pinnan taipumat rakenteen poikkileikkauksen suunnassa. Vastaavat taipumat pituusleikkauksen suunnassa on esitetty kuvassa 127.

Pohjamaan jäykkyyden merkitys ohutpäällysteisellä ja ohutrakenteisella tiellä käy hyvin ilmi tehdyistä simulaatioista. Kun pohjamaan jäykkyys on riittävä, ei taipumataso enää merkittävästi eroa Simon koekohteesta, vaikka päällystelaatan laskennallinen paksuus on vain 40 mm ja rakennekerrokset ovat hieman ohuempia.



Kuva 126 Tien pinnan taipuma rakenteen poikkileikkauksessa Kyyjärven koekohteen simulaatioissa.



Kuva 127 Tien pinnan taipuma rakenteen pituusleikkauksessa Kyyjärven koekohteen simulaatioissa.

6.3.7 Laskentatulosten analyysi

Nyt tehtyjen simulaatioiden perusteella tien kuormituskäyttäytymisessä ja sen arvioinnissa on tärkeää huomioida erityisesti:

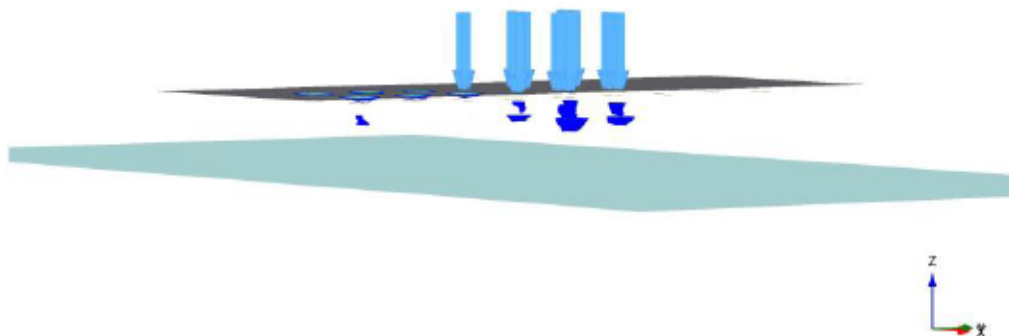
- Kohteessa vallitsevat pohjasuhteet. Pohjamaan jäykkyys vaikuttaa merkittävästi tien vasteisiin. Merkitys korostuu ohutrakenteisilla teillä.
- Rakenteen kosteustila. Vedellä kyllästyneet kerrokset eivät toimi yhtä hyvin kuin kuivat rakennekerrokset, vaikka tehty simulaatio ei vielä huomionut pitempiaikaisessa toistokuormituksessa rakenteessa mahdollisesti tapahtuvaa pumppautumista ja tämän mahdollistamaa huokosvedenpaineen kasvua.
- Kuormittavan ajoneuvon ajolinja suhteessa mitattaviin vasteisiin. Ajolinjalla ja myös peräkkäisten telien ajolinjoilla on merkitystä tierakenteen vasteisiin.

Tehtyjen päähavaintojen perusteella tarkasteltiin osaa simulaatioista tarkemmin. Kuvassa 128 on vertailtu tierakenteessa vallitsevia pystyjännitystasoja. Kuvassa esitetyn mukaisesti suurimmat jännitykset sitomattomien rakennekerrosten yläpinnassa mobilisoituvat, kun rakenne on kuiva ja pohjamaan jäykkyyttä ei ole alennettu (kuva 128 A). Kun rakenne pysyy kuivana, mutta pohjamaan jäykkyyttä alennetaan, ei tapahdu merkittäviä muutoksia sitomattomissa rakennekerroksissa vaikuttavissa jännitystasossa (kuva 128 B). Jos taas rakennekerrokset ovat vedellä kyllästyneitä, ne eivät pysty jakamaan rakenteelle tulevaa kuormaa yhtä hyvin, ja pohjamaan muodostuu jännityskeskittymä (kuva 128 C). Tämän jännityskeskittämisen aiheuttamat vaikutukset riippuvat pohjamaan jäykkyydestä. Riittävän jäykällä pohjamaalla, kuten Simon koekohteen tapauksessa vaikutukset eivät välttämättä ole dramaattisia, mutta joustavammilla pohjamailla muodostuva jännityskeskittymä kasvattaa pohjamaan muodonmuutostasoa, ja sitä kautta tierakenteen rasitusta sekä riskiä pysyvien muodonmuutosten syntymiseen merkittävästi.



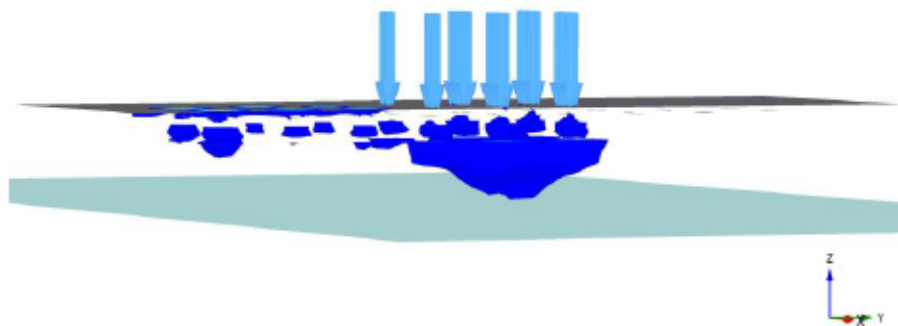
Kuva 128 Tierakenteessa vallitsevat pystyjännitystasot kuormitetussa rakenteessa. A: Simon koekohde, perustapaus, B: Simon koekohde, pohjamaan jäykkyys alennettu $\frac{1}{2}$ alkuperäisestä ja C: Simon koekohde, rakennekerrokset vedellä kyllästyneessä tilassa ja pohjamaan jäykkyys laskentatapausta A vastaava.

Kun asiaa tarkastellaan rakenteeseen mobilisoituvien muodonmuutostasojen avulla tarkemmin, nähdään missä kohtaa rakennetta riski deformaationiselle on suurin erilaisissa kuormitusolosuhteissa. Kuvassa 129 on esitetty Simon koekohteen perussimulaatiossa mobilisoituvat leikkausmuodonmuutokset. Sinisen alueen sisäpuolella on korkean deformaatoriskin alue. Kuvasta nähdään, että perustapauksessa riski rakenteen ja pohjamaan deformaationiselle on verrattain pieni.



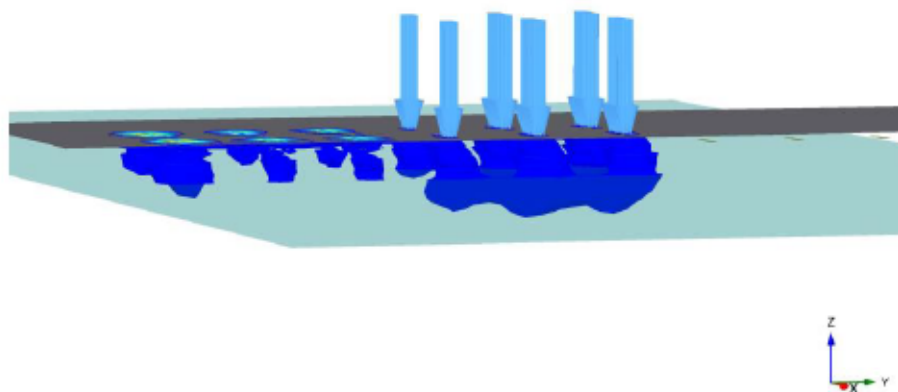
Kuva 129 Rakenteeseen mobilisoituvat leikkausmuodonmuutokset, Simon koekohteen perustapaus. Sinisen alueen sisäpuolella ($\gamma_{xz} \geq 0,1\%$) on korkean deformaatoriskin alue.

Kuvassa 130 on esitetty vastaavat leikkausmuodonmuutostasot, kun Simon koekohteen pohjamaan jäykkyyttä on alennettu. Kuvasta nähdään, että joustavampi pohjamaa on korkean riskin deformaatioalueen sisällä kuormitetun telin alapuolella. Samalla myös rakenteessa deformaatoriski kasvaa jonkin verran. Tämä käy ilmi kuvissa 129 ja 130 kuormitetun kohdan vasemmalta puolelta. Simuloitu kuormitus on edennyt kuvan esittämässä tilanteessa vasemmalta oikealle. Kuvassa 129 korkean deformaatoriskin alue häviää lähes kokonaan kuormituksen jälkeen. Kuvassa 130 korkean deformaatoriskin alueita jää rakennekerroksiin ja pohjamaan yläosaan kuormituksen jälkeen. Juuri nämä jäljelle jäävät alueet kuvaavat riskiä nopeasti kehittyville pysyville muodonmuutoksille.



Kuva 130 Rakenteeseen mobilisoituvat leikkausmuodonmuutokset, Simon koekohde joustavammalla pohjamaalla. Sinisen alueen sisäpuolella ($\gamma_{xz} \geq 0,1 \%$) on korkean deformaatoriskin alue.

Kuvassa 131 on esitetty kuvia 129 ja 130 vastaavat leikkausmuodonmuutokset tilanteessa, jossa tien rakennekerrokset ovat vedellä kyllästyneet. Veden vaikutuksesta rakennekerroksissa on alentunut jäykkyys ja lujuus, joka kasvattaa kuormituksen vaikutuksesta rakenteessa tapahtuvan deformaation riskiä. Koska märät rakennekerrokset eivät pysty kantamaan kuormituksia yhtä hyvin kuin kuivat rakenteet, kasvaa myös pohjamaan deformatiivisuuden riski jonkin verran.



Kuva 131 Rakenteeseen mobilisoituvat leikkausmuodonmuutokset, Simon koekohde simulaatiossa, jossa rakennekerroksen ovat veden kyllästämiä. Sinisen alueen sisäpuolella ($\gamma_{xz} \geq 0,1 \%$) on korkean deformaatoriskin alue.

6.4 Mallinnusten yhteenveto

Aiemmissa tierakenteen mallinnusta sisältäneissä projekteissa mallinnetut tierakenteet ovat olleet hyvin vähäliikenteisiä päällystettyjä teitä tai sorateitä. Päällystekerroksen paksuus on tyypillisesti ollut erittäin pieni. Aiemmissa projekteissa päällystekerros on mallinnettu lineaarielastisena kerroksena. Tämän tutkimuksen yhteydessä havaittiin, että päällystepaksuuden kasvaessa karkeasti arvioiden noin 100 millimetriin, ei aiemmin käytetty mallinnustapa tuota realistista jännitystilaa tierakenteen sitomattomiin rakennekerroksiin. Tästä syystä tässä tutkimuksessa päällystekerros on mallinnettu tasomaisena laattaelementtinä (Plate), jolla on virtuaalinen paksuus. Tämän tutkimuksen mittaustulokset eivät kuitenkaan tuottaneet kattavaa vertailudataa tierakenteeseen kuormituksen aikana mobilisoituvasta jännitystilasta, joten käytettyä mallinnustapaa ei voida pitää tässä vaiheessa täysin verifioituna. Tästä syystä mallinnuksessa myös päätettiin keskittyä erityisesti Simon koekohteen simulointiin.

Mallintamalla saatiin tuotettua likimain samanmuotoinen taipumasuppilo verrattuna koekohteilta mitattuun dataan. Mallintamalla saadut taipumien maksimiarvot olivat hieman suurempia kuin koekohteilta mitatut, mutta suuruusluokat vastaavat toisiaan.

Mallinnus on tarkoituksenmukainen tutkimusmenetelmä, kun halutaan tarkastella liikennekuormituksen tierakenteelle aiheuttamia ilmiöitä useammassa olosuhteissa verrattuna yhdeltä koekohteelta saatavaan mittausdataan. Mallinnuksen tavoitteena oli tarkastella tierakenteen muodonmuutostasoihin vaikuttavien tekijöiden suuruutta erilaisissa olosuhteissa. Simon koekohteella mitatut pysyvät muodonmuutokset olivat verrattain pieniä yhden raskaan ajoneuvon ylityksen aikana. Vastaavasti mallinnuksen tuloksena määritetyt leikkausmuodonmuutostasot ovat varsin maltillisia ja palautuvia.

Eryisesti pohjamaan jäykkyydellä on aiemmissa tutkimuksissa havaittu olevan suuri vaikutus tierakenteen jännitys-muodonmuutostilanteeseen. Samankaltainen havainto tehtiin tässä tutkimuksessa. Kun tierakenteen alla oleva pohjamaa on erittäin joustava, etenevät kriittisiksi arvioidut leikkausmuodonmuutostasot syvemmälle pohjamaahan. Vastaavasti pohjamaan yläosaan, ja osin myös tierakenteeseen, näyttää jäävän pysyviä leikkausmuodonmuutoksia, kun kuormitus poistuu.

Toinen merkittävä havainto liittyy rakenteen kosteustilan vaikutuksiin. Simon koekohdetta kuvanneissa simulaatioissa tien rakennekerrosten muuttuvaa kosteustilaa kuvattiin vaihtuvien lujuus- ja jäykkyysparametrien avulla. Saatujen tulosten perusteella kosteustilalla on merkittävä vaikutus tierakenteen kuormituskestävyyteen. Kun tierakenteen laskentaparametrit edustivat vedellä kyllästyneessä tilassa olevaa rakennetta, etenivät pysyvien muodonmuutosten syntymistä indikoivat, kriittisiksi arvioidut leikkausmuodonmuutostasot rakenteessa huomattavasti laajemmalle alueelle ja myös syvemmälle pohjamaahan. Osa leikkausmuodonmuutostasoista jäi myös pysyviksi rakenteeseen sen jälkeen, kun kuormitus poistui niiden kohdalta.

Kuormittavan ajoneuvon ajolinjalla näyttää myös mallinnuksen perusteella olevan suuri merkitys urautumiseen. Simuloitaessa ensimmäisen kuormituksen jälkeistä seuraavaa kuormitusta eri ajolinjalla tämä ero tuli selkeästi esiin. Tämän vuoksi mallinnusta kuormittavan ajoneuvon ajolinjan vaikutuksesta tierakenteen vasteisiin ja pysyviin muodonmuutoksiin pitäisi jatkaa laajemmalla ajolinjojen variaatiolla ja useammalla toistolla.

7 Johtopäätökset

Liikenneviraston toimeksiannosta erityyppisillä tierakenteilla tehdyissä kuormituskokeissa testattiin perinteisten tierakenteen kestävyysmitoitusmallien lähtökohtana olevan nk. neljännen potenssin säännön eli AASHO-teorian toimivuutta moniakselisten raskaiden rekkojen aiheuttamien tierasituksen arvioinnissa. Merkittävimmät kuormitukset tehtiin keväällä 2017 tierakenteiden vapauduttua roudasta. Tällöin kohteita kuormitettiin ensimmäisenä päivänä 7-akselisilla 64 tn yhdistelmällä 30 minuutin välein ja seuraavana päivänä 14-akselisilla yhdistelmällä, joka toteutettiin ajattamalla peräkkäin kahta 7-akselista 64 tn yhdistelmää tunnin välein. Tällöin kumpanakin päivänä kuormitusajoneuvojen kuljettama kokonaisuudessa oli yhtä suuri.

Inarissa kuormitukset toteutettiin muista kohteista poikkeavalla tavalla lisäämällä ajoneuvon aiheuttamaa rasitusta vaiheittain aloittamalla tyhjällä vetoautolla ja päätyen 79 tn rekkaan. Inarin Percoaseman koekohteen pehmeiköllä raskas 79 tn 10-akselinen rekka vahingoitti ohuesti päällystettyä tierakennettä syksyisen routasyklin jälkeen tehdyissä mittauksissa. Suurin kuormitusvaiheiden välinen urasyvyyden kasvu ja selkein muutos indikaatioissa veden pumppautumisesta tierakenteen pintaa kohden havaittiin, kun siirryttiin puoliksi kuormatusta rekasta täysin kuormattuun vetoautoon. Täten Inarin mittauskohteen kaltainen tie ei näyttäisi kestävän pitkien raskaiden rekkojen toistuvaa kuormitusvaikutusta.

Karstulan kohteessa päällyste oli noin 200 mm paksu päällysrakenteen ja pengertäytteen yhteispaksuuden ollessa 1,5–2 m. Karstulassa tien rakenne oli mittauskohteista paras. Pohjamaa kohteessa oli märkää turvetta. Kumpanakaan loppukevään 2017 mittauspäivänä ei Karstulan mittauskohteella syntynyt merkittävää urautumista, koska rakenne on hyvin kestävä. Tällöin 7-akselisen yhdistelmän voisi arvioida aiheuttavan yhtä pienen uran kasvun kuin 14-akselisen yhdistelmän kuormittavan massan ollessa samassa ajassa yhtä suuri.

Simon kohteessa päällyste oli noin 100 mm paksu päällysrakenteen ollessa 0,6 m paksuinen. Kohteen pohjamaana oli tasarakeinen hieno hiekka. Molempina mittauspäivinä, mutta erityisesti 14-akselisten rekkojen mittauspäivänä tulosta häiritsi normaalia suurempi muiden raskaiden ajoneuvojen liikenne, josta osa oli juuri alkaneen läheisen työmaan liikennettä ja osa aamupäivään painottuvaa puutavaran kuljetusta. Tämä omia kuormitusajoneuvoja suurempi muiden raskaiden ajoneuvojen lukumäärä on todennäköisesti vääristänyt koetuloksia, jonka vuoksi koe pitäisi toistaa vuonna 2018 sulkemalla mittausantureiden puoleinen kaista muulta liikenteeltä mittausten ajaksi.

Simon kohteessa havaittiin selkeästi, että pysyvän siirtymän kasvuun vaikutti ylikulkevan ajoneuvon ajolinjan lisäksi edellisen ajoneuvon ajolinja. Lisäksi havaittiin, että edellisen ajoneuvon ylityksestä kuluneella ajalla oli hyvin suuri merkitys, koska välittömästi kahden hieman eri ajolinjaa peräkkäin ajaneen rekan perässä tullut henkilöauto aiheutti yhtä suuren pysyvän siirtymän kuin ensimmäinen rekka.

Simossa ja Karstulassa muiden mitattujen ajoneuvojen ylitykset palauttivat vielä pysyvää muodonmuutosta niiden kulkiessa jopa 1,5–2,0 m etäisyydellä anturista. 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.

Kyyjärven kohteessa päällyste oli 30–40 mm paksu ja päällysrakenne oli noin 0,6 m paksu. Kohteessa pohjamaana oli turve. Heikolla pohjamaalla sijaitsevalla tiellä 60 m pituisella ajokaistan matkalla 14-akselinen yhdistelmä aiheutti keskimäärin kaksi kertaa suuremman uran kuin 7-akselinen yhdistelmä kuormittavan massan ollessa samassa ajassa yhtä suuri. Mittaustulosten yleistettävyyden kannalta Kyyjärven mitaukset olisi suositeltavaa toistaa keväällä 2018 roudan sulamisen loppuvaiheessa.

Vuonna 2017 tehtyjen kuormituskokeiden perusteella voidaan arvioida, että

- A. Ohutpäällysteisillä teillä, joiden päällysteen paksuus on alle 150 mm, nk. neljännessä potenssin sääntö (AASHO-teoria) ei pidä paikkansa, vaan 9–14-akseliset yhdistelmät aiheuttavat enemmän urautumista kuin 7-akseliset yhdistelmät, kun sama massa kuormittaa rakennetta samassa ajassa ja pohjamaana on
 - turve tai erityisen pehmeä savi maan ollessa sulana eli noin 8 kk vuodesta tai
 - siltti tai hieno hiekka roudan sulamisen aikana eli noin 2 kk vuodesta
- B. Paksupäällysteisillä teillä, joiden päällysteen paksuus on yli 200 mm, ja kantavilla pohjamailla AASHO-teoria pitää paikkansa, joten 9...14-akseliset yhdistelmät eivät todennäköisesti aiheuta sen enempää urautumista kuin 7-akseliset yhdistelmät, kun kuljetettava massa on saman suuruinen.
- C. Raskaiden ajoneuvojen ajolinjat vaikuttavat merkittävästi urien kasvunopeuteen. Uran vieressä ajaminen pienentää uria. Automaattisen ohjauksen avulla osa autoista voitaisiin ohjata pienentämään uria ainakin suorilla tieosuuksilla. Jos automaattisella ohjauksella kulkevia autoja ei ohjata ajamaan eri ajouria vaan ajetaan samaa uraa, poistuu ajolinjojen vaihtelun urakasvua pienentävä vaikutus ja uran muotoa loiventava vaikutus, jolloin urat syvenevät nopeammin ja urien reunat tulevat jyrkemmiksi.

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

Tierakenteen ollessa vielä osittain jäässä Simossa ja Karstulassa mitattujen pysyvien pystysiirtymien perusteella molemmat tierakenteet olivat alttiita urautumiselle kelirikon alkuvaiheessa. Erityisen selkeästi tämä näkyi Karstulan kohteessa.

Kuormittavan ajoneuvon ajolinjalla näyttää myös mallinnuksen perusteella olevan suuri merkitys urautumiseen. Simuloitaessa ensimmäisen kuormituksen jälkeistä seuraavaa kuormitusta eri ajolinjalla tämä ero tuli selkeästi esiin. Ilmiön täsmällisempi analysointi edellyttää kuitenkin ensi vaiheessa uuden mallinnustavan tarkempaa verifiointia mittausdatan avulla. Tarkoitukseen sopivaa dataa saadaan ainakin Aurora-hankkeeseen kuuluvalta raskaasti instrumentoiduilta koekohteilta.

Lähteet

Arnold, G., Sing, P.F., Saarenketo, T. and Saarenpää, T. 2017. Pavement moisture measurement to indicate risk to pavement life. New Zealand Transport Agency research report 611. s. 160.

Brinkrevel, R.B.J., Engin, E & Swolfs, W.M. 2012. PLAXIS 3D 2012. User Manuals. Plaxis bv, The Netherlands.

Ehrola, Eero 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy, Helsinki. s.357 + 7 liites.

Haakana V., Kalliainen, A., Kolisoja, P. 2015. Raskaista ajoneuvoista tierumpuihin kohdistuvat rasitukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/2015. 72 s. + 1 liite. Saatavilla 5.2.2018

https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-18_raskaista_ajoneuvoista_web.pdf

Kalliainen A., Haakana, V., Korhonen M., Mäkinen J., Kolisoja P. 2016. Teräsrumpujen uudet korjausmenetelmät. Halkaistu sisäputki, puolipohjaus ja pohjan betonointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 26/2016. 70 s. + 1 liite. Saatavilla 5.2.2018 https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2016-26_terasrumpujen_uudet_web.pdf

Kalliainen, A., Kolisoja, P. & Haakana, V. 2015. Effect of Tire Configuration on the Performance of a Low-Volume Road Exposed to Heavy Axle Loads: Mechanical Modeling. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2474, s. 174–184

Kolisoja, Pauli 2012. Mode 2 rutting design approach. Description of the new ROADX design approach for Mode 2 rutting on low volume roads. Research report. 58 s.

Kolisoja, P., Kalliainen, A. & Haakana, V. 2015. Effect of Tire Configuration on the Performance of a Low-Volume Road Exposed to Heavy Axle Loads: Response Measurements. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2474, s. 166–173.

Kolisoja, P., Saarenketo, T., Peltoniemi, H. & Vuorimies, N. 2002. Laboratory testing of suction and deformation properties of base course aggregates. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 1787. s. 83–89

Mansikkamäki, Juho 2009. Olemassa olevien ratapenkereiden stabiliteetin laskenta elementtimenetelmällä. Ratahallintokeskuksen julkaisu A9/2009. Helsinki 2009.

Saarenketo, Timo 2001. Percoaseman tutkimukset 1999–2001 Mt 9241 Koskenkylä, Rovaniemen maalaiskunta. Tutkimusraportti. Roadscanners. 57 s. + 4 liites.

Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N. & Peltoniemi, H. 2002. Effect of Seasonal Changes on Strength and Deformation Properties of Unbound and Bound Road Aggregates. Proceedings of the 6th Int Conf on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Vol 2, s. 1059–1069.

Vuorimies, N., Kolisoja, P. & Saarenketo, T. 2002. Rovaniemen Koskenkylän Percoaseman tutkimukset 2001. Tiehallinnon selvityksiä 9/2002. 48 s. + 4 liites.

Kuormitusajoneuvojen tiedot

Liite 1/ 1 (7)

Inari ja Ranua

Inari 16.10.2015										
Akseli	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Akselimassa tyhjänä (t)	3,3	3,3	4,5	4,5	3,5	1,9	1,9	1,1	1,1	1,1
Akselimassa puolillaan (t)	5,0	5,0	8,0	8,0	3,5	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
Akselimassa täynnä (t)	7,0	7,0	9,5	9,5	7	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
Akseliväli (m)	1,94	3,56	1,45	1,3	4,83	1,32	4,7	1,32	1,32	
Rengastyyppe	single	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari	pari	pari

Ranua 12.10.2016									
Akseli	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Akselimassa (t)	6,2	5,6	11,3	11,4	9,25	9,25	8,35	8,35	8,35
Akseliväli (m)	3,6	1,3	1,35	5,35	1,3	4,6	1,3	1,3	
Rengastyyppe	single	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	385/55R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

Kuormitusajoneuvojen tiedot

Liite 1 / 2 (7)

Simo

Simo 13.10.2016 1. rekka									
Akseli	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Akselimassa (t)	6,4	5	10,5	10,1	9,5	9,5	8	8	8
Akseliväli (m)	3,6	1,3	1,35	5,35	1,3	4,6	1,3	1,3	
Rengastyyppi	single	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	385/55R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5
Simo 13.10.2016 2. rekka									
Akseli	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Akselimassa (t)	7,5	5,4	11,3	11,1	7,8	8,8	8,5	8,5	8,5
Akseliväli (m)	3,6	1,3	1,37	5,25	1,35	4,45	1,34	1,34	
Rengastyyppi	single	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	385/55R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	285/70R19,5	285/70R19,5	285/70R19,5	285/70R19,5	285/70R19,5

Simo 27.4.2017							
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	10	10	8	8	10	10
Akseliväli (m)	4,58	1,37	4,99+	1,34	5,12	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5
Rengaspaine	8	8			7,5		
	*akselimassat arvioitu						

Kuormitusajoneuvojen tiedot

Simo

Simo 13.6.2017							
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	10	10	8,5	8,5	9,75	9,75
Akseliväli (m)	4,6	1,37	5,25	1,32	4,93	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R19,5	275/70R19,5	275/70R19,5	275/70R19,5
Rengaspaine	8	8	8	7,5	7,5	7,5	7,5
	*akselimassat arvioitu						

Simo 14.6.2017 1. rekka							
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	10	10	8,5	8,5	9,75	9,75
Akseliväli (m)	4,6	1,37	5,25	1,32	4,93	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R19,5	275/70R19,5	275/70R19,5	275/70R19,5
Rengaspaine	8	8	8	7,5	7,5	7,5	7,5
	*akselimassat arvioitu						

Simo 14.6.2017 2. rekka							
Akseli	8	9	10	11	12	13	14
Akselimassa (t)*	8	10	10	8,5	8,5	9,75	9,75
Akseliväli (m)	4,6	1,37	5,25	1,32	4,93	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R19,5	275/70R19,5	275/70R19,5	275/70R19,5
Rengaspaine	8	8	8	7,5	7,5	7,5	7,5
	*akselimassat arvioitu						

Kuormitusajoneuvojen tiedot

Karstula

Karstula 25.4.2017							
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	10	10	8,5	8,5	8,5	8,5
Akseliväli (m)	4,6	1,37	5,25	1,32	4,93	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5
Rengaspaine	7,5			8 ja 8,1	8 ja 8,1	8 ja 8,1	8 ja 8,1
*akselimassat arvioitu							

Karstula 21.10.2016										
1. rekka	(oli sama kuin Kyyjärvellä 20.10.2016)									
Akseli	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Akselimassa (t)	?	8,7	8,6	7,7	Yhteensä vaunu noin 40 t					
Akseliväli (m)	4,47	1,35	1,3	4,5	1,35	4,35	1,35	1,35		
Rengastyyppi	single	pari	pari	single	pari	pari	pari	pari	pari	
Rengastiedot	385/65R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	385/65R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	
Karstula 21.10.2016										
2. rekka										
Akseli	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Akselimassa (t)	Yhteensä nuppi noin 32-33 t				Yhteensä vaunu noin 42-43 t					
Akseliväli (m)	3,25	1,35	1,35	5,1	1,35	4,5	1,35	1,65		
Rengastyyppi	single	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari	pari	
Rengastiedot	385/65R22,5	385/55R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5	

Kuormitusajoneuvojen tiedot

Liite 1 / 5 (7)

Karstula

Karstula 17.5.2017	1. rekka	Sama rekka kuin 16.5.2017					
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	7,58	10,76	9,8	8,5	8,5	9,69	9,69
Akseliväli (m)	4,7	1,35	5,27	1,36	5,01	1,82	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/80R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5
Rengaspaine	8,5	8	8	8,5	8,5	8,5	8,5
	*punnittu kuormatessa 15.5. illalla						
Karstula 17.5.2017	2. rekka						
Akseli	8	9	10	11	12	13	14
Akselimassa (t)*	8,80	10,20	8,80	8,00	7,96	10,10	10,10
Akseliväli (m)	4,9	1,36	4,6	1,36	5,03	2,01	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/80R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5
Rengaspaine	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
	* Ilmajousilla mitattu nupin akselit ja kärryn telit						

Karstula 16.5.2017	Sama rekka kuin 1. rekka 17.5.2017						
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	7,58	10,76	9,8	8,5	8,5	9,69	9,69
Akseliväli (m)	4,7	1,35	5,27	1,36	5,01	1,82	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/80R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5
Rengaspaine	8,5	8	8	8,5	8,5	8,5	8,5
	*punnittu kuormatessa 15.5. illalla						

Kuormitusajoneuvojen tiedot

Liite 1 / 6 (7)

Kyyjärvi

Kyyjärvi 20.10.2016	oli sama kuin Karstulassa 21.10.2016								
Akseli	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Akselimassa (t)	?	8,7	8,6	7,7	Yhteensä vaunu noin 40 t				
Akseliväli (m)	4,47	1,35	1,3	4,5	1,35	4,35	1,35	1,35	
Rengastyyppi	single	pari	pari	single	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	385/65R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5

Kyyjärvi 26.4.2017							
Akseli	1	2	3	4	5	6	7
Akselimassa (t)*	8	10	10	8,5	8,5	8,5	8,5
Akseliväli (m)	4,6	1,37	5,25	1,32	4,93	1,8	
Rengastyyppi	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/65R22,5	295/80R22,5	295/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5
Rengaspaine	7,5			8 ja 8,1	8 ja 8,1	8 ja 8,1	8 ja 8,1
	*akselimassat arvioitu						

Kuormitusajoneuvojen tiedot

Liite 1 / 7 (7)

Kyyjärvi

Kyyjärvi 30.5.2017								
Akseli	1	2	3	4	5	6	7	
Akselimassa (t)*	8	9,5	8,5	9	9	9,5	9,5	
Akseliväli (m)	4,9	1,37	5,19	1,36	5,01	1,82		
Rengastyyppi	single	pari	single	pari	pari	pari	pari	
Rengastiedot	385/65R22,5	295/80R22,5	385/65R22,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5	
Rengaspaine	8	8	8	8	8	8	8	
	*akselimassat arvioitu							

Kyyjärvi 31.5.2017	1. rekka							
Akseli	1	2	3	4	5	6	7	8
Akselimassa (t)*	8	5,2	7,9	7,9	8,5	8,5	9,3	9,3
Akseliväli (m)	3,23	1,37	1,37	5,19	1,36	5,01	1,82	
Rengastyyppi	single	single	pari	pari	pari	pari	pari	pari
Rengastiedot	385/80R22,5	385/55R22,5	315/80R22,5	315/80R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5	275/70R22,5
Rengaspaine	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5

*1. akseli ja telit arvioitu. 2. akselilla oli painonmittaus.

Kyyjärvi 31.5.2017	2. rekka	oli sama kuin 30.5.2017						
Akseli	9	10	11	12	13	14	15	
Akselimassa (t)*	8	9,5	8,5	9	9	9,5	9,5	
Akseliväli (m)	4,9	1,37	5,19	1,36	5,01	1,82		
Rengastyyppi	single	pari	single	pari	pari	pari	pari	
Rengastiedot	385/65R22,5	295/80R22,5	385/65R22,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5	265/70R19,5	
Rengaspaine	8	8	8	8	8	8	8	
	*akselimassat arvioitu							

Asennettujen antureiden sijainnit

Inari	Percoasemalta kaistan suuntaan (m)	Syvyys asfaltin pinnasta (m)	Sijainti ajourasta tien reunaa kohti (m)
HVP 1	5 m	0,65	0
HVP 2	6 m	0,80	0
HVP 3	5 m	0,70	1,31 (tien penkereessä)
HVP 4	5 m	1,25	2,4 (tien penkereessä)
Perco	0	0,20	0
Perco (käytetty mittauksissa)	0	0,35	0
Perco (käytetty mittauksissa)	0	0,55	0
Perco (käytetty mittauksissa)	0	0,85	0
Perco	0	1,25	0

Ranua	Keskinäinen sijainti tien suunnassa (m)	Syvyys kulutuskerroksen pinnasta (m)	Sijainti ajourasta tien reunaa kohti (m)
Siirtymäanturi	1,3	0,07	0
Paine	0	0,46	0,3
Perco (käytetty mittauksissa)	?	0,15	0
Perco (käytetty mittauksissa)	?	0,5	0
Perco (käytetty mittauksissa)	?	0,8	0
Perco (käytetty mittauksissa)	?	1,1	0

Simo	Keskinäinen sijainti tien suunnassa (m)	Syvyys asfaltin pinnasta (m)	Sijainti ajourasta tien reunaa kohti (m)
Siirtymäanturi A1	-2,5	0,03	0
Siirtymäanturi A2	-0,5	0,03	0
HVP 1	-1,5	1,53	0,16
HVP 2	-2,2	1,95	0,38
TTY (Dielektrisyys) Perco	?	0,25	0
TTY (Dielektrisyys) Perco	?	0,35	0
TTY (Dielektrisyys) Perco	?	0,65	0
Perco (käytetty mittauksissa)	?	0,15	0
Perco	?	0,3	0
Perco	?	0,5	0
Perco	?	0,8	0
Perco	?	1,1	0
Tien suunnassa etäisyys suhteessa Percoasemaan			

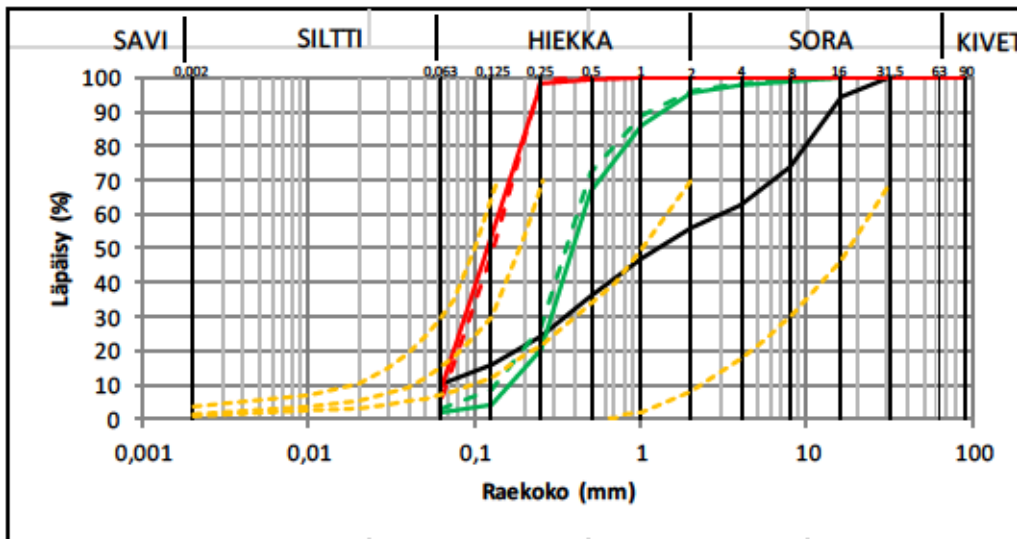
Karstula	Keskinäinen sijainti tien suunnassa (m)	Syvyys asfaltin pinnasta (m)	Sijainti ajourasta tien reunaa kohti (m)
Siirtymäanturi	6	0,05	0
Siirtymäanturi	8	0,17	0
Paine1	1,7	1,42	-0,09
Paine2	1	1,42	0,48
Perco	?	0,2	0
Perco	?	0,35	0
Perco	?	0,55	0
Perco	?	0,85	0
Perco (käytetty mittauksissa)	?	1,35	0
TTY (Dielektrisyys) Perco1	?	0,25	0
TTY (Dielektrisyys) Perco1	?	0,4	0
TTY (Dielektrisyys) Perco1	?	0,65	0

Kyyjärvi	Keskinäinen sijainti tien suunnassa (m)	Syvyys asfaltin pinnasta (m)	Sijainti ajourasta tien reunaa kohti (m)
Siirtymäanturi	-	0,045	0 (ajourassa)

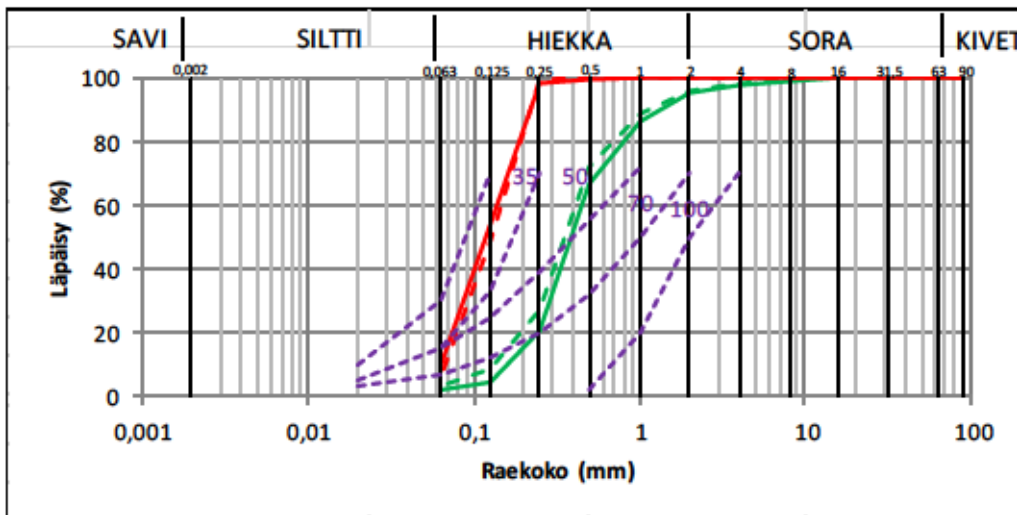
Simon näytteiden laboratoriokoetulokset

Pesuseulonnalla määritetyt rakeisuuskäyrät ja TS-kuvaajat on esitetty kuvissa 1 - 3 ja taulukossa 1 alla olevilla värikoodeilta yhdessä hienoainespitoisuuksien kanssa

- 1 kantava (musta) hienoainespitoisuus 10,2 %.
- 2 pohja (vihreä katko) keHk, hienoainespitoisuus 3,0 %.
- 3 pohja (vihreä) keHk, hienoainespitoisuus 1,8 %.
- 4 pohja 1 (punainen katko) hiHk, hienoainespitoisuus 6,2 %.
- 5 pohja 2 (punainen) hiHk, hienoainespitoisuus 9,7 %.



Kuva 1. Keltaiset katkoviivat SMFE:n (1989) suositus maalajin routivuudelle. (TYLT 1-50 yleiset perusteet. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset)

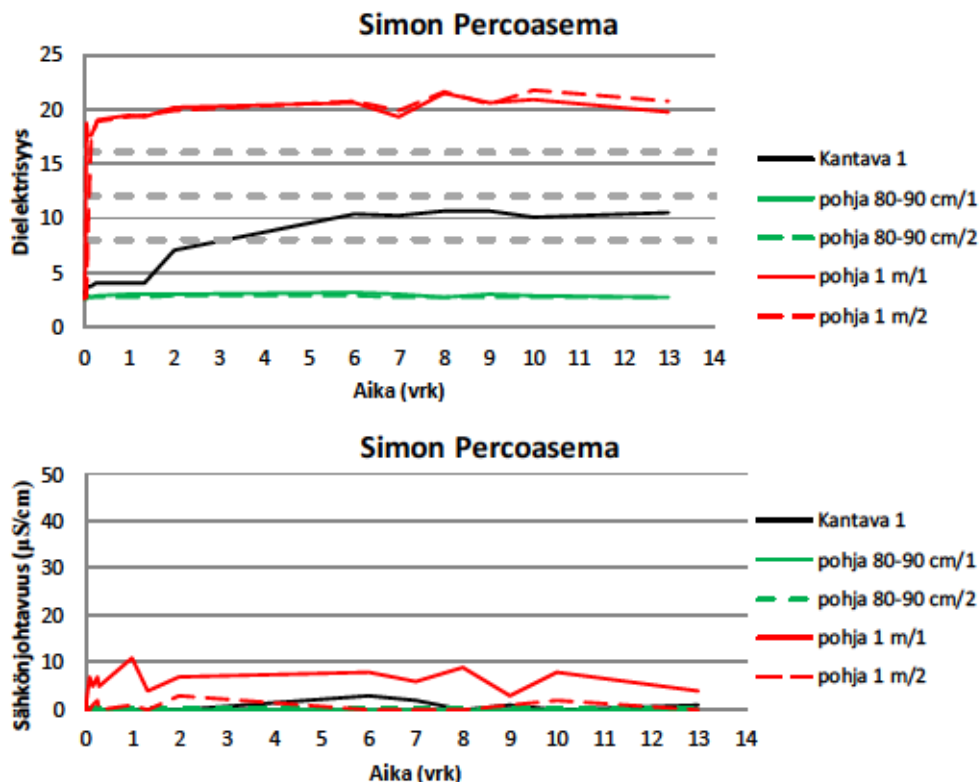


Kuva 2. Simon Percoaseman asennuksen yhteydessä otettujen näytteiden rakeisuuskäyrät. Violetit katkoviivat kuvaavat suodatinkerroksen hiekkojen Odemarkin moduulin arvioita

Tube Suction –kokeiden tulokset

Taulukko 1 Simon kohteelta otetuille näytteille tehtyjen TS-koekappaleiden tunnukset, kuivattavuuspainot, kokeen lopussa koekappaleen yläosan vesipitoisuus ja dielektrisyys sekä sähköjohtavuus 10 vrk mittauksen alusta.

Näyte	\bar{w}_d	w_y	ϵ_r (10 vrk)	J (10 vrk)
kantava	21,6	4,6 %	10,1	0
0,8-0,9 m (1)	17,8	0,5 %	2,9	0
0,8-0,9 m (1)	16,9	0,4 %	2,8	0
1 m (1)	16,2	18,0 %	20,9	8
1 m (2)	16,1	18,4 %	21,7	2




Kuva 3. Simon Percoaseman asennuksen yhteydessä otettujen näytteiden TS-kokeiden dielektrisyys- ja sähköjohtavuuskuvaajat.

Koekohteella teiden poikkileikkaukset

Kyyjärvi


	Mittaus- pisteellä	Ympäristössä
Asfaltti	30-40	30-50
Kantava	150	150
Jakava	80	40-150
Muut rakenne- kerrokset	300	150-350



Pohjamaakartan mukaan turvetta

Karstula

	Mittaus- pisteellä	Ympäristössä
Asfaltti	180-200	160-200
Kantava	200-300	200-500
Muut rakenne- kerrokset	500-600	400-800



Turve, vedellä kyllästynyt

Simo

	Mittaus- pisteellä	Ympäristössä
Asfaltti	110	90-130
Kantava	200	150-250
Suodatin	300	250-500

Hiekka

Ranua (soratie)

	Mittaus- pisteellä	Ympäristössä
Kulutusk.	100	60-110
Kantava	100	70-130
Vanha kantava/ jakava	200	100-300
Käsiteltyä pohjamaata/ pengertä	250	Ei tietoa

Turpeen sekaista siltimoreenia, vedellä
kyllästynyt

Inari

	Mittaus- pisteellä	Ympäristössä
Asfaltti	80	50-100
Kantava	200-250	200-250
Muut rakenne- kerrokset	270-320	150-700

Pohjamaa

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-652-2
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto

