

Altti Kurki

LIKENNEKUORMITUKSEN VAIKUTUKSET TIERAKENTEeseen ERI VUODENAIKAINA

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Marraskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Altti Kurki: Liikennekuormituksen vaikutukset tierakenteeseen eri vuodenaikoina
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2019

Suomen tieverkon ylläpidosta vastaava Väylävirasto haluaa löytää kustannustehokkaampia tapoja tienpitoon ja edistää tiestön näkökulmasta järkeviä päätöksiä, lakeja ja säädöksiä. Tämä edellyttää tierakenteen, olosuhteiden ja kuormitusten syvällistä ymmärtämistä.

Tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttavat liikennekuormitus, olosuhteet, tierakenteen ominaisuudet ja jo tierakenteeseen syntyneet vauriot. Tässä työssä tutkitaan liikennekuormituksen vaikutuksia tierakenteeseen eri vuodenaikoina kirjallisuusselvityksen ja kenttämittausten avulla.

Raskas liikenne aiheuttaa tierakenteen kannalta merkittävimmän liikennekuormituksen. Kuormituskestävyys tarkoittaa tierakenteen kykyä kestää liikennekuormitusta. Talvella rakenteen ollessa jäässä tien kuormituskestävyys on erinomainen. Keväällä roudan sulaessa tierakenteen kuormituskestävyys on yleensä heikoimmillaan. Tämä johtuu rakenteen kasvaneesta vesipitoisuudesta. Tällöin tierakenne vaurioituu helpoimmin. Kuormituskestävyys paranee keväällä ja kesällä rakenteen kuivuessa. Toisaalta kuormituskestävyys voi myöhemmin heikentyä asfaltin lämpötilan noustessa korkeaksi tai sateiden kastellessa tierakennettä. Loppusyksyllä tierakenteen yläosan jäätyminen parantaa tien kuormituskestävyyttä merkittävästi. Loppusyksyllä ja talvella tierakenteessa voi esiintyä jäätymissulamis- ja sulamisjäätymissyklejä. Sykliin sulamisvaiheessa rakenteen pintaosan vesipitoisuus voi kasvaa.

Työssä dokumentoitiin Tampereen yliopiston Muonioon vt21 Aurora-älyliikennetielle asennat mittalaitteistot. Ne mittaavat liikennevirrasta itsenäisesti raskaiden ajoneuvojen tierakenteeseen aiheuttamia vasteita. Cestel Company:n toimittama weigh in motion- asema mittaa akselipainoja ja Roadscanners Oy:n asennat Percoasemat mittaavat tierakenteen olosuhteita. Mittaustuloksia analysoidiin viiden mittausviikon ja kahden koekuormituspäivän ajalta. Tie on korkeapenkereinen, hyväkuntoinen ja paksupäällysteinen.

Mittaustulokset pääosin vahvistivat kirjallisuusselvityksen tuloksia. Tulosten perusteella arvioidaan, että akselipainojen nosto on tierakenteen kannalta mahdollista talvella, kun rakenne on pysyvästi jäässä. Päällysteen lämpötilan nousu kesällä aiheutti merkittävää kriittisten rasitusten kasvua tierakenteessa. Mittausdata mahdollistaa paljon tätä diplomityötä laajemmän analyysin. Päällysteen lämpötilan, sulamissykliin ja 445-490 mm leveiden yksikköpyörien vaikutukset ovat mahdollisesti merkittäviä jatkoselvityskohteita.

Avainsanat: liikennekuormitus, raskas ajoneuvo, ympäristökuormitus, routa, lämpötila, arktinen testiympäristö, vuodenajat, tierakenne, tien vaurioituminen, avoin data, Aurora, monitorointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Altti Kurki: Effects of traffic loads on road structures during different seasons
Master's degree
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
November 2019

The Finnish Transport Infrastructure Agency (FTIA) is responsible for maintaining state-owned roads. FTIA wants to find cost-efficient ways to manage roads and to promote reasonable laws and decisions. This requires knowledge.

Deterioration processes of road structures is affected by traffic loads, environmental conditions, roads distresses and roads properties. This work studies effects of traffic loads on road structures during different seasons. This is conducted using literature review and field measurements.

Heavy vehicles cause most of the road's distresses. Bearing capacity means roads ability to withstand traffic loads. During winter, bearing capacity is excellent due to frost. In spring, the frost starts to thaw causing increased water content in road. During this time, bearing capacity is often at its weakest. During spring and summer road dries increasing its bearing capacity. On the other hand, high temperature may soften asphalt reducing bearing capacity. Also, rain may moisten road reducing bearing capacity. During autumn roads upper layer freezes, enhancing bearing capacity significantly. Possible freeze-thaw and thaw-freeze –cycles during autumn and winter may cause increased moisture in road during thaw.

Tampere University's monitoring in Northern Finland at vt21 arctic testing ecosystem is documented in this study. Equipment measures automatically roads structural responses caused by heavy vehicles. Cestel Company measures axle weights and RoadScanners Oy measures conditions in road structure. Measured results are analyzed during five different weeks and two test-loading days.

Analyzed measurement results mainly confirm literature reviews findings. Based on analyzed results, it is estimated that increasing of axel loads is reasonable solution during winter, when road structure is permanently frozen. High temperatures during summer caused surprisingly high critical stresses/strains in road structure.

Collected data enables much more comprehensive analysis. Asphalt temperatures, freeze-thaw-cycles and new generation wide-base tires effects may be research topics of great interest.

Keywords: traffic loads, heavy vehicles, environmental loads, frost, temperature, arctic testing ecosystem, seasonal variation, road structure, distresses in road, open data, Aurora, monitoring

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön juuret ulottuvat toukokuuhun 2017, jolloin aloitin tutkimusapulaisena Tampereen Yliopiston rakennustekniikan yksikön maa-, pohja- ja ratarakenteiden tutkimusryhmässä. Tutkimusaiheenani on ollut siitä lähtien raskaiden rekkojen kuormitusvaikutukset tierakenteeseen useammasta eri näkökulmasta. Suuret kiitokset Väylävirastolle tutkimusprojektien mahdollistamisesta. Suurkiitokset professori Pauli Kolisojalle ja projektipäällikkö Nuutti Vuorimiehelle mielenkiintoisista projekteista sekä diplomityöni ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Kiitokset Roadscanners Oy:lle hedelmällisestä yhteistyöstä.

Kiitokset kaikille, jotka olette olleet mukana asentamassa Tampereen yliopiston antureita Aurora-älyliikennetielle. Oikeasti toimivat mittauslaitteistot helpottivat mittausdatan käsittelyä erittäin paljon. Kiitokset myös muille diplomityöhöni neuvoja, ohjausta ja apua antaneille kollegoille. Kiitokset mittauslaiteguruille Antille ja Mikalle, mallinnusgurulle Antille, asennusreissujen käytännön ammattilaisille Markolle ja Terolle sekä MATLAB-datan käsittelytyökalun koodanneelle Kosulle. Kiitokset kaikille kahvihuonettamme käyttäville, ansiostanne töihin on ollut mukavaa tulla.

Kiitokset ystävilleni vuosien varrelta ja perheelleni. En tiedä miten voisin kylliksi teitä kiittää.

Tampereella, 23.11.2019

Altti Kurki

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	10
2. TIERAKENTEEN KÄYTTÄYTYMISEN TEORIA.....	12
2.1 Tierakenne.....	12
2.1.1 Tien alus- ja päällysrakenne	12
2.1.2 Rakennekerrokset.....	13
2.1.3 Rakennekerrosten luokittelu ominaisuuksien perusteella	15
2.2 Olosuhteet	15
2.2.1 Kosteuden vaikutus.....	15
2.2.2 Lämpötilan vaikutus	21
2.3 Liikennekuormituksen vaikutus.....	23
2.3.1 Akselimassa.....	25
2.3.2 Akselisto	25
2.3.3 Rengastyyppi.....	26
2.3.4 Ajolinja	27
2.3.5 Ajonopeus.....	29
2.4 Tierakenteen vaurioituminen	30
2.4.1 Vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät	30
2.4.2 Vauriotypit.....	32
2.5 Kuormitushistorian vaikutus	34
2.5.1 Lyhyen aikavälin liikennekuormitushistoria.....	35
3. KENTTÄMITTAUSTEN TOTEUTUS	37
3.1 Mittausten aikataulu	37
3.2 Mittausten tavoitteet.....	38
3.3 Mittauskohteet.....	39
3.3.1 Mittauskohteiden sijainti.....	40
3.3.2 Joustavan alusrakenteen mittauskohde	41
3.3.3 Jäykän alusrakenteen mittauskohde	43
3.3.4 Ajoneuvopainojen mittausasema	45
3.4 Mitattavat suureet.....	46
3.4.1 Pystyjännitys.....	46
3.4.2 Tien pinnan pystysiirtymä siirtymäantureilla	48
3.4.3 Tien pinnan pystysiirtymä, ajolinja ja rengastus kiihtyvyyssantureilla	50
3.4.4 Asfaltin alapinnan venymä	52
3.4.5 Kantavan kerroksen pystysuuntainen kokoonpuristuma.....	55
3.4.6 Akselipainot ja -määrät.....	57
3.4.7 Lämpötila ja dielektrisyys tierakenteessa	58
3.4.8 Muut mittaukset.....	58
3.5 Mittaustiedostojen tallentaminen	59
4. MITTAUSTULOKSET	60
4.1 Mittausdatan käsittelyn periaatteet.....	60
4.1.1 Käsiteltävän mittausdatan valinta.....	60
4.1.2 Eri mittauskohteiden mittausdatan yhdistäminen.....	61
4.1.3 Ajoneuvojen ajolinjojen selvittäminen.....	62

4.1.4	Sovitteiden tekeminen.....	64
4.2	Olosuhteet mittausajankohtina	65
4.2.1	Roudan sulamisen alkuvaihe	66
4.2.2	Roudan sulamisen loppuvaihe	68
4.2.3	Kesäkauden tilanne	68
4.2.4	Syksyn jäätymis-sulamis- vaihe	69
4.2.5	Jäätynyt rakenne talvikautena.....	71
4.3	Mittaustulokset liikennevirrasta ja koekuormituksista.....	72
4.3.1	Pystyjännitys.....	72
4.3.2	Tien pinnan pystysiirtymä.....	78
4.3.3	Asfaltin alapinnan venymä	81
4.3.4	Kantavan kerroksen pystysuuntainen kokoonpuristuma.....	85
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET	91
5.1	Tierakenteen käyttäytyminen eri vuodenaikoina	91
5.2	Liikennekuormituksen vaikutus tierakenteen käyttäytymiseen.....	94
5.3	Muut havainnot	95
5.4	Jatkotutkimusmahdollisuudet	95
6.	YHTEENVETO.....	97
	LÄHTEET	100
	LIITE A: KOEKUORMITUSAJONEUVOJEN TIEDOT	103
	LIITE B: TAMPEREEN YLIOPISTON ASENTAMIEN ANTURIEN TIEDOT	104
	LIITE C: JOUSTAVAN ALUSRAKENTEEN KOHTEEN KANTAVALLE KERROKSELLE TEHDYT LABORATORIOKOKKEET.....	108
	LIITE D: MITTAUSTULOKSET MITTAUSVIIKOILTA JA KOEKUORMITUSPÄIVILTÄ	

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1 Erilaiset tien alusrakenteet. (Ehrola 1996).....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 2 Tien päällysrakennekerrokset. (Liikennevirasto 2018).....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 3 Ote routaan liittyvistä peruskäsitteistä (Ehrola 1996).....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 4 Roudan syvyyden vaikutus linja-auton aiheuttamaan tien pinnan pystysiirtymään alemman tason tierakenteella Vesilahdella. (Luomala 2019).....</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 5 Roudan sulamisvaiheen aiheuttama alentunut kantavuus. Routaantunut maa estää veden purkautumisen pois tiestä (Rahiala 1988)</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 6 ”Lämpötilan, pakkasmäärän, roudan syvyyden ja kantavuuden vaihtelut kausiroudan alueella.” (muokattu Rahiala 1988) Vaihtoehtoinen malli, joka huomioi routaantumisen voimakkaan vaikutuksen taipumaan, on lisätty kuvaan. Vaihtoehtoinen taipuman käyttäytyminen on lisätty piirtämällä vihreä käyrä kohtaan e).</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 7 Bitumilla sidottujen päällysrakennemateriaalien moduulit. Oletuksena on ajonopeus 60 km/h. Kuvaaja perustuvat tiehallinnon ohjeeseen (Tiehallinto 2004).</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 8 Lämpötilan ja pyöräkuorman vaikutus pysyvään muodonmuutokseen (TRB OF NATIONAL ACADEMIES. 2004)</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 9 Tierakenteen tyypilliset kriittiset rasitukset ja pyöräkuorman jakautuminen tierakenteeseen. (Mäki 2017).....</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 10 "Vetoauton telin 1. akselin paripyöräasennuksen 315/60R22.5 aiheuttamat pystysuuntaiset jännitykset ja tien pinnan siirtymät. Jännitykset on esitetty kolmelta eri syvyydeltä päällysteen pinnasta mitattuna. Akselipaino 76 kN." (Haakana 2014)</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 11 Ajonopeuden vaikutus taipumaan eli tien pinnan pystysiirtymään. (TRB OF NATIONAL ACADEMIES. 2004)</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 12 Tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät. (Belt et al. 2000)</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 13 Päällystehalkeaman vaikutus tierakenteen vaurioitumiseen. (Belt et al. 2002).....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 14 Routimisen aiheuttama halkeama asfalttipäällysteisessä tiessä. (Ehrola 1996).....</i>	<i>33</i>
<i>Kuva 15 Urautumisen eli poikittaissuuntaisen epätasaisuuden syyt. (Belt 2002).....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 16 Lyhyen aikavälin kuormitushistorian vaikutus tien pinnan pystysiirtymään eli urautumiseen. Ensimmäisen tukkirekan ajolinja kulki anturin päältä, toisen tukkirekan ajolinja anturin vierestä ja henkilöauton ajolinja anturin päältä. (Vuorimies et al. 2018).....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 17 Mittauskohteiden sijainti kartalla (karttakuva ladattu Maanmittauslaitoksen tietokannasta 27.5.2019).....</i>	<i>41</i>
<i>Kuva 18 Mittauskohde PL4900 ennen asfaltin asentamista. (Varin 2017).....</i>	<i>42</i>
<i>Kuva 19 Tien poikkileikkausprofiili koekohteessa PL4900 (Kalliainen 2019).</i>	<i>43</i>
<i>Kuva 20 Mittauskohde PL5700 vanhalla päällysteellä ennen anturien ja uuden päällystekerroksen asennusta. (Varin 2017).....</i>	<i>44</i>
<i>Kuva 21 Tien poikkileikkausprofiili koekohteessa PL5700. (Kalliainen 2019)</i>	<i>45</i>
<i>Kuva 22 Pystyjännitysanturien asennusta kohteella PL4900.....</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 23 Pystyjännitysanturien mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL5700 20.8.2018 klo 20:50:27.</i>	<i>47</i>
<i>Kuva 24 Tien pinnan pystysiirtymäanturien asennusta. (Vuorimies et al. 2018)</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 25 Tien pinnan pystysiirtymäanturien mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL4900 20.8.2018 klo 22:04:08.</i>	<i>49</i>
<i>Kuva 26 Kiihtyvyyssanturien asennusta.....</i>	<i>51</i>
<i>Kuva 27 Kiihtyvyyssanturien mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL5700.</i>	<i>52</i>

Kuva 28 Asfaltin alapinnan venymäanturien asennusta kohteella PL4900.....	53
Kuva 29 Asfaltin alapinnan pitkittäissuuntaisen venymäanturin mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL5700 20.8.2018 klo 20:50:27.....	54
Kuva 30 Asfaltin alapinnan poikittaissuuntaisen venymäanturin mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL5700 20.8.2018 klo 20:50:27.....	54
Kuva 31 Asfaltin alapinnan poikittaissuuntaisen venymäanturin vaikeatulkintainen mittausdata koekuormitusrekasta anturilla HOSTR12 24.7.2018 klo 9:25:19.....	55
Kuva 32 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma-antureita.....	56
Kuva 33 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma-anturin mittausdatan tulkintaperiaatteet standardirekasta kohteella PL5700 20.8.2018 klo 20:50:27.....	57
Kuva 34 Esimerkki standardirekasta mittauskohteella PL5700. (Akkanen, A. 2018).....	61
Kuva 35 Koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin pyörien aiheuttamat maksimikiihtyvyydet kiihtyvyyksantureissa 24.7.2018 klo 9:42.....	63
Kuva 36 Ajolinjan tulkinnan tulosten vertailu kiihtyvyyksanturien ja profiling stationin välillä 30-31.5.2018.....	64
Kuva 37 Esimerkki 1. mittausviikon kuvaajasta. Pystyakselilla on pystyjännityksen maksimilisäys ensimmäisen akselin alla suhteessa ennen kuormitusta edeltävään tilaan. Poikittaisella akselilla on auton ajolinja suhteessa mittausanturiin.....	65
Kuva 38 Muonion Percoaseman PL5700 tilanne, Lapin percoasemien seurantaraportti 21.6.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018a).....	67
Kuva 39 Muonion Percoaseman PL4900 tilanne, Lapin percoasemien seurantaraportti 21.6.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018a).....	68
Kuva 40 Muonion percoaseman tilanne PL5700, Lapin percoasemien seurantaraportti, 17.10.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018b).....	69
Kuva 41 Muonion percoaseman tilanne PL4900, Lapin percoasemien seurantaraportti, 17.10.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018b).....	69
Kuva 42 Muonion percoaseman tilanne PL5700, Lapin percoasemien seurantaraportti 20.12.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018c).....	71
Kuva 43 Muonion percoaseman tilanne PL4900, Lapin percoasemien seurantaraportti 20.12.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018c).....	71
Kuva 44 Pystyjännitys 180 mm syvyydessä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900. Päällystepaksuus 90 mm.....	73
Kuva 45 Pystyjännitys 280 mm syvyydessä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900. Päällystepaksuus 90 mm.....	73
Kuva 46 Pystyjännitys 220 mm syvyydessä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700. Päällystepaksuus 120 mm.....	74
Kuva 47 Pystyjännitys 315 mm syvyydessä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700. Päällystepaksuus 120 mm.....	74
Kuva 48 Pystyjännitys koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla 180 mm syvyydessä. Mittauskohde PL4900. Päällystepaksuus 90 mm.....	76
Kuva 49 Pystyjännitys koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla 280 mm syvyydessä. Mittauskohde PL4900. Päällystepaksuus 90 mm.....	76
Kuva 50 Pystyjännitys koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla 220 mm syvyydessä. Mittauskohde PL5700. Päällystepaksuus 120 mm.....	77

<i>Kuva 51 Pystyjännitys koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla 315 mm syvyydessä. Mittauskohde PL5700. Päälystepaksuus 120 mm.</i>	<i>77</i>
<i>Kuva 52 Tien pinnan pystysiirtymä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900.</i>	<i>79</i>
<i>Kuva 53 Tien pinnan pystysiirtymä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900.</i>	<i>79</i>
<i>Kuva 54 Tien pinnan pystysiirtymä koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900.</i>	<i>81</i>
<i>Kuva 55 Asfaltin alapinnan venymän maksimiarvo tien pituussuunnassa mitattuna standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900. Päälystepaksuus 90 mm.</i>	<i>82</i>
<i>Kuva 56 Asfaltin alapinnan venymän maksimiarvo tien pituussuunnassa mitattuna standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700. Päälystepaksuus 120 mm.</i>	<i>82</i>
<i>Kuva 57 Asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900. Päälystepaksuus 90 mm.</i>	<i>84</i>
<i>Kuva 58 Asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700. Päälystepaksuus 120 mm.</i>	<i>84</i>
<i>Kuva 59 Asfaltin alapinnan venymän maksimiarvo tien leveyssuunnassa mitattuna mittausviikolla 8-14.6.2018 standardirekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700.</i>	<i>85</i>
<i>Kuva 60 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900. Päälystepaksuus 90 mm.</i>	<i>86</i>
<i>Kuva 61 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700. Päälystepaksuus 120 mm.</i>	<i>87</i>
<i>Kuva 62 Routaantumisen vaikutus kantavan kerroksen kokoonpuristumaan 22-25.10.2018. Mittauskohde PL4900.</i>	<i>88</i>
<i>Kuva 63 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900.</i>	<i>89</i>
<i>Kuva 64 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700.</i>	<i>89</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AB	asfalttibetoni
ABK	kantavan kerroksen asfalttibetoni
ACC	kiihtyvyyssanturin tunnus
Aurora	vt21 Kolari-Kilpisjärvi tien kunnostushanke, jossa rakennettiin älyliikenteen testialue Kolari-Muonio-välille
Aurora 1	Muonion koekohteen pohjoinen mittausasema, toiselta nimeltään PL5700
Aurora 2	Muonion koekohteen eteläinen mittausasema, toiselta nimeltään PL4900
DISPL	siirtymäanturin tunnus
HOSTR	asfaltin alapinnan venymäanturin tunnus
PAB	pehmeä asfalttibetoni
PL4900	Muonion koekohteen eteläinen mittausasema tiellä vt21, toiselta nimeltään Aurora 2
PL5700	Muonion koekohteen pohjoinen mittausasema tiellä vt21, toiselta nimeltään Aurora 1
SMA	kivimastiksiasifaltti
Vepre	maanpaineanturin tunnus
Er	dielektrisyys
strain	venymä
tn	tonni, massan yksikkö, 1 tonni = 1000 kg
τ_f	leikkauslujuus
c'	tehokas koheesio
σ	kokonaisjännitys
u_w	huokosvedenpaine
ϕ'	tehokas kitkakulma

1. JOHDANTO

Toimiva, turvallinen ja käyttäjilleen kustannustehokas tiestö on yhteiskunnalle elintärkeä. Väylävirasto vastaa Suomen tieverkon ylläpidosta. Rajallisten resurssiensa takia Väylävirasto haluaa löytää kustannustehokkaampia tapoja tienpitoon, varsinkin kun Suomen tiestöllä on merkittävä määrä korjausvelkaa. Väylävirasto haluaa myös edistää tiestön näkökulmasta järkeviä päätöksiä, lakeja ja säädöksiä. Tierakenteen toiminnan ja vaurioitumisen ymmärtäminen antaa Väylävirastolle työkaluja kustannustehokkaaseen väyläomaisuuden hallintaan. Tutkimustietoon tukeutuvan ymmärryksen myötä Väylävirasto voi antaa perusteltuja kannanottoja laki- ja säädösluonnoksiin sekä Suomessa että kansainvälisesti.

Vuodenajat vaikuttavat merkittävästi tierakenteen käyttäytymiseen. Myös Suomen tiestöön vaikuttavat olosuhteet ovat muuttumassa ja näiden muutosten vaikutusten ymmärtämiseen on panostettava. Merkittäviä tekijöitä ovat mm. älyliikenne, ilmastonmuutos ja rekkojen aiempaa suuremmat kokonaisuudet.

Vuosina 2017-2018 valmistui kansainvälisesti merkittävä älyliikenteen testialue Muonioon. Alueelle on asennettu paljon mittalaitteita ja alueella on tehty useita erilaisia mittauksia ja koeajoja. Tampereen yliopiston tutkimusryhmä on asentanut alueelle erittäin kattavat rakenneinstrumentoinnit. Rakenneinstrumentointien mittaukset ovat automatisoituja ja ne mahdollistavat tierakenteen käyttäytymisen ja vaurioitumisen tarkastelun ajoneuvokohtaisesti vuoden ympäri. Instrumentointikohteilta saatavat tulokset mahdollistavat myös kuormituskestävyysmitoituksen menetelmien kehittämisen ja arvioimisen. Kaikki Tampereen yliopiston keräämät mittaustulokset ovat vapaasti saatavilla Väyläviraston palvelimella.

Diplomityön teoriaosuudessa käsitellään raskaan liikenteen kuormittaman tierakenteen käyttäytymistä. Liikennekuormituksen vaikutusta tierakenteeseen käsitellään pääosin yksittäisen ajoneuvon näkökulmasta. Teoriaosuudessa käsitellään myös tierakenteen vaurioitumismekanismeja ja tien kuormitushistorian vaikutusta tierakenteen käyttäytymiseen.

Diplomityön tutkimusosuudessa esitellään Tampereen yliopiston Muonion älyliikennetielle asentamat, kattavat rakenneinstrumentoinnit. Näiden lisäksi käsitellään myös muiden tahojen mittauksia siinä määrin kuin ne liittyvät tutkimusaiheeseen. Työssä etsitään tietoa vuodenaikojen ja liikennekuormituksen vaikutuksesta tierakenteen käyttäytymi-

seen Muonion koe kohteen rakenneinstrumentoinnista saatavien mittaustulosten ja kirjallisuuskatsauksen avulla. Mittausten osalta tarkastelu kohdistuu viittä erilaista olosuhdetta edustavaan mittausviikkoon ja kahteen koekuormituspäivään. Työn lopussa annetaan jatkotutkimusehdotuksia.

2. TIERAKENTEEN KÄYTTÄYTYMISEN TEORIA

Tierakenteen käyttäytymiseen vaikuttavat tierakenteen ominaisuudet, olosuhteet tierakenteessa ja tierakenteeseen kohdistuvat kuormitukset. Luonnollisesti nämä vaihtelevat suuresti. (Ehrola 1996) (Belt 2002)

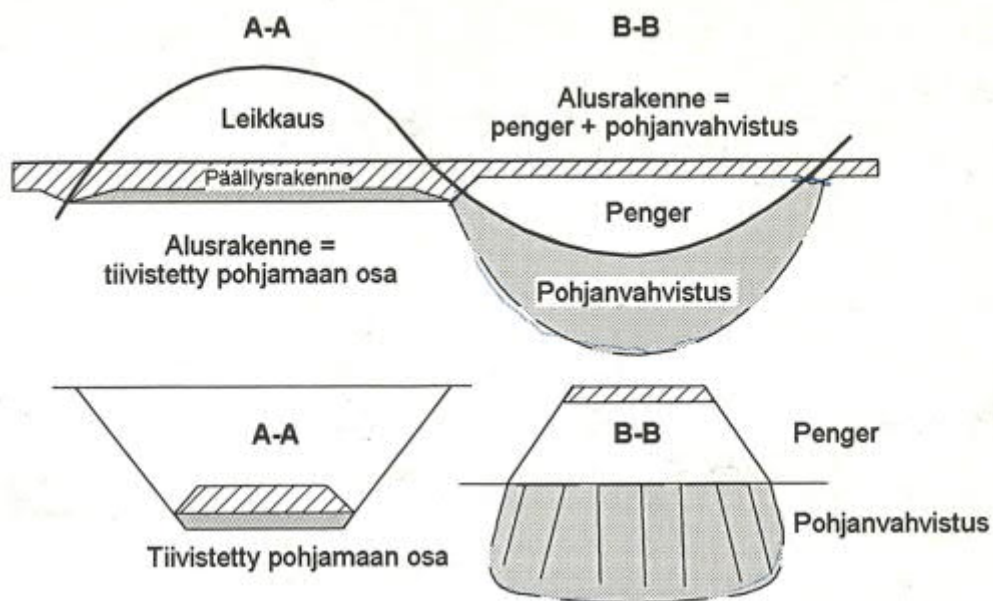
Tässä luvussa käsitellään tyypillistä päällystettyä suomalaista tietä, eli tietä joustavalla päällysrakenteella kausittaisen roudan alueella. Tällainen tie on kuvassa 20 ja esimerkki tien poikkileikkausprofiilista on kuvassa 19.

2.1 Tierakenne

Tierakenne toimii kokonaisuutena ja se koostuu alus- ja päällysrakenteesta. Tierakennekerroksien ominaisuuksia on mahdollista mitata ja luokitella usealla eri menetelmällä.

2.1.1 Tien alus- ja päällysrakenne

Alusrakenne tarkoittaa pohjamaata, kun tie on leikkauksessa ja pohjamaan lisäksi myös pengertäytettä, kun tie on penkereellä (Ehrola 1996). Päällysrakenne tarkoittaa tierakenteen osia alusrakenteen päällä (Ehrola 1996). Tierakenteen erityyppisiä alusrakenteita on esitetty kuvassa 1. Alusrakenteiden ominaisuudet vaihtelevat suuresti. Tämä vaikuttaa merkittävästi päällysrakenteen toimintaan ja päällysrakenteelle asetettaviin vaatimuksiin.



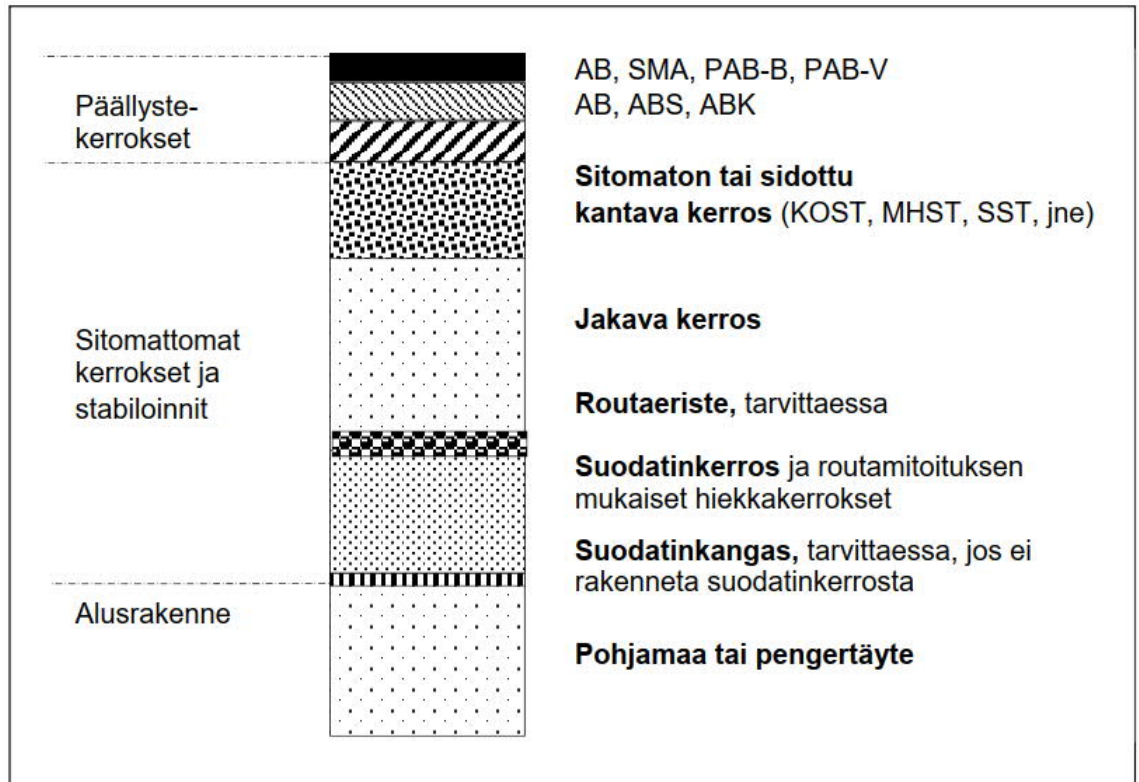
Kuva 1 Erilaiset tien alusrakenteet. (Ehrola 1996)

Päällysrakenteen ensisijaisena tehtävänä on ottaa sille tuleva liikennekuormitus vastaan ja jakaa se alusrakenteelle. Toinen tärkeä tehtävä on alusrakenteen routasuojaus. Koska alusrakenteiden, liikennekuormituksen ja muiden olosuhteiden ominaisuudet vaihtelevat suuresti, myös päällysrakenteiden ominaisuudet vaihtelevat kohteesta riippuen. (Ehrola 1996) Esimerkiksi saviselle pehmeikölle Etelä-Suomessa rakennettu moottoritie vaatii erityyppisen päällysrakenteen kuin kovalle pohjamaalle Pohjois-Suomeen rakennettu vähäliikenteinen maantie.

Päällysrakenteet voidaan jakaa joustaviin, puolijäykkiin ja jäykkiin päällysrakenteisiin. Jäykässä päällysrakenteessa perinteinen kulutuskerros ja kantava kerros on korvattu betonilaatalla. Puolijäykässä päällysterakenteessa päällyste on sidottu bitumilla ja vähintään kantava kerros on sidottu hydraulisella sideaineella. Joustavassa päällysrakenteessa päällyste on sidottu bitumilla ja kantava kerros voi olla bitumilla sidottu tai sitomaton rakenne. Tämän kolmijaon ulkopuolelle jäävät soratiet ja kiveyspäällysteiset tiet. (Ehrola 1996)

2.1.2 Rakennekerrokset

Tierakenteen päällysrakenteessa on yleensä 3-5 rakennekerrosta. Kerrokset voivat olla luonnonmateriaaleja tai tehty jalostetuista materiaaleista. Kerrokset voivat olla sidottuja tai sitomattomia. Kerroksellisen rakenteen ideana on käyttää erilaisia materiaaleja eri kerroksissa. Tämä mahdollistaa toimivan ja taloudellisesti järkevän rakenteen, joka jakaa jännitykset alusrakenteelle ja jolla on tarpeeksi paksuutta routimista vastaan. Kuvassa 2 on esitetty tyypilliset päällysrakennekerrokset. (Ehrola 1996)



Kuva 2 Tien päällysrakennekerrokset. (Liikennevirasto, 2018a)

Alusrakenteen päällä sijaitsevan suodatinkerros muodostaa kapillaarikatkon alusrakenteen ja ylempien rakenteiden välille sekä estää alusrakenteen ja päällysrakenteen kerroksien sekoittumisen. Lisäksi suodatinkerros lisää tien kuormituskestävyyttä jakamalla kuormia laajemmalle alueelle ja pienentämällä routanousueroja. Suodatinkerroksen on oltava routimatonta ja se muodostaa kapillaarikatkon. Tietyissä tilanteissa myös lievästi routivaa suodatinkerrosta voidaan käyttää (Liikennevirasto, 2018a). Suodatinkerros voidaan tehdä heikompilaatuisesta materiaalista kuin ylemmät kerrokset. (Ehrola 1996)

Jos suodatinkerrosta ei tarvita, käytetään suodatinkangasta (Liikennevirasto, 2018a). Tätä ratkaisua voidaan käyttää esimerkiksi hyvin kantavalla, routimattomalla ja kuivalla pohjamaalla.

Routaeristettä käytetään tierakenteessa estämään roudan tunkeutumista syvemmälle tierakenteeseen. Tätä harvinaista ratkaisua voidaan käyttää esimerkiksi silloin, jos ei haluta rakentaa paksua suodatinkerrosta.

Jakava kerros jakaa kantavalta kerrokselta tulevan kuormituksen hallitusti suodatinkerrokselle. Lisäksi se johtaa rakenteeseen suodatuneet vedet pois ja toimii kapillaarikatkona.

Joustavassa päällysrakenteessa kantava kerros voi olla sitomaton tai ylösastaan bitumilla sidottu. Kantavan kerroksen tehtävänä on olla jyrkempi perusta päällystekerroksille

ja jakaa kuormia tehokkaasti alapuolisille kerroksille. Kantava kerros on tierakenteen laadukkainta sitomatonta materiaalia. (Ehrola 1996)

Päällystekerrosten tehtävä on sekä toiminnallinen että rakenteellinen. Toiminnallisesti kerroksen pitää olla pinta, jota on taloudellista, turvallista ja miellyttävää ajaa koko suunnitellun käyttöajan ajan. Rakenteellisesti päällystekerrosten tehtävänä on estää veden pääsy tierakenteeseen ja lisätä päällysrakenteen kuormituskestävyyttä. (Ehrola 1996)

2.1.3 Rakennekerrosten luokittelu ominaisuuksien perusteella

Tierakenteen suunnittelussa käytetään GEO-maalajiluokitusta. Tämä mahdollistaa maan materiaalien luokittelun sekä ominaisuuksien arvioinnin. (Liikennevirasto 2018)

Päällysrakenteen sitomattomat kerrokset ovat joustavalla tierakenteella yleensä jalostettuja kiviaineksia, eli esimerkiksi murskattuja tai seulottuja. Rakeisuus on ensimmäinen ja tärkein sitomattomien rakennekerroksien materiaalien laatua luokitteleva tekijä. Esimerkiksi hienoainespitoisuus eli halkaisijaltaan alle 0,063 mm rakeiden osuus on tärkeä mittari kiviaineksen toiminnasta. (Liikennevirasto 2018) Hienoainespitoisuus kertoo osaltaan mm. materiaalin routivuudesta (Liikennevirasto 2018), jäykkyysominaisuuksia kuvaavasta moduuliarvosta (Liikennevirasto 2018), vedenläpäisevyydestä (Liikennevirasto 2018) sekä siitä, onko kyseessä kitka- vai koheesiomaa.

Joustavalla tierakenteella käytetään päällysteenä bitumilla sidottua asfalttia. Päällyste voi olla asfalttibetonia (AB), pehmeää asfalttibetonia (PAB) tai kivimastiksiasfalttia (SMA). Asfalttimassan tärkeimmät ominaisuudet ovat kiviaineksen rakeisuus ja massan sideainepitoisuus. Tärkeitä päällysteen laatua kuvaavia luokittelevia ominaisuuksia ovat edellisten lisäksi muun muassa tyhjätila, pakkasenkestävyys, deformaatiokestävyys ja kulumiskestävyys. (PANK ry. 2017)

2.2 Olosuhteet

Merkittävimmät liikennekuormituksen kuormitettaman tierakenteen käyttäytymiseen vaikuttavat olosuhteet ovat vesi, lämpötila ja routa (Ullidtz 1987). Näiden olosuhteiden aiheuttamia kuormituksia kutsutaan ympäristökuormituksiksi. Olosuhteet tierakenteessa vaihtelevat merkittävästi vuodenaikojen ja vuoden mukaan. Tierakenteen käyttäytymisen muuttuu siis oleellisella tavalla vuodenaikojen ja vuodesta riippuen. (Ehrola 1996)

2.2.1 Kosteuden vaikutus

Kosteuden vaikutus tarkoittaa tässä sulan ja jäätyneen veden vaikutusta tierakenteen olosuhteisiin. Liian suuri määrä vapaata vettä tierakenteen sitomattomassa kerroksessa

heikentää rakenteen lujuutta (Ehrola 1996) (Dawson et al. 2009). Jää rakenteessa suurentaa rakenteen kantavuutta (Ehrola 1996). Vesi päällysteen pinnalla nopeuttaa nastarengaskulutusta. (Ehrola 1996). Veden, pakkasen ja routivan materiaalin yhteisvaikutus tiessä voi aiheuttaa routanousua ja routavaurioita tiehen (Ehrola 1996) (Rahiala 1988). Liikennekuormituksen aikaansaama korkea dynaamisen kuormituksen aiheuttama vedenpaine voi pumpata hienorakeista materiaalia alusrakenteesta päällysrakenteeseen ja heikentää kantavuutta (Huang 2012). Rakennekerroksen ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi siihen, miten vesi käyttäytyy ja vaikuttaa kerroksen toimintaan (Ehrola 1996).

Vettä esiintyy tierakenteessa vapaana vetenä, kapillaarivetenä, sidottuna vetenä ja vesihöyryinä. Näistä erityisesti vapaan veden määrän kasvu heikentää tierakenteen lujuutta. Vapaa vesi on vettä, joka liikkuu rakenteessa painovoiman vaikutuksesta. Kapillaarivesi on vettä, joka nousee kapillaarivoiman vaikutuksesta pohjavedenpinnan yläpuolelle. (Ehrola 1996)

Maarakenteen kuormituskestävyys riippuu pääosin leikkauslujuudesta. Maan leikkauslujuuteen vaikuttavat tekijät ovat tehokas koheesio, kokonaisjännitys, huokosvedenpaine ja tehokas kitkakulma kaavan 1 mukaisesti

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_w) * \tan\phi' \quad (1)$$

jossa τ_f on leikkauslujuus, c' on tehokas koheesio, σ on kokonaisjännitys, u_w on huokosvedenpaine ja ϕ' on tehokas kitkakulma. Kaavan 1 mukaisesti huokosvedenpaineen lisääminen pienentää leikkauslujuutta, minkä seurauksena kuormituskestävyys heikkenee ja myös maan kimmo- ja muodonmuutosominaisuudet heikentyvät. (Ehrola 1996)

Tierakenteessa olevassa karkearakeisessa kitkamaakerroksessa vapaan veden määrä on yleensä pieni. Tällaisessa vettä hyvin läpäisevässä kerroksessa vesi ei yleensä heikennä kerroksen kantavuutta. Kuitenkin, jos kyllästysaste nousee 80-85% asti, voi huokosveden ylipaine liikennekuormituksen alla heikentää leikkauslujuutta ja kantavuutta merkittävästi. (Ehrola 1996)

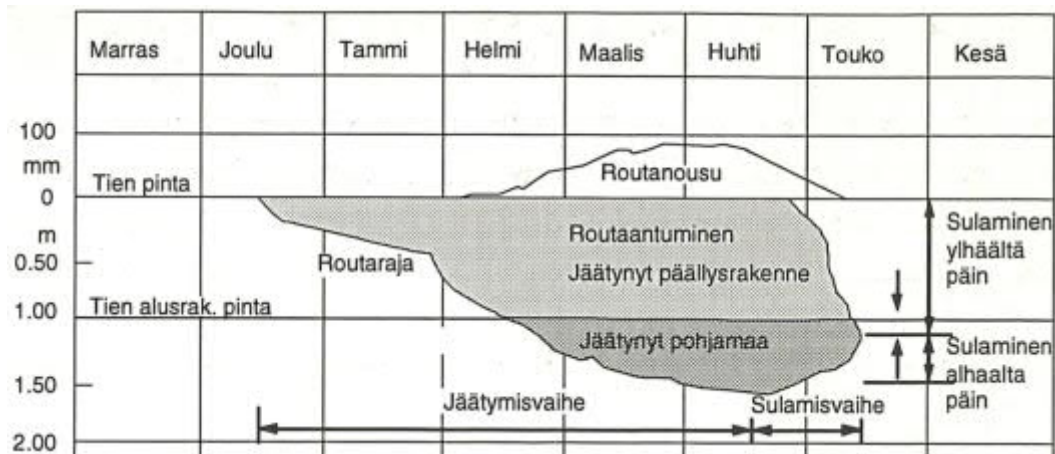
Hienorakenteisen koheesiomaan ominaisuudet riippuvat voimakkaasti vesipitoisuudesta. Koheesiomaan leikkauslujuus rakentuu pintavoimista rakeiden välillä. Vesipitoisuuden noustessa koheesiomaan leikkauslujuus heikkenee. (Ehrola 1996)

Suodatinkerroksen ja suodatinkankaan tehtävänä on mm. estää hienorakeisen materiaalin pumppautuminen muihin rakennekerrokseen vapaan veden mukana. (Ehrola 1996) Luonnollisesti hyvä kuivatus on ratkaisu tähän ongelmaan. Hyvä kuivatus ratkaisee myös monia muita ongelmia.

Tierakenteessa käytetään myös jalostettuja kiviaineksia, kuten murskeita (Liikennevirasto, 2018a). Murskeet käyttäytyvät pääosin kuten kitkamaat.

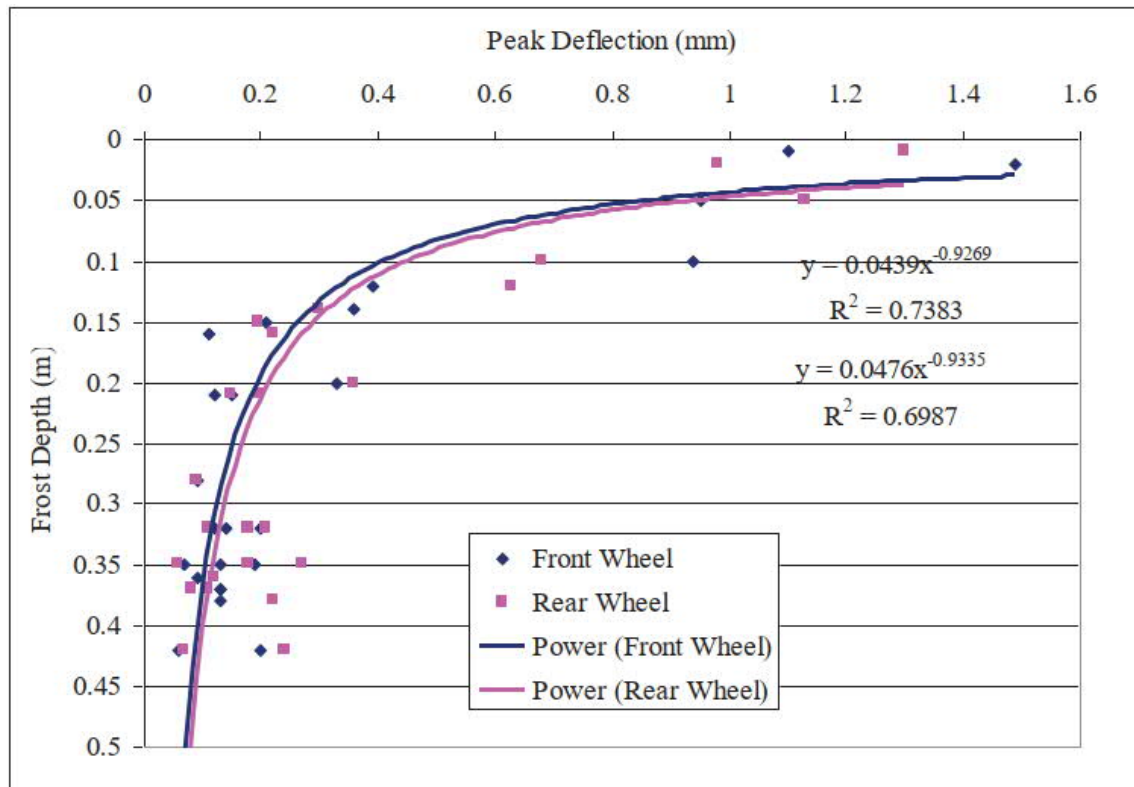
Vesi päällystekerroksen pinnassa lisää nastarengaskulutusta (Ehrola 1996). Asfalttipäällysteen jatkuva kontakti veteen voi hajottaa asfalttiseosta (Huang 2012). Huangin mainitsemasta veden aiheuttamasta asfalttiseoksen hajoamisesta ei löytynyt tarkempaa tietoa Suomen olosuhteissa.

Maan jäätymiseen tai jäätyneen etenemiseen eli routaantumiseen liittyviä peruskäsitteitä on esitetty kuvassa 3 ja kuvassa 6. Routaraja on sulan ja jäätyneen kerroksen raja jäätyneen kerroksen alapinnassa. Routan sulaminen tarkoittaa routaantuneen maan sulamista. Routiminen on sellaista routaantumista, jonka aikana routiva maakerros paisuu ja aiheuttaa rakenteen pinnassa routanousua. (Ehrola 1996)



Kuva 3 Ote routaan liittyvistä peruskäsitteistä (Ehrola 1996).

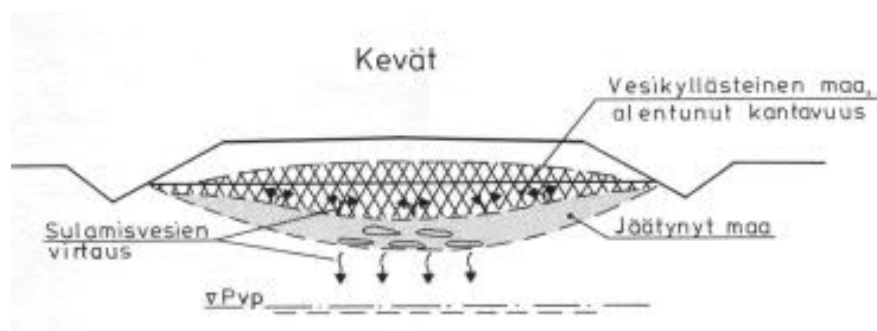
Jäätyneet vesi rakennekerroksessa suurentaa merkittävästi kerroksen kuormituskestävyyttä. Jäätyneessä kerroksessa on myös suurempi vetojännitysten sietokyky kuin sulalla rakenteella. Mitä hienompirakeista jäätyneet kerros on ja mitä enemmän siinä on vettä, sitä enemmän routaantuminen suurentaa sen kuormituskestävyyttä. Kokonaisuutena voidaan sanoa, että routaantuessa maakerroksen kuormituskestävyys kasvaa merkittävästi, jolloin kerrokseen kohdistuvat muodonmuutokset ja rasitukset suhteessa kuormituskestävyyteen ovat pieniä verrattuna sulaan rakennekerrokseen. (Ehrola 1996) Kuvassa 4 on esitetty, kuinka routan syvyyden kasvu pienensi liikennekuormituksen aiheuttamat tien pinnan pystysiirtymät Vesilahdella sijaitsevassa, alemman palvelutason tierakenteen koekohteessa.



Kuva 4 Roudan syvyyden vaikutus linja-auton aiheuttamaan tien pinnan pysyisiirtymään alemman tason tierakenteella Vesilahdella. (Luomala 2019)

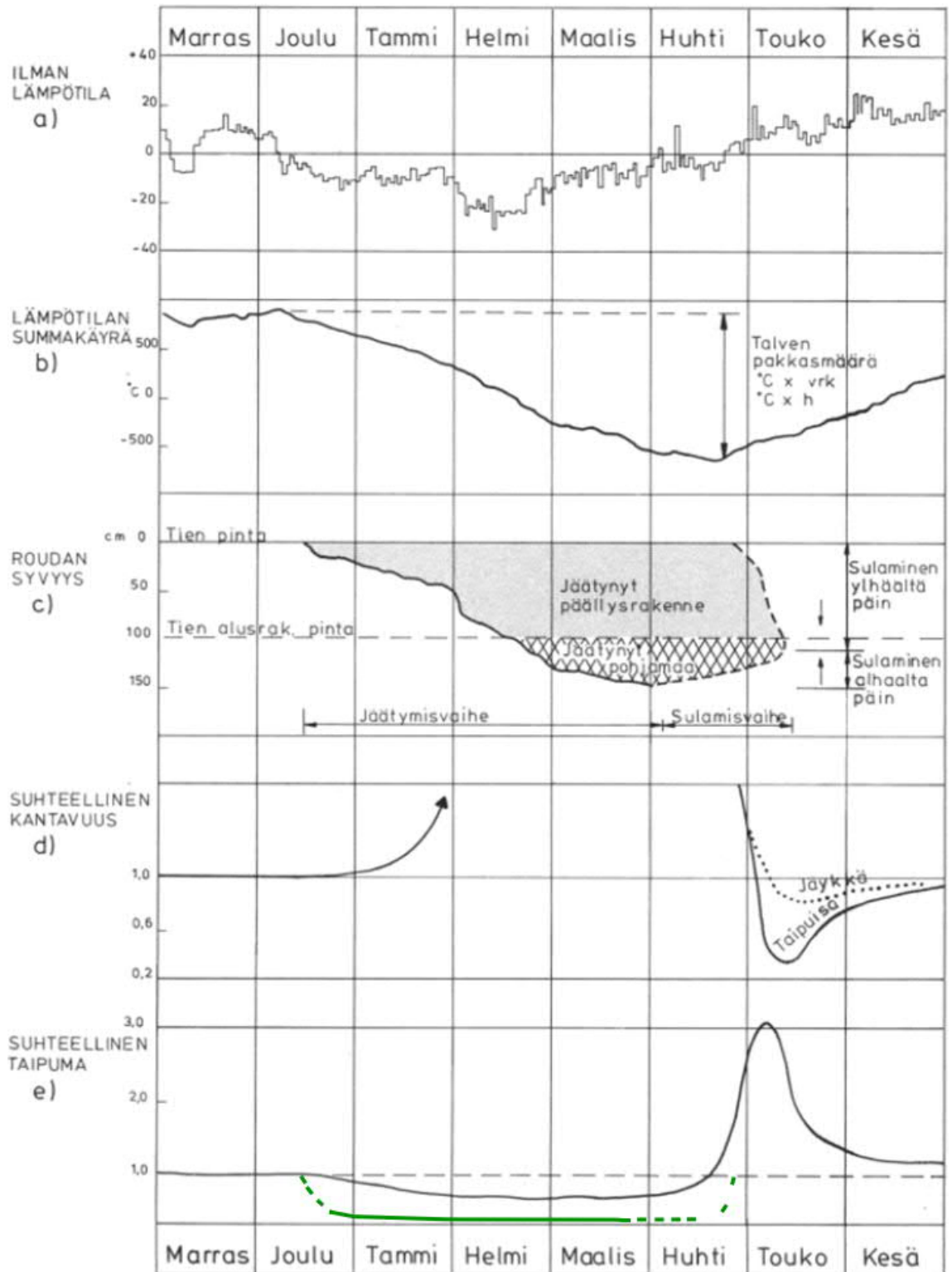
Hienorakeisilla materiaaleilla routaantuneen kerroksen lujuuteen vaikuttaa merkittävästi kuormituksen kesto. Mitä lyhyempi kuormitus, sitä suurempi on routaantuneen kerroksen kuormituskestävyys. Liikennekuormituksen aiheuttama syklinen kuormitus on lyhytaikaista. (Ehrola 1996)

Roudan sulaminen ylhäältä päin johtaa tilanteeseen, jossa routaantuneen kerroksen päällä oleva vesi ei pääse purkautumaan pois tierakenteesta routaantuneen kerroksen läpi. Tämä voi aiheuttaa kyllästysasteen nousua routaantuneen kerroksen yläpuolisissa kerroksissa. Yhdistettynä liikennekuormitukseen ilmiö voi heikentää vedellä kyllästyneen kerroksen kantavuutta merkittävästi. (Ehrola 1996) Ilmiötä havainnollistetaan kuvassa 5.



Kuva 5 Roudan sulamisvaiheen aiheuttama alentunut kantavuus. Routaantunut maa estää veden purkautumisen pois tiestä (Rahiala 1988)

Kuvassa 6 on esitetty periaatekuva routaantumisen, roudan sulamisen, rakenteen suhteellisen kantavuuden ja suhteellisen taipuman kehitymisestä kausiroudan alueella. Kuvassa ei ole huomioitu mahdollisia jäätymis-sulamissyklejä, kevään mahdollisia sulamis-jäätymissyklejä eikä päällysteen lämpötilan vaikutusta. Kuvasta näkee routaantumisen merkittävän vaikutuksen talviaikaiseen kantavuuden nousuun. Samalla kantavuuden merkittävä heikentyminen keväällä roudan sulamisen alkuvaiheessa ja heti sulamisen jälkeen näkyy selkeästi. Kuva esittää todennäköisesti huonosti kuivatettua tierakennetta. Kuvan 4 perusteella alemman tason tierakenteen routaantumisen aiheuttama taipuman pieneneminen on selkeästi merkittävämpää kuin kuvan 6 kohdassa e) on esitetty. Vaihtoehtoinen, routaantumisen voimakkaan vaikutuksen huomioiva malli suhteellisen taipuman käyttäytymisestä on lisätty alkuperäiseen kuvaan. Vaihtoehtoinen malli on lisätty piirtämällä kuvaan 6 e) vihreä käyrä.



Kuva 6 "Lämpötilan, pakkasmäärän, roudan syvyyden ja kantavuuden vaihtelut kausiroudan alueella." (muokattu Rahiala 1988) Vaihtoehtoinen malli, joka huomioi routaantumisen voimakkaan vaikutuksen taipumaan, on lisätty kuvaan. Vaihtoehtoinen taipuman käyttäytyminen on lisätty piirtämällä vihreä käyrä kohtaan e).

Tierakenteen routiminen voi aiheuttaa haittaa tierakenteelle, varsinkin jos routanousu on epätasaista. Tyypillisiä routimisen haittoja ovat esimerkiksi halkeamat päällysteessä ja

tien pinnan epätasaisuus. Routimisen edellytykset ovat veden kulkeutuminen routarajalle, jatkuva pakkanen joka jäädyttää routarajalle virtaavan veden ja se että jäätyvän kerroksen materiaali on routivaa. (Ehrola 1996)

2.2.2 Lämpötilan vaikutus

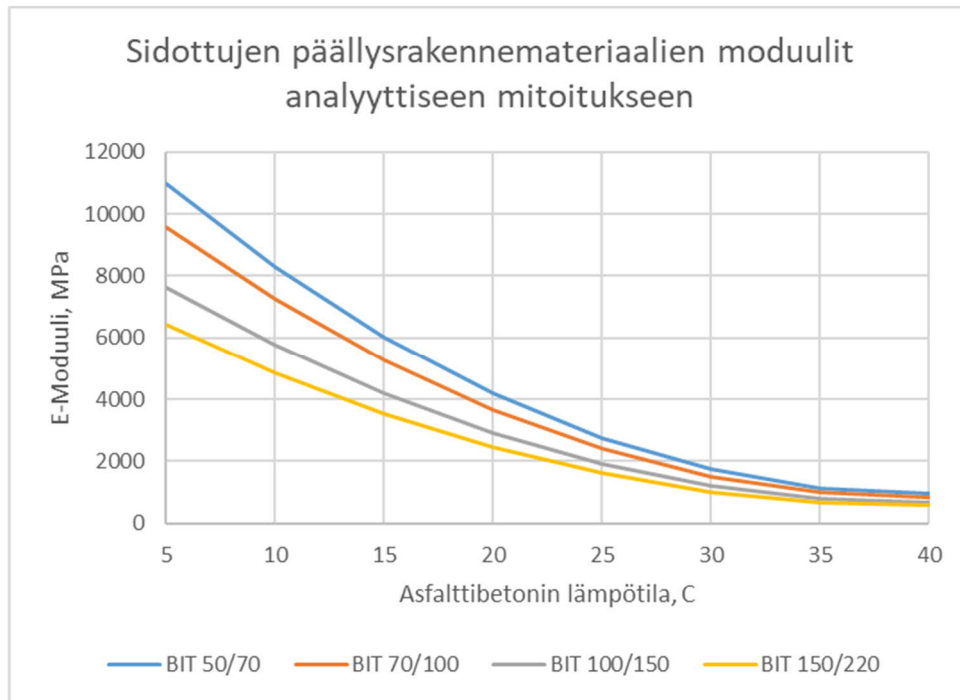
Lämpötilalla on merkittävä vaikutus bitumilla sidotun päällysteen ominaisuuksiin. Sitomattomien rakennekerrosten ominaisuuksiin lämpötilalla ei ole merkittävää vaikutusta, kun jään vaikutus rajataan tarkastelun ulkopuolelle. (Ehrola 1996) (Huang 2012)

Päällysteen lämpötilaan vaikuttavat auringonpaiste, ilman lämpötila, päällysteen heijastavuus ja tuuli (OECD 1988). Päällysteen heijastavuus on yleensä pieni, joten auringonpaisteen vaikutus on suuri (Ehrola 1996). Voidaan olettaa, että päällysteen lämpötilaan vaikuttaa myös päällysteen alapuolisten kerrosten lämpötila. Päällysteen pinnan lämpötila voi nousta kuumana päivänä jopa +50 asteeseen (Ehrola 1996).

Bitumilla sidotulla päällysteellä on viskoelastisen materiaalin ominaisuuksia. Päällysteen käyttäytyminen riippuu lämpötilasta ja kuormitusajasta. Lämpötilan noustessa päällysteen jäykkyys pienenee ja muodonmuutoskestävyys paranee. Lämpötila vaikuttaa päällysteeseen myös lämpölaajenemisen – ja kutistumisen kautta. Lämpölaajeneminen ei ole ongelma bitumilla sidotuille rakennekerroksille. Alhaiset lämpötilat voivat sen sijaan aiheuttaa kutistumishalkeamia. Näitä syntyy, kun päällysteen kutistumisesta aiheutuva termien vetojännitys ylittää vetolujuuden. (Ehrola 1996)

Texasissa tehdyn tutkimuksen mukaan suurin tien pinnan pystysiirtymä voisi esiintyä keuhällä asfaltin lämpenemisen johdosta, kun tierakenne on suhteellisen kuiva (Huang 2012). Tuloksen soveltaminen suoraan Suomen tierakenteisiin on kuitenkin kyseenalaista ilmasto-olosuhteiden ja päällysteiden eroavaisuuden takia.

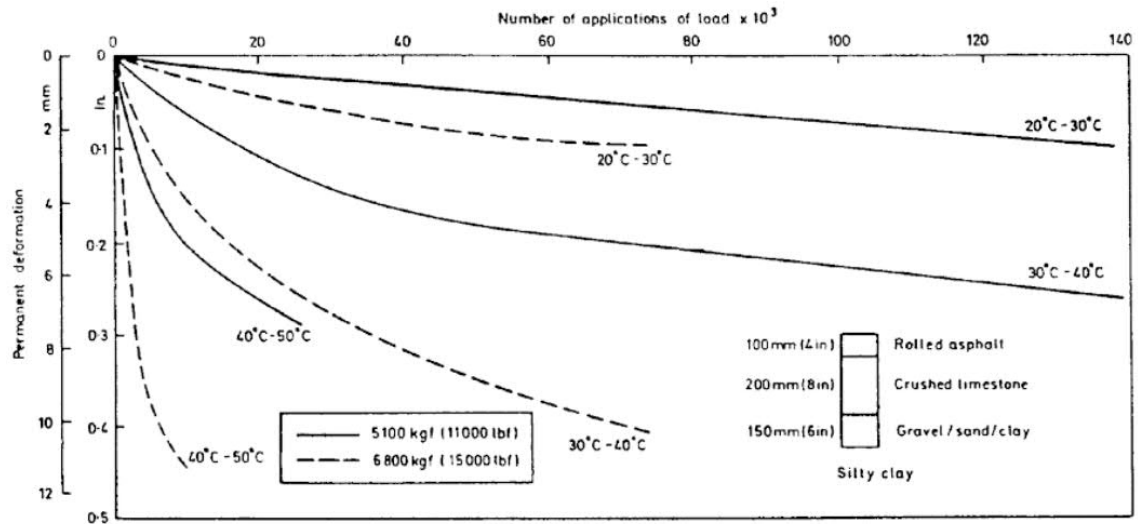
Päällysteen lämpötilan vaikutus päällysteen jäykkyyteen on esitetty kuvassa 7. +35-asteisen päällysteen moduuli on vain 14% +10-asteisen päällysteen moduulista. +20-asteisen päällysteen moduuli on 50% +10-asteisen päällysteen moduulista. Jäykkyyden pienentyessä päällyste jakaa kuormaa huonommin alapuolisille rakennekerroksille (Ehrola 1996). Lämpötilan vaikutus päällysteen jäykkyyteen on huomattava, ja tämä voi vaikuttaa kriittisiin jännityksiin merkittävästi (Ehrola 1996).



Kuva 7 Bitumilla sidottujen päällysrakennemateriaalien moduulit. Oletuksena on ajonopeus 60 km/h. Kuvaajat perustuvat tiehallinnon ohjeeseen (Tiehallinto 2004).

Lämpimät sääolosuhteet yhdistettynä raskaaseen liikenteeseen aiheuttavat päällysteen deformatumista (PANK ry. 2017). Toisaalta kuumassa päällysteessä pyöräkuormien ajolinjojen limittyminen ja hajonta voivat korjata osan päällysteen muodonmuutoksesta. (Ehrola 1996)

Kuvassa 8 on esitetty lämpötilan ja pyöräkuorman vaikutus tien pinnan pysyvään pysyysirtymään. Kuvasta huomataan selkeästi, että asfaltin lämpötila vaikuttaa oleellisesti liikennekuormituksen aiheuttamaan tierakenteen pysyvään taipumaan.

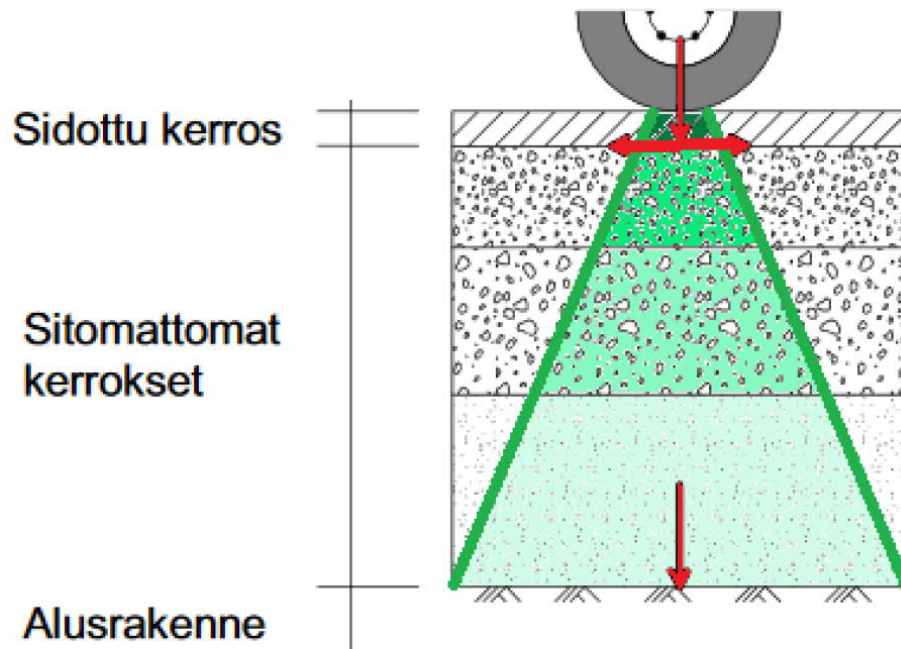


Kuva 8 Lämpötilan ja pyöräkuorman vaikutus pysyvään muodonmuutokseen (TRB OF NATIONAL ACADEMIES. 2004)

2.3 Liikennekuormituksen vaikutus

Liikennekuormitus on merkittävin kuormitustekijä tierakenteelle (Ehrola 1996). Tierakenteen kannalta merkittävimmän liikennekuormituksen muodostavat raskaat ajoneuvot eli kuorma- ja linja-autot (Ehrola 1996) (Luomala 2019). Liikennekuormitus on laadultaan vaihtelevaa, sillä mm. tiestöllä liikkuvat ajoneuvotyypit ja niiden ominaisuudet vaihtelevat. Luonnollisesti myös liikennekuormituksen vaikutus tierakenteeseen vaihtelee. (Ullidtz 1987) (Ehrola 1996) (Mallick & El-Korchi 2013). Liikennekuormitusta käsitellään tässä yhden ajoneuvon aiheuttamana dynaamisena kuormituksena tielle.

Liikennekuormitus jakautuu tierakennekerroksiin niin, että ylempänä tierakenteessa kuormitus vaikuttaa pienellä alueella. Alemmaksi tierakenteessa mentäessä kuormitus jakautuu laajemmalle, jolloin alempiin rakennekerroksiin kohdistuu pienemmät jännitykset. (Ehrola 1996) Kuvassa 9 on esitetty jännityksen jakautumisen periaate pyöräkuorman alla. Jännityksen jakautuminen on myös nähtävissä kuvassa 10 esitetyistä eri syvyyksiltä mitatuista pystyjännityksistä paripyöräkuorman alla.



Kuva 9 Tierakenteen tyypilliset kriittiset rasitukset ja pyöräkuorman periaatteellinen jakautuminen tierakenteeseen. (Mäki 2017)

Tierakenteen ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti siihen, miten liikennekuormitus vaikuttaa ja miten muutos kuormituksessa vaikuttaa tierakenteeseen (Belt et al. 2002). Tätä on käsitelty tarkemmin kappaleissa 2.2 ja 2.4.

Kuormitusvaikutus riippuu akselipainoista (Ehrola 1996) (Ullidtz 1987) (Mallick & El-Korchi 2013), akselimäärästä (Ehrola 1996), ajoneuvon kokonaispainosta (Ullidtz 1987) (Ehrola 1996), rengaspaineista (Ehrola 1996) (Ullidtz 1987), ajoneuvon nopeudesta (Mallick & El-Korchi 2013) (Ullidtz 1987), renkaiden tyypeistä (Ehrola 1996) (Mallick & El-Korchi 2013), jousituksesta (Ehrola 1996), akselistosta (Ehrola 1996) (Ullidtz 1987), ajolinjasta (Vuorimies et al. 2018) ja muista tekijöistä johtuvasta dynaamisesta kuormituksesta (Ehrola 1996). Yksinkertaistettuna liikennekuormituksen voimakkuuteen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kuormitusajoneuvon ominaisuuksista ja kuormitusajoneuvon liikkumisesta johtuviin tekijöihin.

On tärkeää ymmärtää, että liikennekuormitus on dynaaminen kuormitus. Ajoneuvon ollessa paikallaan sen tierakenteelle aiheuttamat kuormat ovat staattisia. Ajoneuvon liikkuessa kuormitus muuttuu dynaamiseksi mm. tien epätasaisuuden takia. Dynaaminen kuormitus lisää tierakenteen vaurioitumista. (Hjort et al. 2008). Toisaalta tutkimuksissa on mitattu, että rekan nopeuden kasvaminen vähentää syntyvää tien pinnan pystysiirtymää eli taipumaa (TRB OF NATIONAL ACADEMIES. 2004). Rekan aiheuttaman dynaamimisen kuormituksen hetkellinen lisäkuorma tierakenteelle voi olla 10-40 % rekan aiheuttaman staattisen kuorman suuruudesta (OECD. 1998). Dynaaminen kuormitus on

siis ajoittain suurempi kuin staattinen kuormitus. Toisaalta, kun tarkastellaan liikennekuormitusta staattisena, niin silloin ei huomioida ajoneuvon liikkumisen aiheuttamaa lyhyttä kuormitusaikaa.

2.3.1 Akselimassa

Akselimassa kertoo, kuinka paljon yhdelle ajoneuvon akselille kohdistuu massaa, kun auto on paikallaan tasaisella alustalla eli kuormitus on staattinen. Suomessa suurin sallittu akselimassa on vetävälle akselille 11,5 t ja muulle kuin vetävälle akselille 10 t (Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta. 2019).

Akselimassan jakautumiseen akselin pyörille vaikuttavat ainakin kuormituksen dynaaminen luonne, kuorman jakautuminen ajoneuvossa, tien kaltevuus, jousitus ja auton muu akselisto. Kuorman välittymiseen pyörältä tierakenteeseen vaikuttavat tierakenteen ja renkaan ominaisuudet. (Ehrola 1996)

Akselimassa on yksittäinen, erittäin tärkeä mittari sille, miten ajoneuvon yksittäinen pyörä tai pyöräpari vaikuttaa tierakenteeseen. Yksittäisen akselin akselimassa kasvattaminen lisää pyörän tierakenteeseen aiheuttamia jännityksiä ja tien vaurioitumista. Esimerkiksi mittavassa AASHO-tiekokeessa on havaittu selkeä yhteys akselimassan kasvun ja tien vaurioitumisen välillä. (Ehrola 1996)

2.3.2 Akselisto

Tässä akseliston vaikutukseksi käsitetään akselien määrä ajoneuvossa, akselien sijainti toisiinsa nähden, akselien jakautuminen teleille sekä jousitus. Nämä tekijät vaikuttavat siihen, miten kuormitus vaikuttaa tierakenteeseen. (Ehrola 1996) Ne voivat vaikuttaa tierakenteessa vallitseviin olosuhteisiin, kuten kosteuteen ja viskoelastisen asfalttipäällysteen käyttäytymiseen.

Ajoneuvon akselien etäisyys toisistaan vaikuttaa tierakenteeseen syntyviin jännityksiin, muodonmuutoksiin ja vaurioihin (Hjort et al. 2008). Lyhyt akseliväli lisää kuormitusta, sillä tällöin pyörien kuormitusvaikutus yhdistyy aiemmin eli lähempänä tien pintaa. (Luomala 2019) Ajoneuvoissa akselit ovat yksittäin tai 2-4 akselin teleinä eli ryppäinä (Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta. 2019).

Jousitus vaikuttaa erityisesti dynaamiseen kuormitukseen. Jousituksella on mahdollista vaikuttaa syntyvän dynaamisen kuormituksen voimakkuuteen ja aikaan. Jousituksen vaikutuksesta akselin dynaaminen kuormitus voi olla hetkellisesti merkittävästi isompi tai pienempi kuin vastaavan akselin staattinen kuorma. Mitä vähemmän jäykkä jousitus on,

sitä pienempiä dynaamisia kuormia jousitus voi aiheuttaa. Toisaalta mitä vähemmän jousituksessa on jäykkyyttä, sitä herkempi ajoneuvo on kaatumaan. Tierakenteen kannalta hyvä jousitus vähentää ajoneuvon pystysuuntaisia liikkeitä, jotka johtuvat mm. tien epätasaisuudesta sekä vaimentaa syntyneen pystysuuntaisen liikkeen sopivasti. (Hjort et al. 2008)

Jousitus voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: lehtijousiin, kaarijousiin ja ilmajousiin. Näistä lehti- ja kaarijouset ovat teräsjousia. Lehtijousi on vanha malli, jonka toiminta riippuu paljon kuormitusolosuhteista ja joka aiheuttaa eniten dynaamista kuormitusta tierakenteelle. Kaarijouset toimivat lehtijousia paremmin ajomukavuuden ja tierakenteen kannalta. Ilmajouset ovat tierakenteen kannalta paras vaihtoehto, ja ne aiheuttavat vähemmän vaurioita tierakenteeseen kuin teräsjouset (OECD. 1988). Ilmajouset ovat kuitenkin teräsjousia kalliimpi vaihtoehto. (Ehrola 1996) Tutkimuksessa havaittiin, että teräsjousi aiheuttaa 15% suuremman lisäyksen epätasaisuuteen eli IRI-arvoon ja 10% enemmän päällysteen halkeilua verrattuna ilmajouseen. (OECD. 1998). Huomionarvoista on, että jousen vaikutukseen vaikuttaa huomattavasti tierakenteen ominaisuudet (OECD. 1998).

2.3.3 Rengastyypit

Raskaiden ajoneuvojen renkaiden mallit ja rengaspaineet vaikuttavat merkittävästi tierakenteeseen kohdistuviin jännityksiin ja tierakenteen vaurioitumiseen (Ehrola 1996) (Mallik & El-Korchi 2013). Renkaat voidaan jaotella sen mukaan, onko rengas ohjaavalla, vetävällä vai rullaavalla akselilla. Renkaat voidaan myös jaotella leveytensä mukaisesti alle 350 mm levyisiin yksikköpyöriin, leveisiin yli 350 mm levyisiin yksikköpyöriin ja pari-pyöriin. (Haakana 2014)

Renkaan aiheuttamat pystyjännitykset tierakenteen pinnassa voivat olla huomattavasti suurempia kuin rengaspaine. Rengaspaine vaikuttaa huomattavasti pyörän alle muodostuvan jännitysjakautumisen muotoon ja jännitysten suuruuteen. Rengaspaineen kasvattaminen pienentää kontaktipintaa renkaan ja päällysteen välillä lisäten painetta kontaktipinnassa. Rengaspaineen pienentäminen vastaavasti suurentaa pyörän ja päällysteen välisen kontaktipinnan alaa. Akselimassan kasvattaminen suurentaa kontaktipintaa ja akselimassan keventäminen pienentää kontaktipintaa. Liian alhaisella rengaspaineella varustettu rengas ei ole käyttökelpoinen liikenteessä. Tämän seurauksena rengasvalmistajat ovat määrittäneet erisuuruisille kuormille optimirengaspaineet. (Haakana 2014)

Yksinkertaistaen voidaan sanoa, että suurempi rengaspaine aiheuttaa kontaktipaineen kasvua kontaktipinnan keskellä ja akselipainon kasvu aiheuttaa kontaktipaineen kasvua

kontaktipinnan reunoilla (Ehrola 1996) (Mallick & El-Korchi 2013). Rengaspaineen kasvattaminen suurentaa siis jännityksiä renkaan alla. Rengaspaineen kasvu vaikuttaa erityisesti päällysteeseen ja sitomattomien rakennekerrosten yläosiin.

Mitä suurempi kontaktipinta on renkaan ja päällysteen välissä, sitä vähemmän rengas yleensä vaurioittaa tierakennetta. Paripyörillä saavutetaan yleensä suurin kontaktipinta. Lähes samaan kontaktipintaan voidaan päästä uuden sukupolven yksikköpyörillä, joiden leveys on tyypillisesti 445-495 mm. Tätä kapeammilla yksikköpyörillä kontaktipinta jää selkeästi paripyörää pienemmäksi. Vanhan sukupolven yksikköpyörät ovat yleensä uuden sukupolven pyöriä kapeampia, ja ne vaativat korkeat rengaspaineet. Vanhan sukupolven yksikköpyörät aiheuttavat korkean rengaspaineen ja kapeutensa takia selkeästi uuden sukupolven renkaita enemmän vaurioita tielle. (Haakana 2014)

Paripyörä aiheuttaa yksikköpyörää vähemmän vaurioita tierakenteelle (Ehrola 1996) (Haakana 1996) (Mallick & El-Korchi 2013). Uuden sukupolven 445–495 mm levyiset yksikköpyörät pääsevät kuitenkin lähelle paripyörien toimintaa tierakenteen vaurioitumisen kannalta (Haakana 2014). Dessouky et al. (2013) on verrannut tutkimuksessaan 445 mm levyistä yksikköpyörää ja paripyörää. Dessouky'n tutkimuksesta voidaan päätellä, että paripyörä ei ole tierakenteelle vaurioitumisen kannalta yksiselitteisesti parempi kuin 455 mm levyinen yksikköpyörä. Al-Qadi et al. (2018) tutkimuksessa tullaan siihen johtopäätökseen, että leveät yksikköpyörät aiheuttavat paripyöräasennuksia enemmän vahinkoa tierakenteelle. Al-Qadi et al. mukaan leveiden yksikköpyörien taloudelliset tekijät ja ympäristövaikutukset saattavat tehdä leveistä yksikköpyöristä kokonaisuutta ajatellen paremman vaihtoehdon.

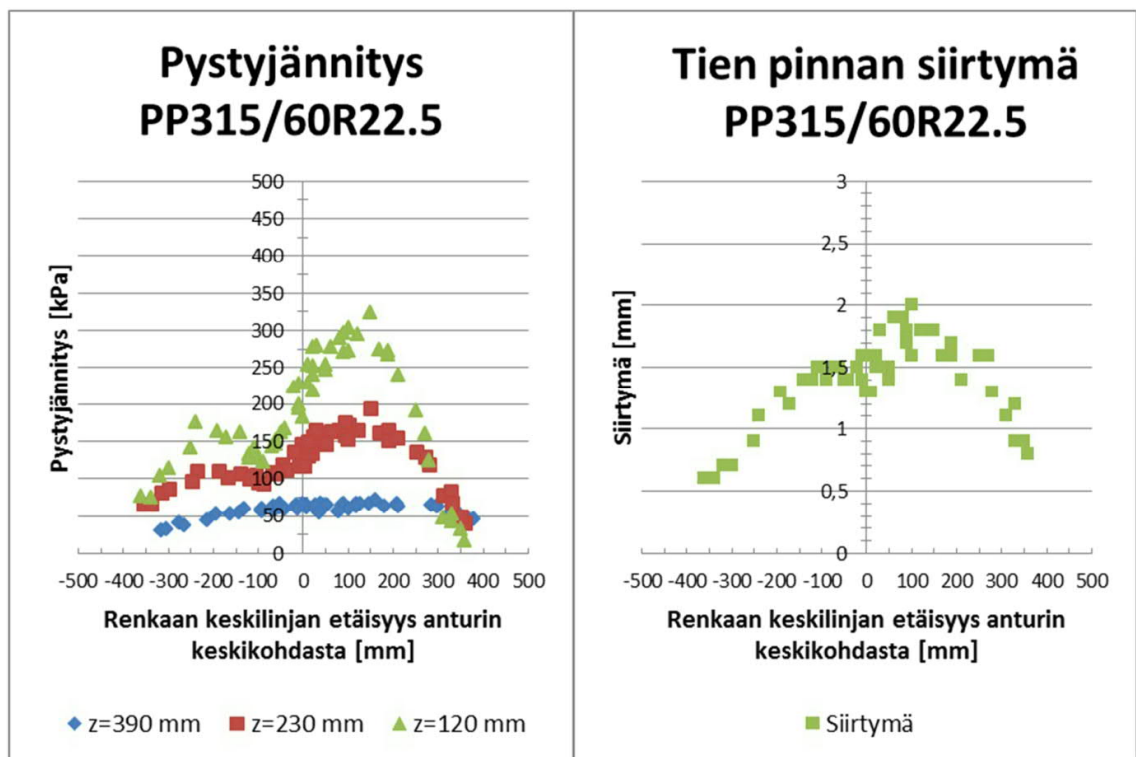
2.3.4 Ajolinja

Ajoneuvojen ajolinjat vaihtelevat tien poikkileikkauksessa. Ajolinjat keskittyvät luonnollisesti ajouriin. Mitä leveämpi tie on, sitä enemmän ajolinjat vaihtelevat. (Ehrola 1996) Autonomisilla ajoneuvoilla ajolinjojen vaihtelu voi poiketa perinteisestä ajolinjojen jakautumisesta (Chen et al. 2019). Erilaisia ajolinjojen jakaumia mallintamalla on havaittu, että jakaumaa muuttamalla voi tien vaurioitumista nopeuttaa (Chen et al. 2019) (Zhou et al. 2019) tai hidastaa (Chen et al. 2019) merkittävästi. Ajolinjojen jakauman vaikutus tien vaurioitumiseen on havaittu myös Tampereen teknillisen yliopiston tekemissä kenttämittauksissa (Vuorimies et al. 2018).

Tässä kappaleessa käsitellään yksittäisen akselin pyöräkuormituksen ajolinjan vaikutusta. Ajolinjojen vaikutus kytkeytyy lisäksi lyhyen aikavälin kuormitushistoriaan ja tien vaurioitumiseen, joita käsitellään kappaleissa 2.4 ja 2.5.1. Kuvassa 10 on esitetty rekan vetoauton telin 1. akselin paripyörän aiheuttamat pystyjännitykset ja siirtymät (Haakana

2014). Mittaukset on tehty koekuormitusajoneuvolla alemman tason tierakenteesta Vesilahden koekohteella (Haakana 2014). Kuvan pyöräpariakselin akselimassa on 76 kN (Haakana 2014). Kuvasta on nähtävissä, että pystyjännitykset ja tien pinnan pystysiirtymät vaihtelevat riippuen siitä, kuinka kaukaa ajolinjasta mittaus suoritetaan.

Kuva 10 havainnollistaa tien urautumisen ja ajolinjan yhteisvaikutusta. Sekä pystyjännitystä että siirtymää tarkastellessa havaitaan, että toinen paripyörän pyöristä aiheuttaa suuremmat vasteet näillä suureilla. Tämä johtuu siitä, että kun paripyörä ajaa puoliksi urassa, niin toinen puoli on uran sivulla. Tämä johtaa siihen, että toinen paripyörän pyöristä ottaa enemmän kuormitusta vastaan aiheuttaen erisuuruiset pystyjännitykset ja siirtymät saman paripyörän eri pyörille. (Haakana 2014)

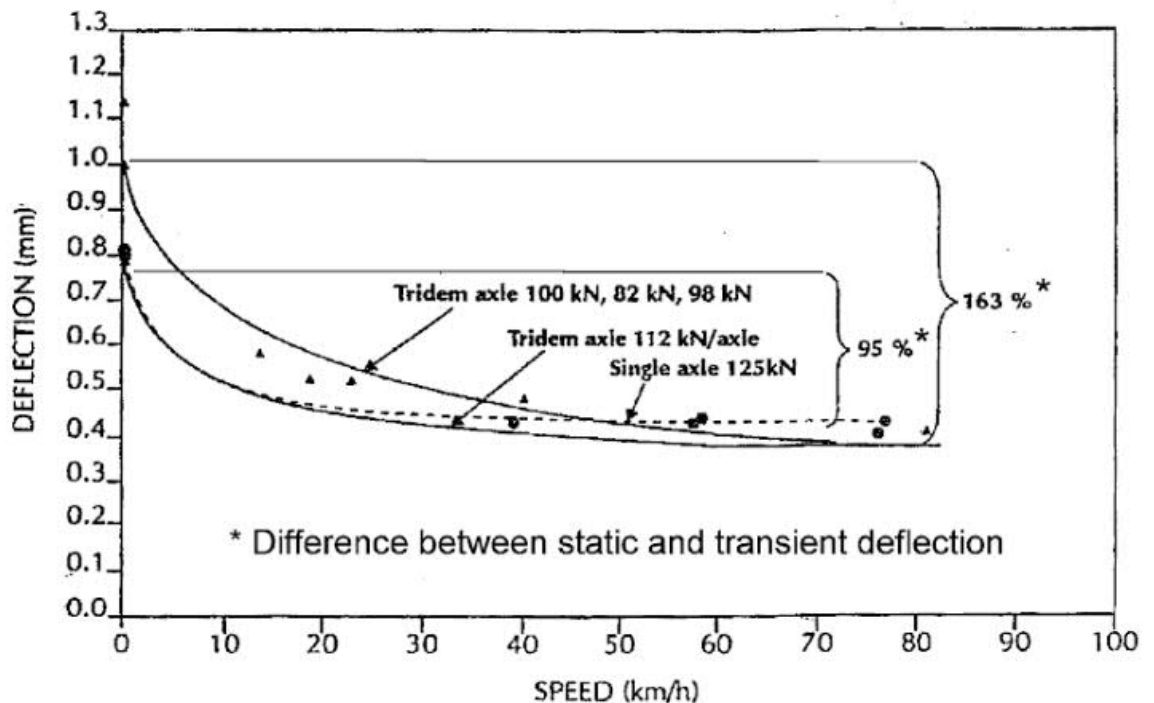


Kuva 10 "Vetoauton telin 1. akselin paripyöräasennuksen 315/60R22.5 aiheuttamat pystysuuntaiset jännitykset ja tien pinnan siirtymät. Jännitykset on esitetty kolmelta eri syvyydeltä päällysteen pinnasta mitattuna. Akselipaino 76 kN." (Haakana 2014)

Tierakenne käyttäytyy eri tavalla pyöräkuorman alla riippuen siitä, kuinka kaukana tien reunasta pyöräkuorman ajolinja kulkee. Kun pyöräkuorma kulkee lähellä tien reunaa, on pyörän alapuolisella tierakenteella heikompi sivutuki verrattuna tilanteeseen, jossa pyöräkuorma olisi kauempana tien reunasta. Tämän seurauksena pyöräkuorma lähellä tien reunaa voi aiheuttaa isompia tien pinnan pystysiirtymiä ja muodonmuutoksia tierakenteessa kuin pyöräkuorma kauempana tien reunasta.

2.3.5 Ajonopeus

Useissa tutkimuksissa on havaittu, että liikennekuormituksen ajonopeuden kasvattaminen vähentää urautumista ja pienentää pyöräkuormituksen alla mitattua tien pinnan pystysiirtymää. Pystysiirtymän muutos on merkittävää ajonopeuden vaihtuessa välillä 0-20 km/h (Mallick & El-Korchi 2013). Elementtimenetelmään perustuvalla analyysillä urautumista tutkiessa havaittiin, että urautuminen väheni puoleen ajonopeuden noustessa ryömintävauhdista nopeuteen 100 km/h. Kuvassa 11 on esitetty ajonopeuden vaikutus taipumaan eli tien pinnan pystysiirtymään. (TRB OF NATIONAL ACADEMIES. 2004) Toisaalta suurempi ajonopeus voi tien epätasaisuuksien kohdalla aiheuttaa suurempia dynaamisia kuormituksia.



Kuva 11 Ajonopeuden vaikutus taipumaan eli tien pinnan pystysiirtymään. (TRB OF NATIONAL ACADEMIES. 2004)

Kappaleessa 2.2.2 on todettu asfalttipäällysteen päällysteen olevan viskoelastinen materiaali, jonka käyttäytymiseen vaikuttavat lämpötila ja kuormitusaika. Liikennekuormituksen ajonopeus vaikuttaa merkittävästi aikaan, jona pyöräkuorma kuormittaa päällystettä. Lyhyt kuormitusaika johtaa elastisempaan muodonmuutokseen. Pidempi kuormitusaika johtaa pysyvämpiin muodonmuutoksiin ja suurempiin venymiin. (Mallick & El-Korchi 2013)

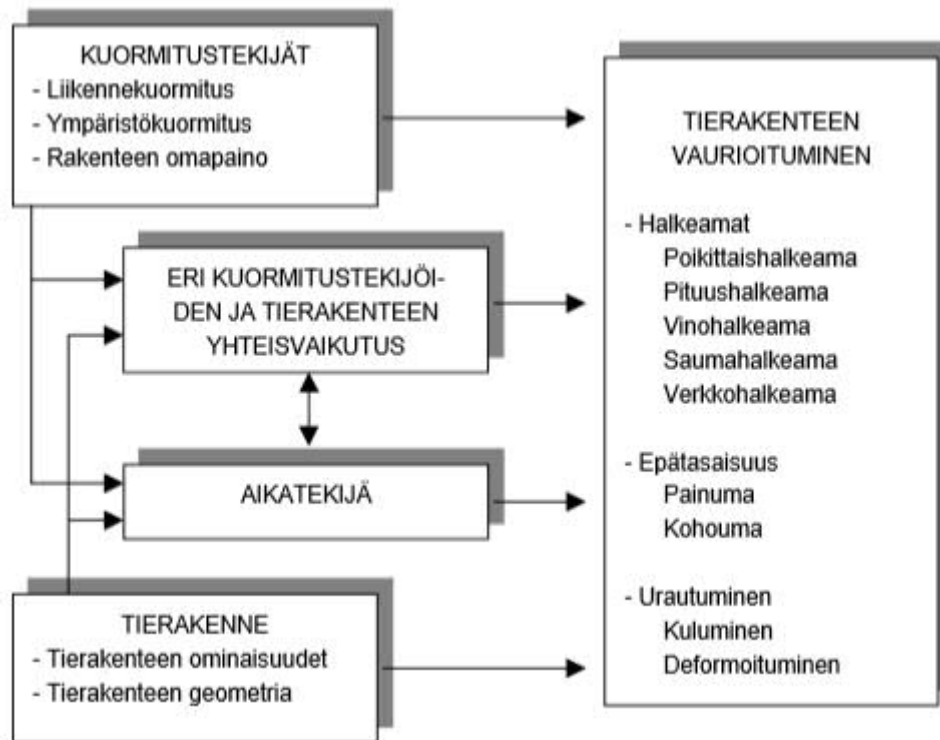
2.4 Tierakenteen vaurioituminen

Tierakenteen vaurioituminen on monimuotoinen prosessi. Tierakenne vaurioituu kuormitusten ja tierakenteen ominaisuuksien yhteisvaikutuksesta. Vaurioitusprosessi muuttuu vaurioitumisen edetessä ja olosuhteiden vaihdellessa. Yleensä ehjä ja toimiva tierakenne vaurioituu hitaasti. Tierakenteen vaurioituminen nopeuttaa vaurioitusprosessia ja mahdollistaa uudentyyppisten vaurioiden synnyn. Tierakenteen vaurioiden syyn selvittäminen voi olla vaikeaa. (Belt 2002)

2.4.1 Vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät

Tierakenteen vaurioitumisen kannalta merkityksellisimpiä rasituksia kutsutaan kriittisiksi rasituksiksi. Kuvassa 9 on esitetty tyypilliset kriittiset rasitukset ja periaate pyöräkuorman jakautumisesta tierakenteeseen. Kuvassa esitetyt sidotun päällysteen alapinnan vetojännitykset ja muodonmuutokset aiheuttavat päällysteen väsymisvaurioitumista. Nämä vetojännitykset ovat merkittävä vaurioitumistekijä paksupäällysteisillä tierakenteilla (Dawson et al. 2009). Sitomattomien kerrosten yläosaan ja alusrakenteeseen kohdistuvat liian suuret jännitykset ja muodonmuutokset aiheuttavat pysyviä muodonmuutoksia tierakenteeseen. Nämä sitomattomien kerrosten muodonmuutokset ovat merkittäviä vaurioitumistekijöitä ohutpäällysteisillä tierakenteilla (Dawson et al. 2009). (Belt et al. 2002) Kriittiset rasitukset voivat esiintyä muuallakin riippuen tierakenteesta, olosuhteista ja kuormituksesta (Ehrola 1996).

Kuvassa 12 on esitetty tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät. Tierakennetta kuormittavat liikennekuormitus, ympäristökuormitus ja rakenteen omapaino. Raskaat ajoneuvot ovat merkittävin liikennekuormitus tierakenteen vaurioitumisen kannalta. Raskaiden ajoneuvojen lisäksi merkittävää liikennekuormitusta aiheuttaa kevyempien ajoneuvojen nastarengaskulutus. Liikennekuormitus on luonteeltaan lyhytaikaista, vaihtelevaa ja toistuvaa. Ympäristökuormitukset ovat luonteeltaan vuodenaikojen mukaan vaihtelevia ja hitaita. Ympäristökuormitukset syntyvät mm. lämpötila-, kosteus- ja routaolosuhteista sekä niiden vaihtelusta tierakenteessa. Rakenteen omapaino kuormitustekijänä voi olla merkittävä tekijä alusrakenteen laadun vaihtuessa ja pehmeiköillä. (Belt et al. 2002)



Kuva 12 Tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät. (Belt et al. 2000)

Liikennekuormitus aiheuttaa päällysteeseen toistuvia puristus- ja vetomuodonmuutoksia. Nämä aiheuttavat päällysteen väsymisvaurioitumista, mikä heikentää päällysteen jäykkyyttä merkittävästi. (Ehrola 1996) (Belt et al. 2006)

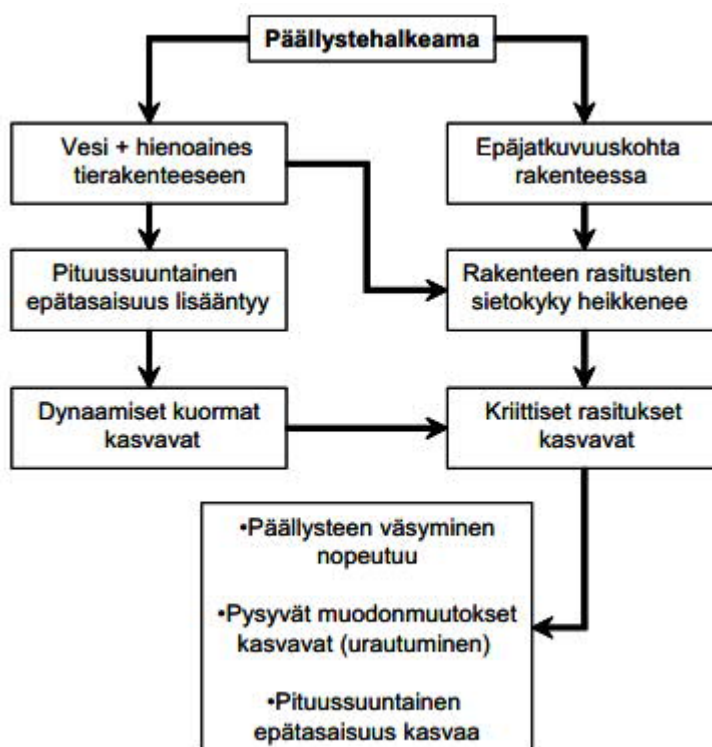
Tierakenteen vanheneminen eli aikatekijä kuvassa 12 vaikuttaa päällysteen bitumiseen sideaineeseen. Sideaineen vanhetessa se kovenee, jolloin päällysteen halkeiluriski kasvaa. Toisaalta päällysteen jäykkyyden kasvu voi pienentää liikennekuormituksesta aiheutuvia rasituksia päällysteen alapuolisissa rakennekerroksissa. (Belt et al. 2002)

Tierakenteen geometria ja ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi tierakenteen vaurioitumiseen. Tierakenteen ominaisuudet ja geometria eivät ole pysyviä, vaan ne voivat muuttua kuormitustekijöiden vaikutuksesta. Kuvassa 12 on esitetty tierakenteen geometrian ja ominaisuuksien vaikutusta tierakenteen vaurioitumiseen.

Tierakenteen vaurioituminen syntyy kuormitustekijöiden ja tierakenteen yhteisvaikutuksesta. Useamman eri kuormitustekijän vaikutus yhdessä voi olla merkittävästi suurempi kuin kuormitustekijät erikseen. Myös tierakenteeseen jo syntyneet vauriot vaikuttavat merkittävästi tierakenteen ominaisuuksiin ja kuormitustekijöihin. (Belt et al. 2002) (Ehrola 1996)

Tierakenteen vaurioituminen aiheuttaa yleensä vaurioitumisen nopeutumista sekä uusien vaurioiden syntyä (Ehrola 1996) (Dawson 2009). Kuvassa 13 on esimerkki siitä, miten halkeama päällysteessä voi kiihdyttää tierakenteen vaurioitumista. Halkeama on

epäjatkuvuuskohta päällysteessä, mikä johtaa rakenteen rasitusten sietokyvyn heikkenemiseen. Tämän lisäksi vesi ja hienoaines pääsevät halkeamasta tierakenteeseen, jolloin tierakenteen sitomattomien kerrosten kyllästysaste ja hienoainespitoisuus kasvavat aiheuttaen rakenteen rasitusten sietokyvyn heikkenemistä. Halkeama päällysteessä sekä vesi ja hienoaines tierakenteessa aiheuttamat myös pituussuuntaisen epätasaisuuden lisääntymistä. Epätasaisuus kasvattaa dynaamista kuormitusta. Dynaamisten kuormien kasvu ja rakenteen rasitusten sietokyvyn heikkeneminen johtavat kriittisten rasitusten kasvuun tierakenteessa. Lopputuloksena päällysteen väsyminen nopeutuu, pysyvät muodonmuutokset eli urautuminen nopeutuu ja pituussuuntainen epätasaisuus kasvaa. (Belt et al. 2002)



Kuva 13 Päällystehalkeaman vaikutus tierakenteen vaurioitumiseen. (Belt et al. 2002)

2.4.2 Vauriotyypit

Vauriotyypit voidaan taulukon 1 mukaisesti jakaa halkeamiin, epätasaisuuksiin ja haajoamisvaurioihin. Vauriot näkyvät usein tien pinnalla, mutta yksinään tämän perusteella ei usein ole mahdollista päätellä vaurion syytä. (Belt et al. 2006) Melkein kaikkien vaurioiden syntyyn vaikuttavat tierakenteen ominaisuudet ja olosuhteet tierakenteessa (Belt et al. 2002) (Ehrola 1996).

Taulukko 1 Joustavan tierakenteen vauriotyypit (Belt et al. 2006)

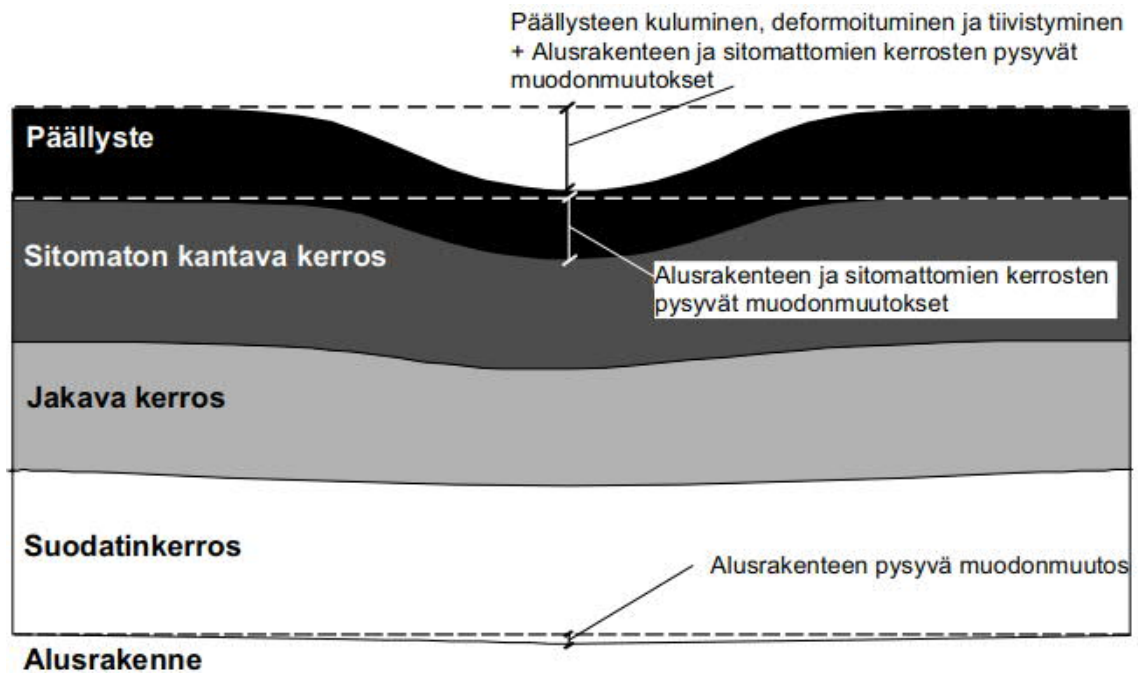
Päätyyppi	Alatyypit
Halkeama	Poikkihalkeama
	Pituushalkeama
	Vinohalkeama
	Saumahalkeama
	Verkkohalkeama
Epätasaisuus	Pituussuuntainen epätasaisuus
	Poikkisuuntainen epätasaisuus
Hajoamisvaurio	Purkauma
	Reikä

Halkeamat tiessä voidaan jakaa poikki-, pituus-, vino-, sauma- ja verkkohalkeamiin. Halkeama tiessä voi johtua routimisesta, painumisesta, lämpötilamuutoksista sekä raskaan liikenteen aiheuttamasta rasituksesta. (Belt et al. 2002) Kuvassa 14 on esitetty esimerkki routimisen aiheuttamasta halkeamasta tiessä.



Kuva 14 Routimisen aiheuttama halkeama asfalttipäällysteisessä tiessä. (Ehrola 1996)

Tien pituussuuntainen epätasaisuus johtuu liikennekuormituksesta ja epätasaisista roudanousuista. Tien poikittaissuuntainen epätasaisuus tarkoittaa yleensä urautumista, joka johtuu pääasiallisesti päällysteen kulumisesta sekä tierakenteen tiivistymisestä ja pysyvistä muodonmuutoksista. (Belt et al. 2002) Kuvassa 15 on havainnollistettu tien pitkitäissuuntaisen urautumisen syytä.



Kuva 15 Urautumisen eli poikittaissuuntaisen epätasaisuuden syyt. (Belt 2002)

Yksi tapa luokitella tierakenteen pinnalla ilmenevä urautuminen on urautumistyytit 0-3. Urautumistyyppi 0 tarkoittaa urautumista tierakenteen tiivistymisen seurauksena. Urautumistyyppi 1 tarkoittaa urautumista kantavan kerroksen muodonmuutoksesta johtuen. Urautumistyyppi 2 tarkoittaa urautumista pohjamaassa tapahtuvan muodonmuutoksen seurauksena. Urautumistyyppi 3 tarkoittaa nastarengaskulutuksesta tai muusta tien pinnan kulumisesta johtuvaa urautumista. (Roadex E-Learning, 2014)

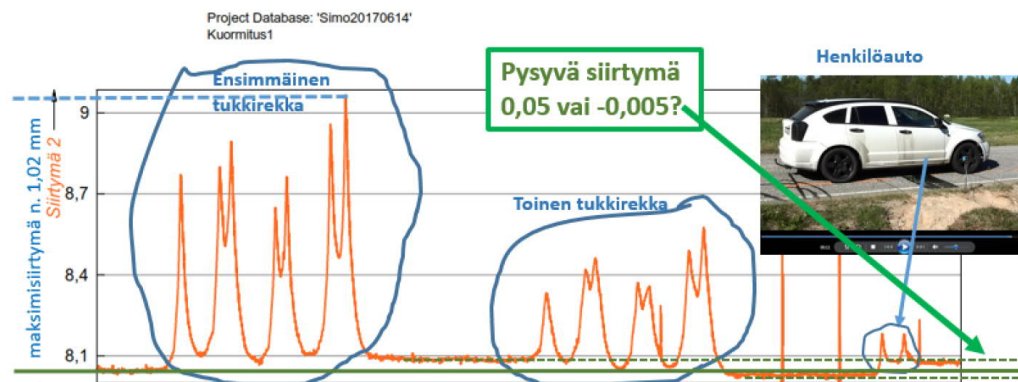
Hajoamisvauriot tarkoittavat purkautumia ja reikiä päällysteessä. Näiden pääasiallinen syy on päällystemassan ominaisuudet. (Belt 2002)

2.5 Kuormitushistorian vaikutus

Tierakenteen kuormitushistoria vaikuttaa tierakenteen ominaisuuksiin ja olosuhteisiin (Ehrola 1996) (Belt 2002). Pitkän aikavälin kuormitushistoria määritellään tässä pitkällä aikavälillä tapahtuneeksi tierakenteen vaurioitumiseksi, joka muuttaa tierakenteen käyttäytymistä. Lyhyen aikavälin liikennekuormituksen kuormitushistoria määritellään tässä opinnäytetyössä suhteellisen lyhyen ajan sisällä tapahtuneen liikennekuormituksen vaikutukseksi tierakenteeseen. Käytännössä lyhyen aikavälin kuormitushistoria tarkoittaa esimerkiksi sitä, miten raskas ajoneuvo tai yksi rekan akseli vaikuttaa tierakenteen käyttäytymiseen enintään 10 minuutin kuluttua valitun tarkastelukohdan ohittamisen jälkeen.

2.5.1 Lyhyen aikavälin liikennekuormitushistoria

Tampereen teknillisen yliopisto tutkijaryhmä on koekuormittanut erilaisia tierakenteita raskailla rekoilla useissa eri tiekohteissa vuosina 2015-2017 (Vuorimies et al. 2018). Näistä koekuormituksista havaittiin mm. lyhyen aikavälin kuormitushistorian ja ajolinjojen vaikutus tierakenteesta mitattaville pysyville ja palautuville taipumille. Kuvassa 16 on esitetty lyhyen aikavälin kuormitushistorian vaikutus tien pinnan pystysiirtymään eli urautumiseen. Tien pinnan pystysiirtymä mitattiin luvussa 3.4.2 esitetyn kaltaisilla antureilla. Kuvassa on esitetty kahden kuormatun 7-akselisen tukkirekan ja henkilöauton ohituksen vaikutus pystysiirtymään urassa sijainneen anturin kohdalla. Ajoneuvojen nopeus oli noin 50 km/h. Ensimmäisen tukkirekan ajolinja kulki anturin päältä ja se aiheutti anturilla mitaten noin 0,05 mm uran kasvun. Toinen tukkirekka ajoi heti ensimmäisen rekan perässä ja sen ajolinja kulki anturin vierestä. Toinen tukkirekka aiheutti noin 0,055 mm kohouman anturin kohdalla, eli se pienensi uraa. Heti tukkirekkojen jälkeen kulkeneen henkilöauton ajolinja kulki anturin päältä. Henkilöauto aiheutti anturilla mitaten noin 0,05 mm uran kasvun. Kokonaisuutena ura kasvoi näiden kolmen ajoneuvon vaikutuksesta noin 0,05 mm. ”Merkittävää pysyvän siirtymän muodostumisessa lienee se, että henkilöauto seuraa lähellä edellä ajavia ajoneuvoja, jotka ovat saaneet tierakenteen rakeet edestakaiseen liikkeeseen ja sitomattoman kerroksen rakeet ovat toistensa suhteen vielä herkästi liikkuvassa tilassa.” (Liikennevirasto, 2018b)



Kuva 16 Lyhyen aikavälin kuormitushistorian vaikutus tien pinnan pystysiirtymään eli urautumiseen. Ensimmäisen tukkirekan ajolinja kulki anturin päältä, toisen tukkirekan ajolinja anturin vierestä ja henkilöauton ajolinja anturin päältä. (Liikennevirasto, 2018b)

Toistuva akselikuormitus raskailla ajoneuvoilla voi liikuttaa vettä tierakenteessa ja nostaa sitä ylempiin rakennekerrokseen (Liikennevirasto, 2018b). Tämä ilmiö voi heikentää tierakenteen kantavuutta. (Dawson et al. 2009) Tällöin tierakenteen kuormituskestävyys seuraaville ajoneuvoille on heikompi.

Arvioidaan, että lyhyen aikavälin liikennekuormitushistoria voi:

- tiivistää ja löyhdyttää rakenteen sitomattomia kerroksia aiheuttaen pysyviä, nopeasti palautuvia ja hitaasti palautuvia muodonmuutoksia. Tämä voi vaikuttaa seuraavien ajoneuvokuormitusten yhteydessä mitattaviin rakenteen pysyviin ja palautuviin muodonmuutoksiin.
- aiheuttaa veden pumppautumista ylemmäksi tierakenteessa ja heikentää tierakenteen kuormituskestävyyttä seuraavien akseleiden ja ajoneuvojen ylitysten aikana.

3. KENTTÄMITTAUSTEN TOTEUTUS

Mittauskohteet sijaitsevat Muoniosta noin 5 km etelään vt21:llä. Mittauslaitteet mittaavat raskasta liikennettä. Mittauskohteiden ylitykset tallennetaan jatkuvasti vuoden ympäri. Tampereen yliopiston mittausdata ja suuri osa muiden tahojen mittaustuloksista julkaistaan avoimena datana liikenneviraston palvelimella. Tampereen yliopisto, Roadscanners Oy ja Cestel Company asensivat tässä opinnäytetyössä hyödynnettävät mittauslaitteistot mittauskohteille. Tampereen yliopiston asentamat mittalaitteet mahdollistavat tierakenteen käyttäytymisen mittaamisen ajoneuvo- ja akselikohtaisesti.

3.1 Mittausten aikataulu

Tampereen yliopiston osalta mittausten aikataulu on esitetty taulukossa 2. Tampereen yliopiston mittaukset kaikilla kohteilla olivat käynnissä 19.12.2017. Tästä eteenpäin mittauslaitteistot ovat mitanneet liikennettä. Tampereen yliopiston mittauslaitteistojen ja mittausten tallentamisen ylläpitosopimus päättyy 30.6.2020.

Taulukko 2 Tampereen yliopiston mittausten toteuttamisen ja koekuormitusten aikataulu.

Tampereen yliopiston anturit asennettu	22.9.2017
Tampereen yliopiston mittausten tallennus käynnistyy kohteella PL4900	25.10.2017
Tampereen yliopiston mittausten tallennus käynnistyy kohteella PL5700	19.12.2017
1. mittausviikko liikennevirrasta, roudan sulamisen alkuvaihe	19-25.4.2018
2. mittausviikko liikennevirrasta, roudan sulamisen loppuvaihe	8-14.6.2018
Koekuormitus 9-akselisella rekalla	24.7.2018
3. mittausviikko liikennevirrasta	20-26.8.2018
Koekuormitus 9-akselisella rekalla	10.10.2018
4. mittausviikko liikennevirrasta, rakenteen jäätymisen alkuvaihe	22-25.10.2018
5. mittausviikko liikennevirrasta, jäänyt rakenne	12-18.12.2018
Tampereen yliopiston mittausten ylläpitosopimus päättyy	30.6.2020

Jatkuvien mittauksien tuottamien mittaustulosten määrä on suuri. Tämän vuoksi mittauksien tarkempi käsittely rajattiin tämän tutkimuksen puitteissa viidelle mittausviikolle ja

kahdelle koekuormituspäivälle vuoden 2018 aikana. Mittausviikkojen ja koekuormituspäivien aikataulut on esitetty taulukossa 2.

3.2 Mittausten tavoitteet

Tampereen yliopiston ja Roadscanners Oy:n toteuttamien mittausjärjestelmien tavoitteena oli luoda raskaiden ajoneuvojen ylitykset jatkuvasti ja itsenäisesti mittaava, tulokset avoimena datana pilveen tallentava ja kattavasti liikennekuormitusten sekä olosuhteiden vaikutuksia rekisteröivä tierakenneinstrumentointi monipuoliseen tutkimuskäyttöön pohjosiin olosuhteisiin (Roadscanners, 2017).

Tutkimuspalvelusuunnitelman perusideana oli valita viisi tarkasteltavaa viikkoa vuodenvierrosta. Näitä kutsutaan mittausviikoiksi. Mittausviikkojen tuloksia vertailemalla on mahdollista tehdä päätelmiä tierakenteen käyttäytymisen muutoksista eri vuodenaikoina raskaitten rekkojen kuormittaessa tierakennettä. Mittausviikkojen aikana mittauskohteiden läpi kulki alueen normaali liikenne. (Roadscanners, 2017)

Mittauskohteilla tehtiin kahtena päivänä koekuormitusajoja 9-akselisella koekuormitusrekalla. Näiden koekuormituspäivien ajojen pääasiallinen tarkoitus liittyi kuormituskestävyysmitoitusmenetelmien kehittämiseen, mutta näitä koekuormituksia käytettiin myös mittausviikkojen tuloksien täydentämiseen ja analysointiin.

Viiden mittausviikon ajallinen sijoittaminen vuodenvierroon tehtiin sen mukaan, mitä asiaa haluttiin tutkia tai mistä asiasta haluttiin tietoa mittausviikkojen vertailun mahdollistamiseksi. Koekuormituspäivien sijoittaminen tehtiin kuormituskestävyysmitoituksen tarpeisiin perustuen. Mittausviikkojen ja koekuormituspäivien ajankohdat on esitetty taulukossa 2. Suunnitellut ja toteutuneet olosuhteet sekä ajankohdat eroavat toisistaan osassa mittausviikkoja.

Ensimmäisen mittausviikon tavoitteena oli tutkia tyypin 1 urautumisriskiä eli kantavan kerroksen vaurioitumista, kun routaraja on 0,25-0,5 m syvyydellä. Tällöin tierakenteen ennakoitiin olevan kantavaa kerrosta ja päällystettä lukuun ottamatta syvässä jäässä ja kaiken muodonmuutoksen tyypin 1 urautumista. Kantava kerros routarajan yläpuolella olisi mahdollisesti kyllästynyt vedellä. Vedellä kyllästyminen suurentaa muodonmuutoksia ja venymiä huomattavasti. Mittausviikon ennakoitiin tutkimusten suunnitteluvaiheessa sijoittuvan roudan sulamisen alkuvaiheeseen huhtikuulle. (Roadscanners, 2017)

Toisen mittausviikon tavoitteena oli tutkia tyypin 2 urautumisriskiä pohjamaan rajapinnassa, kun routa sulaa tai on juuri sulanut pohjamaassa. Samalla haluttiin tutkia akselien määrän vaikutusta tierakenteen ja pohjamaan käyttäytymiseen. Mittausviikon ennakoitiin

tutkimusten suunnitteluvaiheessa sijoittuvan toukokuun loppuun tai kesäkuulle. (Roadscanners, 2017) Tyypin 2 urautumisriskin tutkiminen arvioitiin etukäteen haasteelliseksi, koska penkereen käyttäytymistä mittaavia laitteita ei rakenteisiin oltu asennettu.

Kolmannen mittausviikon tavoitteena oli edustaa rakenteen parasta sulan ajan kantavuutta ja kuormituskestävyyttä. Mittausviikon mittauksien tulokset suunniteltiin referenssituloksiksi muille viikoille. Tällöin rakenteen ennakoitiin olevan sulanut, kuivumassa ja sitomattomissa kerroksissa imupaineen olevan suurimmillaan. Mittausviikon ennakoitiin tutkimusten suunnitteluvaiheessa sijoittuvan elokuulle. (Roadscanners, 2017)

Neljännän mittausviikon tavoitteena oli tutkia rakenteen käyttäytymistä jäätymis-sulamis-syklien eri vaiheissa. Tällöin syksyn sateet olisivat voineet kastella rakennetta kolmannen mittausviikon tilannetta kosteammaksi. Mittausviikon ennakoitiin tutkimusten suunnitteluvaiheessa sijoittuvan lokakuun alkupuolelle. (Roadscanners, 2017)

Viidennen mittausviikon tavoitteena oli tutkia rakenteen käyttäytymistä, kun rakenne on jäänyt 25-50 cm syvyydelle. Haluttiin selvittää, paljonko jäätyminen pienentää siirtymiä, venymiä ja jännitystiloja tierakenteessa. Tämän perusteella haluttiin arvio, voidaanko jäätyneelle tierakenteelle sallia tavallista suurempia akselipainoja. (Roadscanners, 2017)

Mittausviikkoja tarkastelemalla haluttiin tietoa tierakenteen ominaisuuksien vuodenaikavaihtelun vaikutuksesta tierakenteen kokonaistoimintaan ja tierakenteen kriittisiin rasituksiin. Tietoa haluttiin myös akselipainon ja rengastuksen vaikutuksesta tierakenteen kriittisiin rasituksiin ja käyttöikänsä. Tavoitteena oli myös saada tietoa pohjamaan jäykkyyden vaikutuksesta tierakenteen toimintaan. Lisäksi haluttiin tietoa peräkkäisten akselien vaikutuksesta tierakenteeseen raskailla rekoilla, sillä perinteinen kuormituskestävyysmitoitus olettaa peräkkäisten akselien kuormittavan rakennetta yksi kerrallaan. (Roadscanners, 2017)

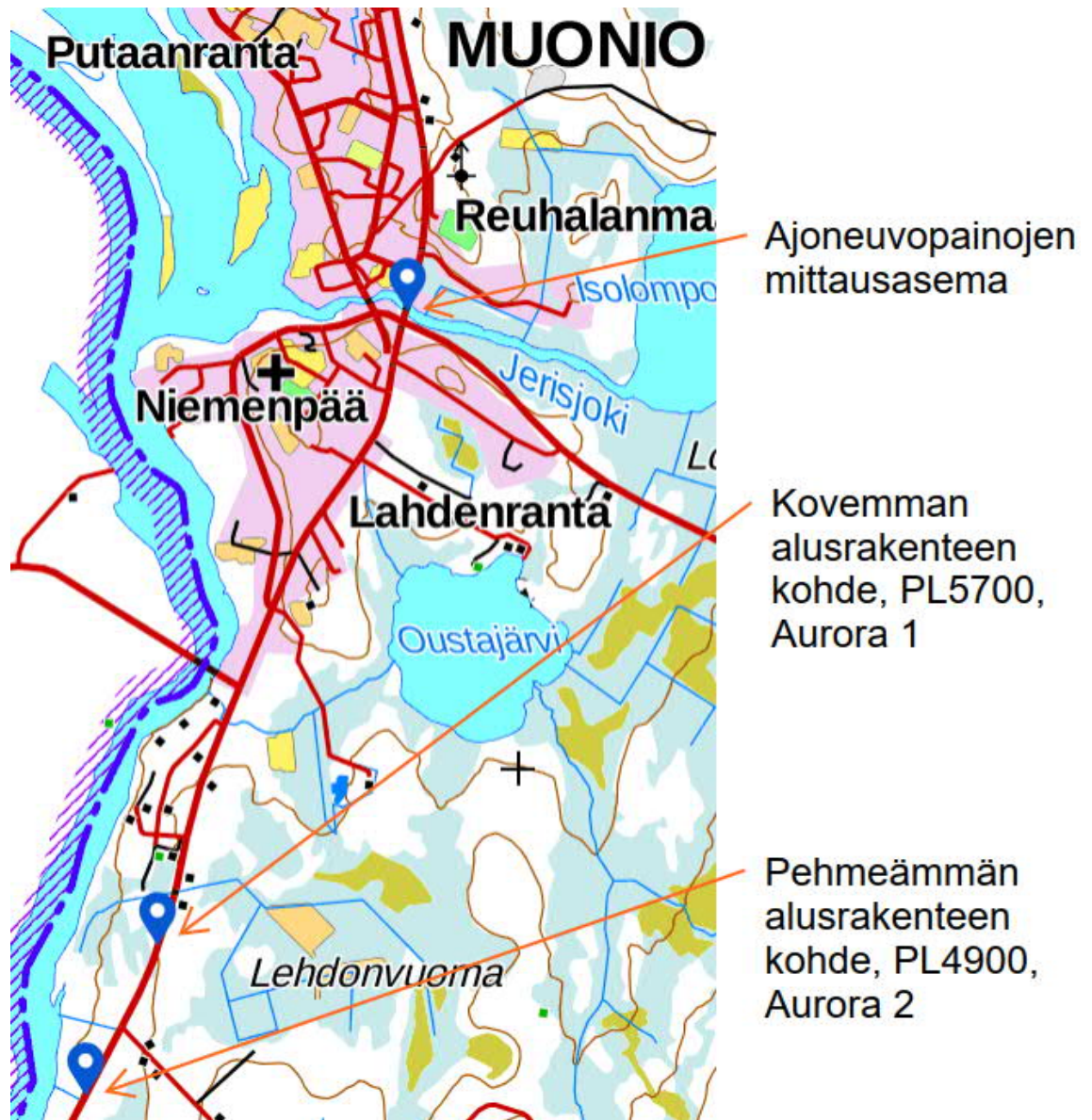
3.3 Mittauskohteet

Valtatietä 21 välillä Kolari-Kilpisjärvi parannettiin vuosina 2017-2018. Tielle rakennettiin älyliikenteen testialue Kolari-Muonio-välille. Tierakenne on mittauskohteilla jyrävä ja hyväkuntoinen. Alueelle on asennettu tutkimuskäyttöön paljon mittauslaitteistoja ja infrastruktuuria, joista osaa on voitu hyödyntää tässä tutkimuksessa.

3.3.1 Mittauskohteiden sijainti

Mittauskohteet sijaitsevat Aurora- älyliikennetien testialueella. Sijainti on napapiirin pohjoispuolella ja kohteilla esiintyvät selkeästi kaikki neljä vuodenaikaa. Tämä helpotti mittausten tavoitteiden saavuttamista. Tutkimuksen oleellisten mittauskohteiden sijainnit esitetään kuvassa 17. Jäykän ja joustavan pohjamaan mittauskohteet sijaitsevat noin 5 kilometriä Muonion keskustasta etelään. Jäykän alusrakenteen kohteesta käytetään myös nimitystä PL5700 tai Aurora 1. Pehmeämmän alusrakenteen kohteesta käytetään nimitystä PL4900 tai Aurora 2.

Mittauskohteiden sijoittuminen määrittyi ainakin infrastruktuurin, ilmasto-olosuhteiden, pohjamaan ja liikenteen ajokäyttäytymisen mukaan. Perustavanlaatuisena ideana oli, että samat ajoneuvot kulkevat kaikkien kolmen mittauskohteen läpi. Tällöin yksittäisestä ajoneuvosta saadaan mittausdataa jokaiselta mittauskohteelta (Roadscanners, 2017). Ajoneuvopainojen mittausasema on sijoitettu Jerisjoen ylittävälle sillalle, sillä mittaus vaati sillan toimiakseen (Kulauzovic 2018).



Kuva 17 Mittauskohteiden sijainti kartalla (karttakuva ladattu Maanmittauslaitoksen tietokannasta 27.5.2019).

3.3.2 Joustavan alusrakenteen mittauskohde

Joustavan alusrakenteen mittauskohteesta käytetään nimitystä PL4900 tai Aurora 2. Kuvassa 18 on esitetty kohde perusparannuksen aikana ennen päällystämistä. Kohteen rakennekerrokset on esitetty taulukossa 3. Kohteen sekoitusjyrsitylle kantavalle kerrokselle tehdyt laboratoriokokeet on esitetty liitteessä C. Kohteella mitataan Tampereen yliopiston antureilla tien pinnan pystysiirtymää siirtymäantureilla, kantavan kerroksen kokoonpuristumaa, maanpaineita kahdella eri syvyydellä kantavassa kerroksessa, asfaltin alapinnan poikittaista ja pitkästä venymää sekä pystysuuntaista kiihtyvyyttä lähellä asfaltin pintaa. Nämä anturit sijaitsevat tien lännenpuoleisella kaistalla, eli ne mittaavat tiellä etelään päin kulkevaa liikennettä. Liitteessä B on esitetty kohteella olevien Tampereen yliopiston asentamien anturien tiedot. Muilla kuin Tampereen yliopiston antureilla

mitataan mm. ajoneuvojen tyyppiä, nopeutta ja ajolinjaa sekä rakenteen kosteutta, sähkönjohtavuutta ja lämpötilaa eri syvyyksillä.



Kuva 18 Mittauskohde PL4900 ennen asfaltin asentamista. (Varin 2017)

Taulukko 3 Joustavan alusrakenteen kohteen PL4900 rakennekerrokset (Kalliainen 2019).

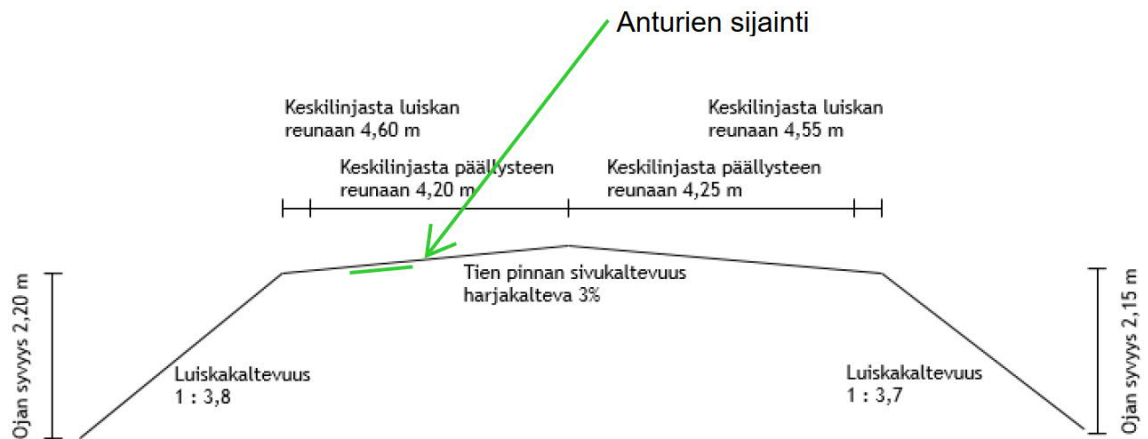
	Kerroksen paksuus (mm)
Päällystekerros	50 mm ABK + 40 mm AB
Kantavaan kerrokseen sekoitusjyrsitty vanha asfaltti	250
Jakava kerros	300
Muu tierakenne	900

Mittauskohde sijaitsee pitkällä suoralla. Tämä vaikuttaa ajokäyttäytymiseen. Kuljettajat näkevät pitkälle vastaantulevien kaistalle ja tämä saattaa rohkaista kuljettajia ajamaan keskemällä tietä.

Osa kohteen antureista on asennettu tarpeettoman lähelle reunaviivaa. Anturien sijainnin, leveän kaistan ja pitkän suoran yhteisvaikutus saa aikaan, että kaikkia raskaita ajoneuvoja ei saada mitattua Tampereen yliopiston antureilla. Tämä ei kuitenkaan haittaa, sillä suuri osa ajoneuvoista kulkee tarpeeksi lähellä antureita. Talvella tilanne on huonompi, sillä lumivallit ohjaavat autot ajamaan keskemällä tietä. Talvikausi ei kuitenkaan

muodostu ongelmaksi, sillä talvella rakenne on jäykempi ja mittausvasteet pienempiä, joten rakenneinstrumentointien mittau tulokset eivät ole merkittäviä.

Kohteelle kesällä 2017 tehdyn perusparannuksen yhteydessä vanha päällyste sekoitusjyrsittiin kantavaan kerrokseen. Tämän päälle asennettiin 90 mm paksuinen asfaltti kahdena kerroksena. Asfalttikerroksen paksuus varmistettiin anturien asennuksen yhteydessä irrotetuista kolmesta päällysteen palasta. Sekoitusjyrsityn kantavan kerroksen paksuus on 250 mm. Jakavan kerroksen paksuus on 300 mm ja muun tierakenteen paksuus on 900 mm. Tämä kohde on kappaleessa 4.2 esitettyjen havaintojen perusteella kohdetta PL5700 hieman kuivempi. Kohteella tiepenger on niin korkea, että sieltä ei nouse vettä tierakenteeseen. Pystysiirtymäanturien asennuksen yhteydessä havaittiin, että kova pohja on 3,5 m syvyydellä. Kokonaisuutena ajatellen rakenne on jyrävä ja hyvässä kunnossa perusparannuksen jälkeen. Tien poikkileikkausprofiili kohteella on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19 Tien poikkileikkausprofiili koekohteessa PL4900 (Kalliainen 2019).

3.3.3 Jäykän alusrakenteen mittauskohde

Jäykän alusrakenteen mittauskohteesta käytetään nimitystä PL5700 tai Aurora 1. Kohteelta poistettiin pieni alue päällystettyä ennen Tampereen yliopiston maanpaine-, asfaltin alapinnan venymä- ja kantavan kerroksen kokoonpuristuma-antureiden asennusta. Päällyste poistettiin noin 10 m matkalta, antureiden puoleiselta kaistalta. Asennuksen jälkeen alue päällystettiin uudelleen samalla massalla kuin kohde PL4900. Tämän jälkeen tielle asennettiin uusi päällystekerros vanhan päällysteen päälle. Kuvassa 20 on esitetty kohde ennen antureiden asennusta. Kohteen rakennekerrokset on esitetty taulukossa 4. Kohteella mitataan Tampereen yliopiston antureilla kantavan kerroksen kokoonpuristumaa, maanpaineita kahdella eri syvyydellä kantavassa kerroksessa, asfaltin alapinnan poikittaista ja pitkittäistä venymää sekä pystysuuntaista kiihtyvyyttä lähellä asfaltin pintaa. Nämä anturit sijaitsevat tien lännenpuoleisella kaistalla, eli ne mittaavat

tiellä etelään päin kulkevaa liikennettä. Liitteessä B on esitetty kohteella olevien Tampereen yliopiston anturien tiedot. Muilla kuin Tampereen yliopiston antureilla mitataan mm. autojen tyyppiä, nopeutta ja ajolinjaa sekä rakenteen kosteutta, sähkönjohtavuutta ja lämpötilaa eri syvyyksillä. Tällä kohteella ei mitata tien pinnan pystysuuntaista siirtymää tien alusrakenteen kivisyydestä johtuvien asennusongelmien vuoksi.



Kuva 20 Mittauskohde PL5700 vanhalla päällysteellä ennen anturien ja uuden päällystekerroksen asennusta. (Varin 2017)

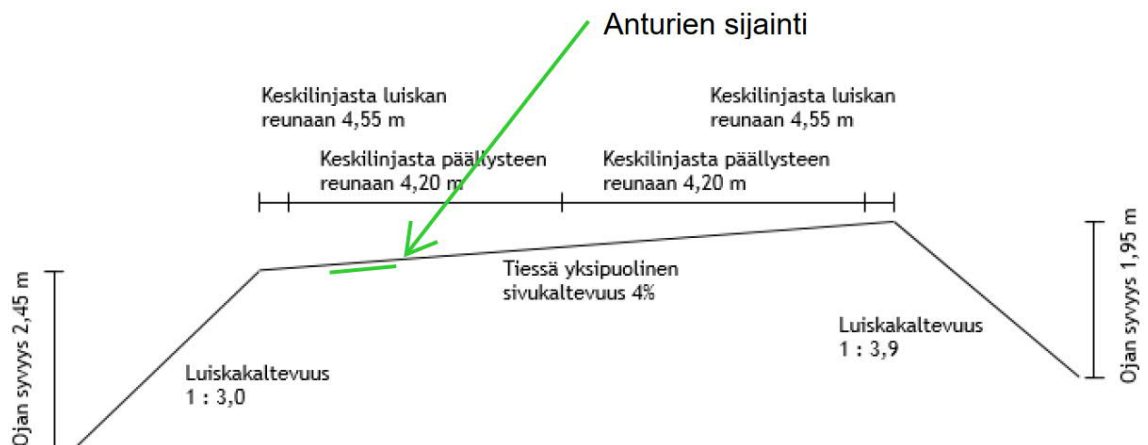
Taulukko 4 Jäykän alusrakenteen kohteen PL5700 rakennekerrokset Tampereen yliopiston anturien kohdalla (Kalliainen 2019).

	Kerroksen paksuus (mm)
Päällystekerros	120
Kantava kerros	200
Jakava kerros	300
Muu tierakenne	500

Mittauskohde sijaitsee loivassa kaarteessa. Tämä vaikuttaa ajokäyttäytymiseen. Kuljettajat eivät näe kovin pitkälle vastaantulevien kaistalle ja tämä ohjaa varsinkin raskaiden ajoneuvojen kuljettajia pysymään tarkasti kaistalla. Tietä ei myöskään levennetty parannuksen yhteydessä.

Kohteen anturit on asennettu ajoneuvojen ajolinjalle. Anturien sijoittelun ja ajokäyttäytymisen johdosta mittauskohde tallentaa enemmän mittaustuloksia kuin joustavan alusrakenteen kohde PL4900.

Kohteelle asennettiin Tampereen yliopiston anturit ennen kesän 2017 päällystystyötä. Asennuksen yhteydessä poistettiin päällystettä asennusalueelta, joka paikattiin heti anturien asennuksen jälkeen. Perusparannuksen yhteydessä kohteelle asennettiin uusi kerros päällystettä. Päällystekerrosten kokonaispaksuus on 120 mm paikatulla alueella. Paikatun alueen päällystepaksuus mitattiin kolmen porapalan keskiarvona. Muualla päällystepaksuus on 90 mm (Kalliainen 2019). Paikatun ja muun alueen päällystepaksuuksien ero johtuu todennäköisesti päällystepaikkaa irrotettaessa syntyneestä yli-kaivuusta. Kantavan kerroksen paksuus on 200 mm, jakavan kerroksen paksuus 300 mm ja muun tierakenteen paksuus 500 mm. Tierakenteessa on isoja kiviä 1,0 m syvyydeltä alkaen. Alusrakenne on jäykempi kuin kohteella PL4900. Tämä kohde on kappaleen 4.2 havaintojen perusteella kohdetta PL4900 kosteampi. Kohteella pohjavedenpinnan sijaintia ei tunneta, mutta tien penkereet ovat korkeat. Kovan pohjamaan syvyyttä ei mitattu, sillä kairatankoa ei saatu tunkeutumaan tien kivisen alusrakenteen läpi. Kokonaisuutena ajatellen rakenne on jyrävä ja hyvässä kunnossa perusparannuksen jälkeen. Tien poikkileikkausprofiili kohteella on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21 Tien poikkileikkausprofiili koekohteessa PL5700. (Kalliainen 2019)

3.3.4 Ajoneuvopainojen mittausasema

Ajoneuvopainojen mittausasemasta käytetään nimitystä WIM tai silta-asema. Ajoneuvopainojen mittausasema mittaa jokaisen sillan yli ajavan auton yksittäisten akselien akselipainot ja telien telipainot sekä akselien etäisyydet toisistaan. Mittaukset tehdään kumpaankin suuntaan ajaville autoille. Mittausaseman toiminnasta vastaa Cestel Company. (Kulauzovic 2018)

3.4 Mitattavat suureet

Mittauskohteilla mitattavat suureet eroavat toisistaan mittaustyypeiltään. Tampereen yliopiston asentamat anturit tallentavat kuuden sekunnin pätkiä mittausdataa 1000 Hz taajuudella, jolloin on mahdollista tarkastella yhden ajoneuvon jokaisen akselin vaikutusta tierakenteeseen. Tampereen yliopiston mittalaitteet on viritetty tallentamaan raskaiden ajoneuvojen ylitykset. Ajoneuvopainojen mittausasema tallentaa tiedot ajoneuvo kohtaisesti. Mittauskohteilla sijaitsevista muista mittauksista osa tallentaa tietonsa ajoneuvo kohtaisesti ja osa suorittaa mittauksen määräjain. Liitteessä B on esitetty Tampereen yliopiston asentamien anturien tiedot.

Tässä työssä huomio keskitetään antureihin, jotka ovat hyödyllisiä tämän tutkimuksen kannalta. Aurora- älyliikennetiellä on myös useiden muidenkin tahojen asentamia mittalaitteistoja.

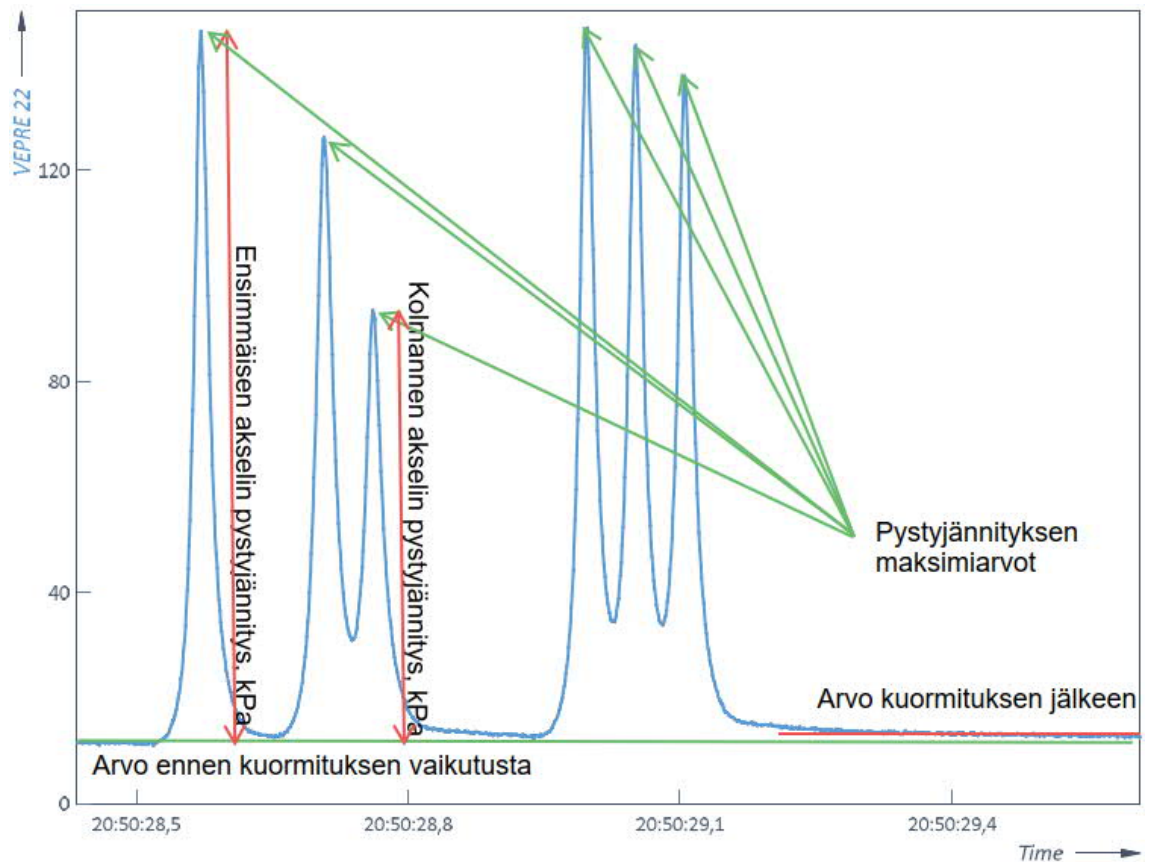
3.4.1 Pystyjännitys

Pystyjännitystä eli pystysuuntaista maanpainetta mitataan maanpaineanturilla. Pystyjännityksen yksikkö mittausdatassa on kiloPascal eli kPa. Pystyjännitystä mitataan kohteilla PL4900 ja PL5700 venymäliuskatekniikkaan perustuvilla maanpaineantureilla. Anturit on asennettu kantavaan kerrokseen noin 0,2 m ja 0,3 m syvyyksille. Tiedot anturien malleista ja sijainneista mittauskohteilla on esitetty liitteessä B. Kuvassa 22 on esitetty maanpaineanturien asennusta kohteella PL4900.



Kuva 22 Pystyjännitysanturien asennusta kohteella PL4900.

Kuvassa 23 on esitetty maanpaineanturin mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL5700 0,22 m syvyydellä tien pinnasta. Tällä periaatteella on tulkittu kaikkien maanpaineanturien mittausdatat.



Kuva 23 Pystyjännitysanturin mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL5700 20.8.2018 klo 20:50:27.

Maanpaineanturi soveltuu liikennekuormituksen tierakenteeseen aiheuttaman jännitysliikkeen mittaamiseen sulassa rakenteessa. Maanpaineanturien tulokset ovat yksiselitteisiä, kun rakenteessa ei ole jäätä. Jäätäneessä rakenteessa tulokset ovat usein epäselviä sekä vaikeatulkintaisia ja suuruusluokat voivat heitellä. Sulassa rakenteessa maanpaineanturit kertovat luotettavasti kuvassa 23 punaisella nuolella esitetyt akselien aiheuttamat pystyjännitykset eli pystyjännityksen muutoksen kuormituksen alla, vaikka anturien nollakohtat vaihtelevat. Nollakohtien vaihtelevuus tarkoittaa sitä, että anturien absoluuttinen arvo voi olla väärä, mutta punaisella nuolella merkitty jännitysmuutos on luotettava. Nollakohtien pieni vaihtelu on normaalia tämän tyyppisten maanpaineanturien toimintaa.

Huomionarvoista on, että kuvassa 23 esitetty arvo ennen kuormituksen vaikutusta voi olla muutaman kilopascalin isompi tai pienempi kuin arvo kuormituksen jälkeen. Tämä muutos on riippuvainen ajolinjasta ja kertoo rakenteen tiivistymisestä tai löyhtymisestä liikennekuormituksen vaikutuksesta. Pyöräkuormituksen ajolinjan alla maanpaine jää

kuormituksen jälkeen suuremmaksi ja ajolinjan vierellä pienemmäksi. Tämä kantava kerroksen löyhtyminen havaittiin myös aikaisemmassa tutkimuksessa kantavan kerroksen kokoonpuristuma-antureilla Vesilahden koekohteella (Luomala 2019).

Pystyjännitysanturi Vepre20 tuotti väärän suuruusluokan tuloksia. Syytä tähän ei tiedetä. Anturin tuloksia ei ole käytetty mittausdatan tulkinnessa ensimmäisen mittausviikon jälkeen.

3.4.2 Tien pinnan pystysiirtymä siirtymäantureilla

Tien pinnan pystysiirtymiä mitataan päällysteen alapinnasta siirtymäanturilla. Siirtymäanturi on kiinnitetty kairatankoon, joka on ankkuroitu kovaan pohjamaahan. Näin saadaan mitattua tien pinnan siirtymä suhteessa kovaan pohjamaahan. Käytännössä tämä tarkoittaa tierakenteen painuman tai kohouman mittaamista. Tässä oletetaan, että sidotun päällysteen deformaatio on pientä. Siirtymäanturi mittaa ainoastaan sitomattomien, päällysteen alapuolisten kerrosten aiheuttaman painuman eikä huomioi sidotun päällysteen deformaatiota.

Siirtymän yksikkö mittausdatassa on millimetri. Tien pinnan pystysiirtymää mitataan kohteella PL4900. Kohteella PL5700 anturien asennus ei onnistunut tierakenteen kivisen penkereen takia. Tiedot anturien malleista ja sijainneista mittauskohteella on esitetty liitteessä B.

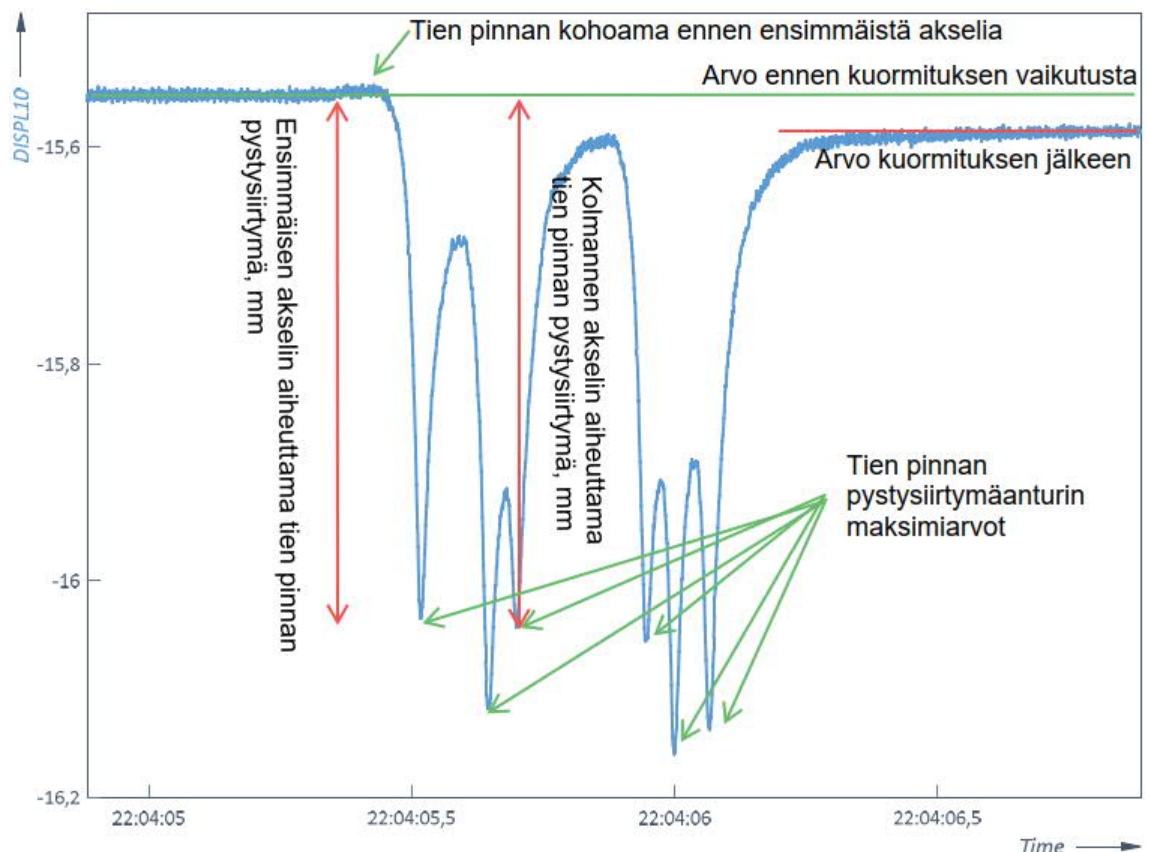
Kuvassa 24 on esitetty Tampereen yliopiston rakentaman pystysiirtymäanturin asennusta toisessa tutkimuskohteessa. Vasemmanpuoleisessa kuvassa näkyy kairatangon pää ja siirtymäanturin sydänosa. Oikeanpuoleisessa kuvassa näkyy siirtymäanturin toinen puoli, joka ankkuroi siirtymäanturin yläpäähän päällysteen alapintaan metallilevyllä. Anturi mittaa metallilevyn ja kairatangon välistä etäisyyttä Solartron metrologyn LVDT AS/25 anturilla.



Kuva 24 Tien pinnan pystysiirtymäanturin asennusta. (Vuorimies et al. 2018)

Tien pinnan pystysiirtymäanturien ankkurointitangot kairattiin 3,3-3,5 m syvyyteen. Tämä tarkoittaa käytännössä kovan pohjamaan yläosaa. Anturin DISPL10 kairatanko saatiin asennettua erittäin kovaan ja tiukkaan kerrokseen. Anturien DISPL9 ja DISPL11 kairatankojen ankkurointi ei onnistunut yhtä tiukasti. Tämä voi aiheuttaa mittausten alkuvaiheessa lievästi vääristyneitä tuloksia, mutta tämä on epätodennäköistä. Anturien tunnukset on esitetty liitteessä B. Epävarmuutta tuloksiin voi aiheuttaa myös se, jos pystysiirtymän arvo kulkee pois anturin lineaariselta mitta-alueelta, joka on ± 25 mm.

Kuvassa 25 on esitetty tien pinnan pystysiirtymän mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL4900. Siirtymäanturilla mitatun tien pinnan pystysiirtymän tulkinta on pääosin yksiselitteistä. Ongelmia voi ilmetä, jos siirtymä on niin pieni, että sitä ei erota signaalin kohinasta. Tällainen tilanne voi syntyä, jos rakenteessa on jäätä. Tulkinta tehdään Peak- menetelmä (Ehrola 1996).



Kuva 25 Tien pinnan pystysiirtymäanturin mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL4900 20.8.2018 klo 22:04:08.

Kuvassa 25 esitetty arvo kuormituksen jälkeen voi olla suurempi tai pienempi kuin arvo ennen kuormitusta. Näitä tilanteita kutsutaan painumaksi ja kohoumaksi.

3.4.3 Tien pinnan pystysuuntainen siirtymä, ajolinja ja rengastus kiihtyvyyssantureilla

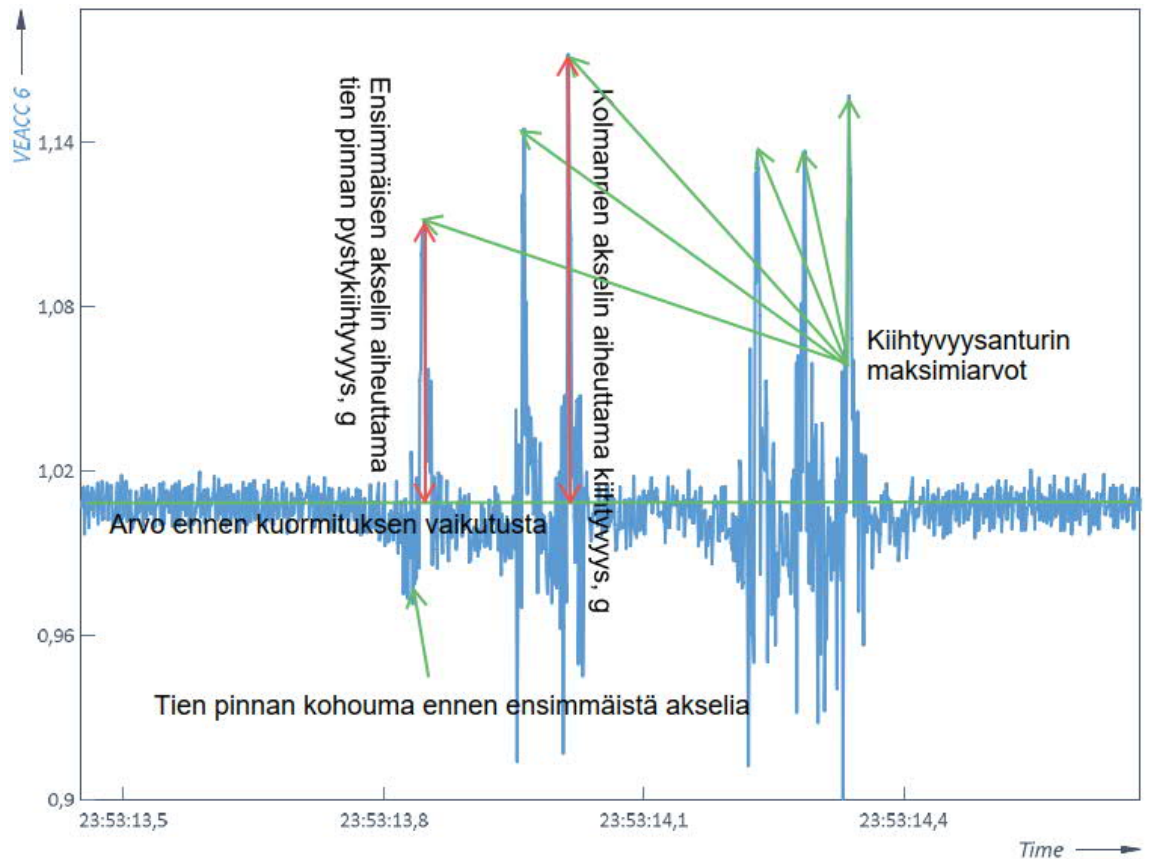
Tien pinnan pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä mitataan päällysteen yläosaan asennetuilla kiihtyvyyssantureilla. Kiihtyvyyttä mitataan kohteilla PL4900 ja PL5700. Kiihtyvyyden yksikkö mittausdatassa on g. Kiihtyvyyssanturien tuloksista voidaan integroimalla selvittää tien pinnan pystysuuntainen siirtymä (Luomala 2019). Kiihtyvyyssanturien suuren määrän ja sijoittelun ansiosta kiihtyvyyssantureista on myös selvitettävissä ajoneuvon ajolinja ja rengastus akselikohtaisesti. Ajolinjan ja rengastuksen selvittämistä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.1.3. Tiedot anturien malleista ja sijainneista mittauskohteilla on esitetty liitteessä B. Kiihtyvyyssantureista integroituja siirtymiä ei ole tässä yhteydessä käytetty, sillä sama tieto on helpommin ja luotettavammin saatavissa siirtymäantureista. Siirtymä- ja kiihtyvyyssanturien tuloksia on verrattu keskenään ja tulokset olivat samaa suuruusluokkaa.

Kuvassa 26 on esitetty kiihtyvyyssanturien asennusta kohteella. Kiihtyvyyssantureita asennettaessa päällysteeseen tehtiin useita railoja anturien johtoja varten. Tehdyt railot täytettiin bitumilla. Bitumilla täytetty railo on kuitenkin muuta päällystettä heikompi kohta, joka voi hieman suurentaa siirtymiä. Tämä siirtymän suureneminen ei kuitenkaan todennäköisesti ole merkittävää.



Kuva 26 Kiihtyvyyssanturien asennusta.

Kuvassa 27 on esitetty mittausdataa standardirekasta kohteella PL5700. Kiihtyvyyssanturien antama mittausdata on sitä helpommin tulkittavissa, mitä suurempia kiihtyvyyden arvot ovat. Jos kiihtyvyyden arvo on pieni, tulkinta vaikeutuu signaalin kohinan vuoksi.

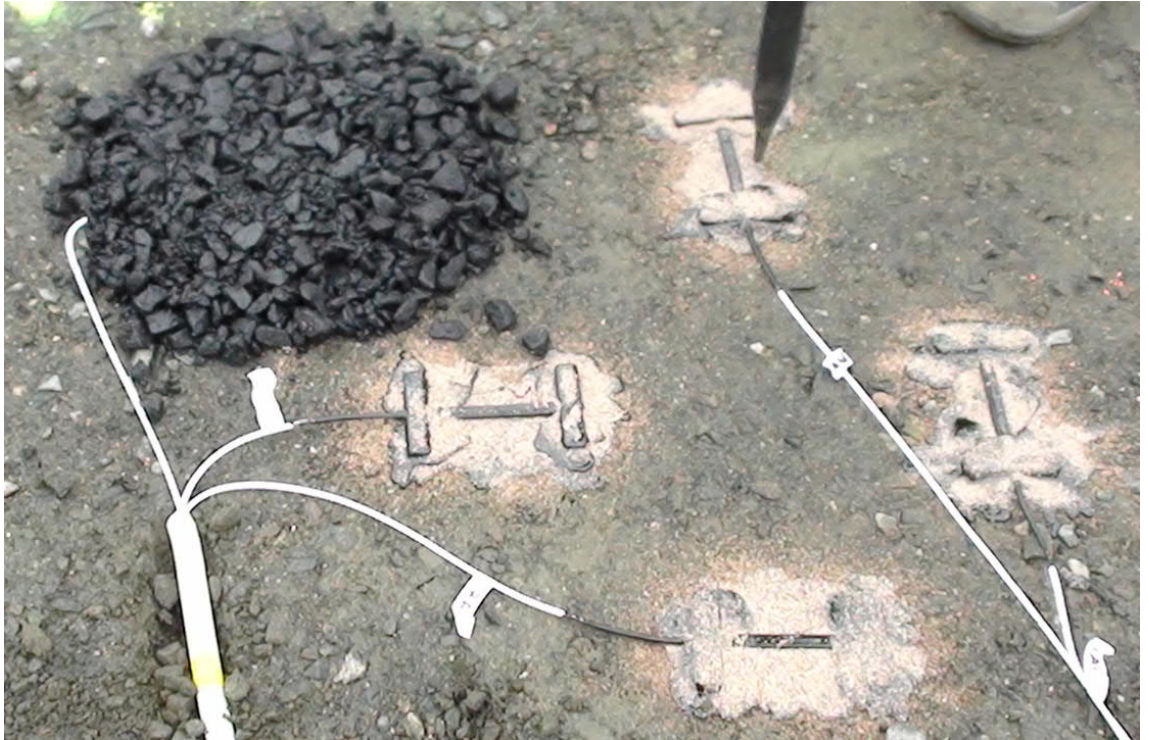


Kuva 27 Kiihtyvyyssanturin mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL5700.

3.4.4 Asfaltin alapinnan venymä

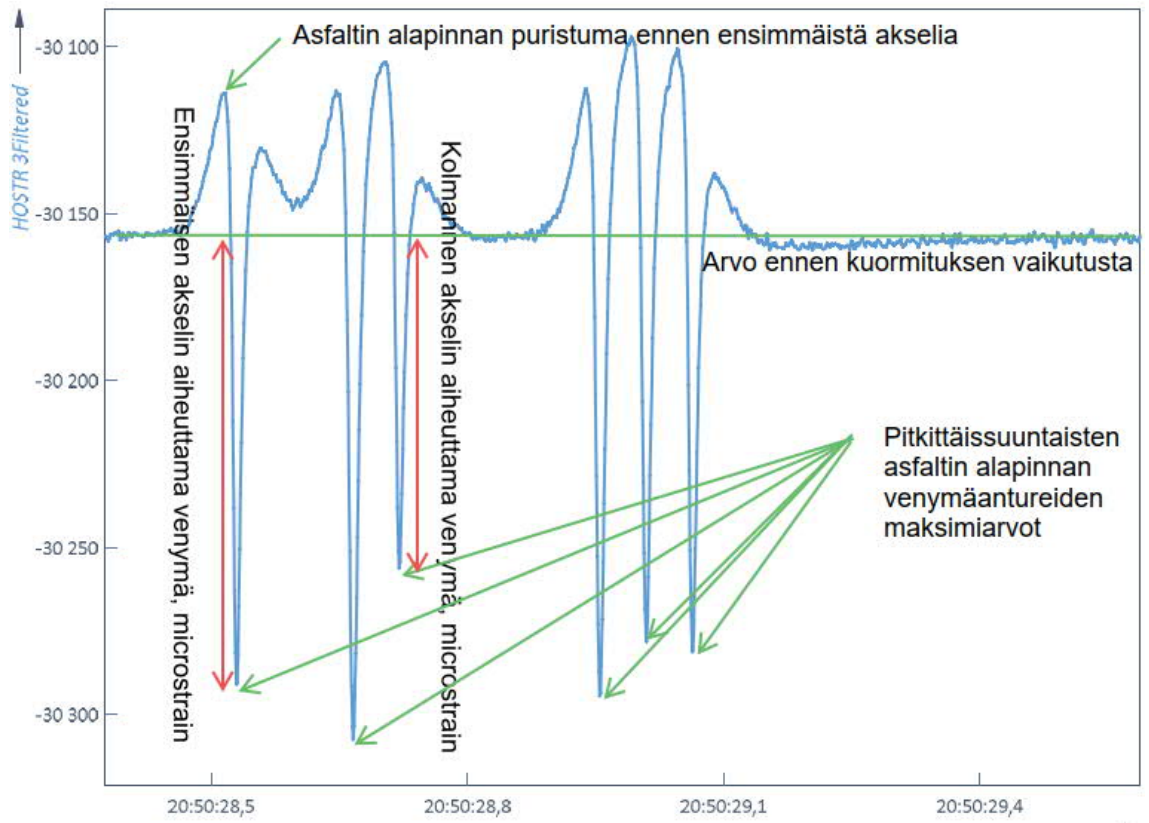
Päällysteen venymäanturi mittaa asfaltin alapinnan venymää. Osa antureista asennettiin mittaamaan venymää tien pituussuuntaan ja osa poikittaissuuntaan. Asfaltin alapinnan venymää mitataan kohteilla PL4900 ja PL5700. Venymän yksikkönä mittausdatassa on suhteellinen venymä eli strain. Tiedot anturien malleista ja sijainneista mittauskohteilla on esitetty liitteessä B.

Kuvassa 28 on esitetty anturien asennusta kohteella PL4900. Päällystystyön aikaistumisesta johtuen anturit jouduttiin asentamaan paljon nopeammin kuin asennusohjeissa suositeltiin. Kuvan 27 vasemmassa yläreunassa näkyvä anturien ympärille asennettu suoja-asfaltti ei ehtinyt jäähtyä ennen päällystystä, jolloin suoja-asfaltin suojaava vaikutus oli toivottua heikompi. Tästä huolimatta anturien antamat tulokset ovat järkeviä. Voidaan siis olettaa, että asennus oli onnistunut.

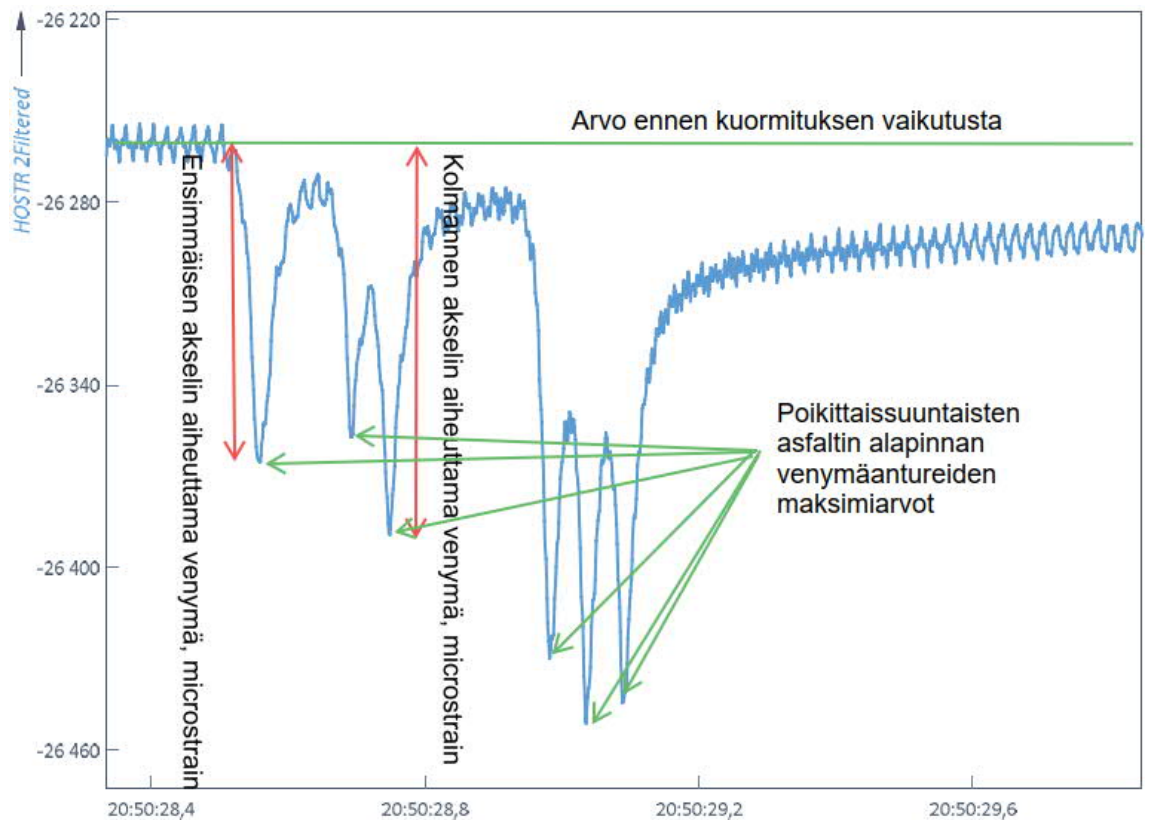


Kuva 28 Asfaltin alapinnan venymäanturien asennusta kohteella PL4900.

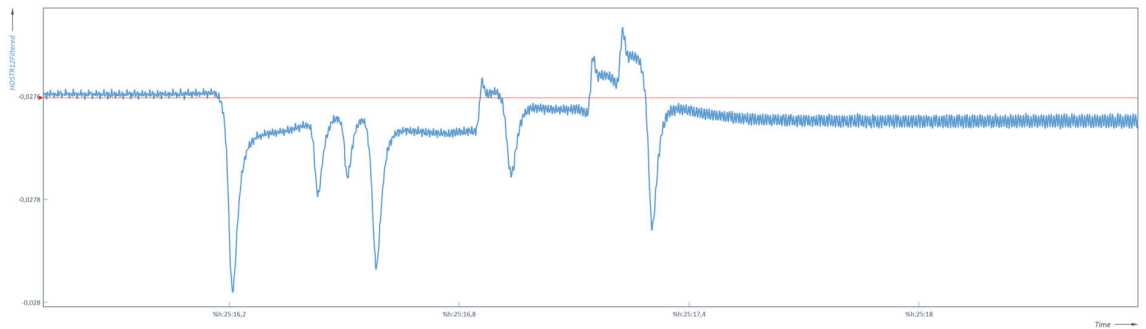
Kuvissa 29 ja 30 on esitetty asfaltin alapinnan venymäanturin mittausdatan yksinkertaistetut tulkintaperiaatteet standardirekasta kohteella PL5700. Kuvissa on esitetty helposti tulkittavat esimerkit. Asfaltin venymäanturin tulosten tulkinta on harvoin yksinkertaista. Venymä käyttäytyy erittäin vaihtelevasti riippuen ajoneuvon ajolinjasta, rengastuksesta ja olosuhteista tierakenteessa. Venymän maksimiarvot voivat olla kummalla puolella tahansa arvoa ennen kuormituksen vaikutusta, mutta näihin on yleensä löydettävissä looginen selitys. Toisinaan yksittäinen akseli aiheuttaa maksimiarvon kummallekin puolelle arvoa ennen kuormituksen vaikutusta, jolloin näistä kahdesta on valittu suurempi. Myös venymäantureiden signaalien häiriöt ja kohina ovat merkittäviä, kun venymä on pieni. Esimerkki vaikeatulkintaisesta asfaltin alapinnan poikittaissuuntaisen venymäanturin mittausdatasta on esitetty kuvassa 31. Kuvassa esitetty kuormitus on aiheutettu liitteessä A esitetyllä 9-akselisella koekuormitusrekalla.



Kuva 29 Asfaltin alapinnan pitkittäissuuntaisen venymäanturin mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL5700 20.8.2018 klo 20:50:27.



Kuva 30 Asfaltin alapinnan poikittaissuuntaisen venymäanturin mittausdatan tulkintaperiaate standardirekasta kohteella PL5700 20.8.2018 klo 20:50:27.



Kuva 31 Asfaltin alapinnan poikittaissuuntaisen venymäanturin vaikeatulkintainen mittausdata koekuormitusrekasta anturilla HOSTR12 24.7.2018 klo 9:25:19.

Pitkittäissuuntaisista venymäantureista havaitaan, että suoraan ajoneuvon pyörän alla päällysteen alapinta venyy. Kuitenkin juuri ennen akselia esiintyy päällysteen alapinnan kokoonpuristumaa. Kokoonpuristuma esiintyy jatkuvasti, toistuvasti ja loogisesti pitkittäissuuntaisilla venymäantureilla. Esimerkki asfaltin alapinnan horisontaalisesta kokoonpuristumasta on kuvassa 29.

3.4.5 Kantavan kerroksen pystysuuntainen kokoonpuristuma

Kantavan kerroksen pystysuuntainen kokoonpuristuma tarkoittaa suhteellista kokoonpuristumaa mittausvälillä. Kokoonpuristuman yksikkö mittausdatassa on millimetri, joka muutettiin mittaustuloksien esittämistä varten microstraineiksi. Kantavan kerroksen kokoonpuristumaa mitataan kohteilla PL4900 ja PL5700. Tiedot anturien malleista ja sijainneista mittauskohdeilla on esitetty liitteessä B. Liitteessä mainittu kantavan kerroksen kokoonpuristuma-anturin syvyys kertoo anturin ylemmän pyöreän levyn etäisyyden päällysteen pinnasta.

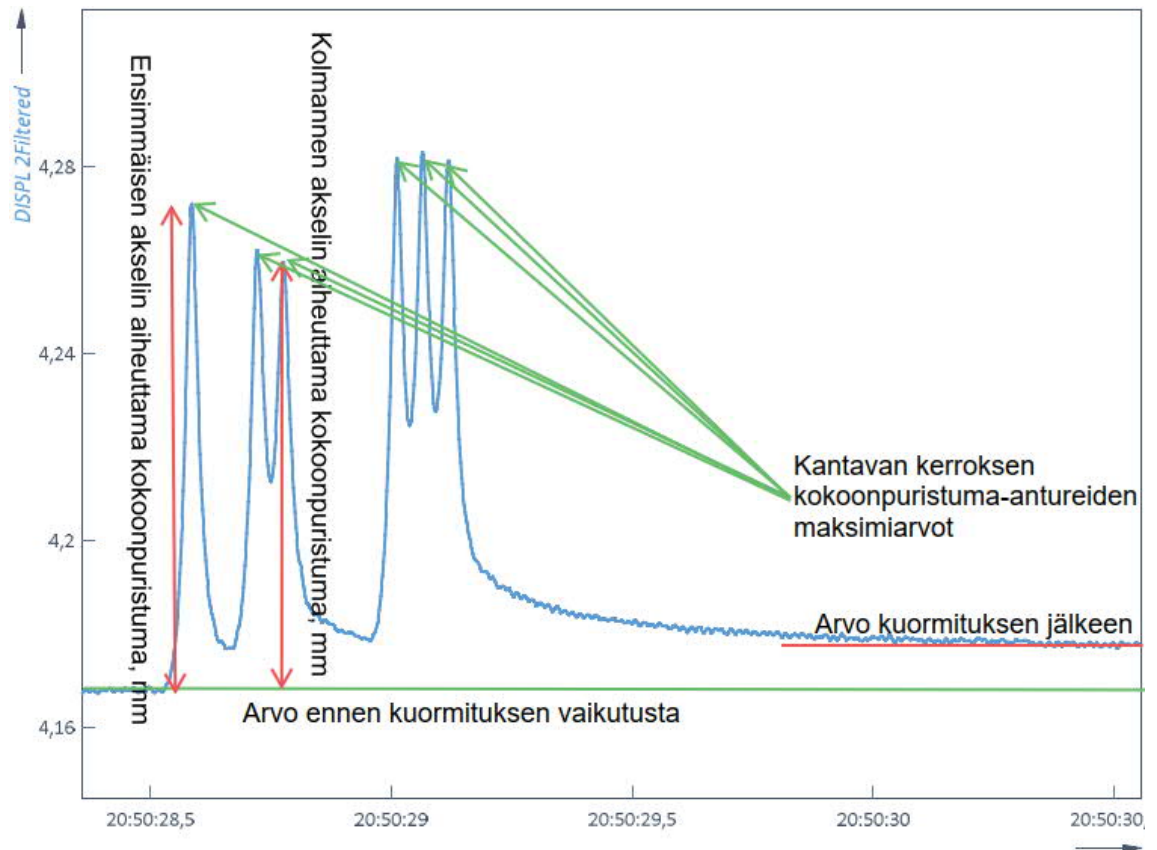
Kuvassa 32 on Tampereen yliopiston mittauskohdeelle PL5700 rakentamia kantavan kerroksen kokoonpuristuma-antureita. Anturit mittaavat niiden päissä olevien levyjen välisen etäisyyden muutosta millimetreinä Solartron metrologyn LVDT AS/15 anturilla. Kokoonpuristuma-anturien päissä olevien levyjen etäisyys oli 150 mm tierakenteeseen asennettaessa.



Kuva 32 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma-antureita.

Anturien asennuksessa kantavaa kerrosta poistettiin väliaikaisesti anturien alemman levyn tasolle. Poistettu maa saatiin tiivistettyä takaisin hyvin lähelle alkuperäistä tiiveyttä erikoistyykalujen avulla ennen ylemmän levyn asentamista. Anturien antamat tulokset ovat järkeviä.

Kuvassa 33 on esitetty kantavan kerroksen kokoonpuristuma-anturin mittausdatan tulkintaperiaatteet standardirekasta kohteella PL5700. Anturien tulosten tulkinta on yksiselitteistä. Kuvassa 33 esiintyvä arvo ennen kuormituksen vaikutusta voi olla isompi tai pienempi kuin arvo kuormituksen jälkeen. Todella pienillä kokoonpuristuman arvoilla signaalin kohina voi vaikeuttaa tulkintaa.



Kuva 33 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma-anturin mittausdatan tulkinta-periaatteet standardirekasta kohteella PL5700 20.8.2018 klo 20:50:27.

Kantavan kerroksen kokoonpuristuma-anturi DISPL4 tuotti väärän suuruusluokan tuloksia asennuksesta lähtien. Syytä tähän ei tiedetä. Anturin tuloksia ei ole käytetty mittausdatan tulkinnassa.

3.4.6 Akselipainot ja -määrät

Akselipainot ja -määrät mitataan ajoneuvokohtaisesti akselipainojen mittausasemalla. Cestel Company tulkitsee mittausasemalta saadut mittausdatat. Asema mittaa ajoneuvoittain kellonajan, lämpötilan, kokonaispainon, akselimäärän ja akselien jakautumisen teleittäin, akselien etäisyydet toisistaan, telin kokonaispainon ja yksittäisten akselien painon silloin kun ne eivät sijaitse teleillä. Tämä tarkoittaa käytännössä, että telillä olevilta akseleilta ei ole saatavissa yksittäisen akselin akselipainoa, vaan teliltä saa telin kokonaispainon. (Kulauzovic 2018) Sen sijaan yksittäiseltä akselilta, kuten rekkaa ohjaavalta ensimmäiseltä akselilta, saa akselipainon.

Tietojen määrittäminen perustuu ajoneuvon alla olevan sillan taipuman mittaamisen venymäantureilla. Näiden lisäksi käytetään erikseen venymäantureita mittaamaan ajoneuvon ajonopeutta ja akselien välistä etäisyyttä. Alkuperäisen version algoritmista, jolla muutetaan sillan venymät ajoneuvopainoiksi, kehitti F. Moses 1970-luvun loppupuolella. (Kulauzovic 2018)

3.4.7 Lämpötila ja dielektrisyys tierakenteessa

Roadscanners Oy:n asentamat percoasemat sijaitsevat mittauskohteilla PL4900 ja PL5700. Percoasemat mittaavat tierakenteesta dielektrisyyttä (Er), sähkönjohtavuutta ja lämpötilaa viideltä eri syvyydeltä. Näiden perusteella voidaan seurata tierakenteen kosteuden ja lämpötilan muutoksia ympäri vuoden. Percoaseman antureista mitatuista lämpötiloista voidaan myös laskea epäsuorasti tierakenteen lämpötila eri kerroksissa. Anturien arvot tallennetaan kahden tunnin välein. Näin percoasemat antavat hyvän kuvan tierakenteesta vallitsevista olosuhteista. Percoasemilla on myös mahdollista mitata vasteita nopealla 60 Hz taajuudella, mikä antaa mahdollisuuden tarkastella dielektrisyyttä ja sähkönjohtavuutta yksittäisen kuormituksen aikana. Percoasemien nopean taajuuden mittauksia ei käytetty tässä tutkimuksessa.

Dielektrisyys kuvaa vapaan veden määrää tierakenteessa. Tierakenteen kerroksien sulamista, jäätymistä, kosteuden lisääntymistä ja rakenteen kuivumista voidaan seurata dielektrisyyttä havainnoimalla. Dielektrisyyden arvo 16 on niin sanottu hälytysraja, jossa rakennekerroksen kantavuus heikentyy huomattavasti rakenteen vedellä kyllästymisen vaikutuksesta.

Kuvissa 38 ja 39 ovat esimerkit percoasemien mittausdatasta ja tiedot anturien asennussyvyyksistä. Kummallakin kohteella ylin anturi sijaitsee kantavassa kerroksessa päällysteen alapinnassa. Alin anturi sijaitsee penkereessä. Kohteella PL5700 anturit sijaitsevat 0,15 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m ja 1,0 m syvyydessä. Kohteella PL4900 anturit sijaitsevat 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,8 m ja 1,1 m syvyydessä. Talvella routa tunkeutuu tätä syvemmälle.

3.4.8 Muut mittaukset

Mittauskohteilla on myös monia muita Roadscanners Oy:n asentamia mittauslaitteistoja kuin tässä kappaleessa aiemmin mainitut. Roadscannersin profiling station mittaa jokaisen tiellä ajavan kulkuneuvon kaistan, nopeuden, leveyden, korkeuden, pituuden, ajoneuvon tyypin ja ajolinjan. Ajolinjamittaus antaa ajoneuville vain yhden lukeman ajolinjasta, jolloin eri akselien erilaiset ajolinjat eivät tule huomioiduksi. Profiling station sijaitsee mittauskohteilla PL4900 ja PL5700. Profiling stationin tiedot kerätään laserskanerilla. Kohteella PL4900 sijaitsee profiling stationin lisäksi lämpökamera, jolla on mahdollista seurata tien pinnan lämpötilan vaihtelua.

3.5 Mittaustiedostojen tallentaminen

Tampereen yliopisto vastaa asentamiensa anturien mittaustulosten tallentamisesta. Tässä luvussa käsitellään vain Tampereen yliopiston antureita ja niistä saatavien tietojen tallentamista.

Mittaustiedostot tallentuvat automaattisesti. Näin tulokset ovat nopeasti käytettävissä ja mittauksia voidaan tallentaa jatkuvasti vuoden ympäri. Mittauskohteiden tilan tarkistaminen ja asetusten muuttaminen on mahdollista etäyhteydellä.

Mittauskohteilla PL4900 ja PL5700 tietokoneet seuraavat jatkuvasti anturien lähettämiä vasteita. Tietyille antureille on annettu liipaisinehto, eli ehto jonka perusteella päätetään, milloin mittaustuloksia tallennetaan. Kun mikä tahansa liipaisinehdoista täyttyy, tietokone tallentaa mittauskohteelta kuuden sekunnin mittaustiedoston. Mittaustiedostoon sisältyy noin sekunnin mittainen jakso ennen liipaisinehdon täyttymistä. Tämän jälkeen mittaustiedosto tallennetaan Väyläviraston ja Tampereen yliopiston palvelimille. Tiedostot ovat luettavissa väyläviraston palvelimelta nettiosoitteesta "<https://aineistot.vayla.fi/aurora/>". Nettiosoitteessa on myös muiden tahojen tuottamaa avointa dataa Auroran älyliikenteiltä. Osa Tampereen yliopiston mittaustiedostoista ei ole tätä kirjoitettaessa Väyläviraston palvelimella rajapintamuutoksen takia, mutta tiedostot tallentuvat jatkuvasti Tampereen yliopiston palvelimelle.

Liipaisinehdot on asetettu 3-4 anturiin kummallakin mittauskohteella. Liipaisinehdoja muutetaan vuodenaikojen mukaan. Tavoitteena on, että kaikki mittauskohteiden yli kulkevat raskaiden ajoneuvojen kuormitukset tallennetaan. Tien ollessa jäässä mittausdataa tallennetaan kuitenkin harvemmin. Käytännössä raskas kuormitus tallennetaan, jos se kulkee antureiden päältä tai vierestä. Liipaisinehdojen asettaminen liian herkäksi voisi pahimmillaan käynnistää jatkuvan mittausten tallentamisen. Liipaisinehdoja on annettu mm. pystyjännitysantureille ja kantavan kerroksen kokoonpuristuma-antureille. Esimerkiksi pystyjännitysanturilla liipaisinehto täyttyy, kun pystyjännitys muuttuu 15 kPa lyhyen ajan sisällä. Liipaisinehdot ovat muutettavissa nopeasti etäyhteydellä.

Tampereen yliopiston mittaustiedostojen tallennustyyppi on .txt ja yhden tiedoston koko noin 2,5 MB. Mittaustiedostossa on noin 40 anturin mittaustulokset tallennettuna 6 sekunnin ajalta 1000 Hz mittaustaajuudella.

4. MITTAUSTULOKSET

Mittauskohteilla tehtävien automaattisten mittausten ansiosta mittausdataa on paljon. Siksi käsittelyä rajattiin. Käsittelyn rajaaminen mittausviikoille ja koekuormituspäiville pienensi käsiteltävän mittausdatan määrää merkittävästi. Tämän lisäksi rajausta tehtiin valitsemalla oleelliset ajoneuvot ja ajoneuvojen akselit kuormitusten joukosta. Mittausdatasta käsitellyistä mittaustuloksista tehtiin sovitekäyriä, jotka kuvaavat renkaan ylityksien aiheuttamia vasteita tierakenteessa. Sovitekäyriä tutkimalla on mahdollista tehdä päätelmiä tierakenteen käyttäytymisestä.

4.1 Mittausdatan käsittelyn periaatteet

Mittausdatan muokkaaminen mittaustuloksiksi ja sovitekäyriksi oli monivaiheinen prosessi. Ensiksi valittiin käsiteltävät kuormitukset eli mittausdatat kappaleen 4.1.1 mukaisesti ajoneuvopainojen mittausasemalta. Sitten yhdistettiin eri mittauskohteiden mittausdatat kappaleen 4.1.2 mukaisesti. Tämän jälkeen selvitettiin jokaisen käsiteltävän kuormituksen ajolinjat kappaleen 4.1.3 mukaisesti. Ajolinjan hakemisen jälkeen poimittiin mittausdatasta halutuilta antureilta akselikohtaiset maksimiarvot kappaleen 3.4. mukaisesti. Tämän jälkeen tehtiin jokaiselta tarkastelujaksolta anturityyppikohtaiset sovitekäyrät eli koontikuvaajat kappaleen 4.1.4 mukaisesti.

4.1.1 Käsiteltävän mittausdatan valinta

Perusideana käsiteltävän mittausdatan valinnassa oli käsitellä tarpeeksi monta kuormitusta, jotta kuormitusten ominaisuuksien vaihtelu tai satunnaiset maksimiarvot eivät vääristäisi mittaustuloksia.

Koekuormituspäiviltä käsiteltiin koekuormitusrekan kaikki tallennetut kuormitukset kaikilta akseleilta. Koekuormituspäiviltä ei käsitelty muuta mittausdataa.

Mittausviikkojen aikana mittauskohteilta tallennettiin suuri määrä ajoneuvojen ylityksiä eri mittausasemilla. Mittausdatan käsittely oli hidasta, joten kaikkia kuormituksia ei käsitelty. Kuormitusten ajoneuvot olivat hyvin erilaisia. Tämä johti tarpeeseen valita sellaisia kuormituksia käsittelyyn, että ne olisivat vertailukelpoisia keskenään ja niitä löytyisi riittävästi jokaiselta mittausviikolta. Käsiteltävien kuormitusten tuli olla raskaita ajoneuvoja, sillä mittausteknisesti ne aiheuttavat tarpeeksi suuret vasteet mittausantureille ja liipaisinehdoille. Lisäksi kevyemmät ajoneuvot eivät olleet mielenkiintoisia tutkimuskohteita mittausten tavoitteiden kannalta.

Kappaleessa 3.3.4 esitelty ajoneuvopainojen mittausasema tarjosi helpon tavan valikoida halutut kuormitukset liikennevirrasta. Käsiteltäväksi kuormitukseksi eli ”standardirekaksi” valittiin yli 400 kN painava rekka, jossa on ohjaava etuakseli, yksi kahden akselin teli ja yksi kolmen akselin teli. Kuvassa 34 on esimerkki standardirekasta.



Kuva 34 Esimerkki standardirekasta mittauskohteella PL5700. (Akkanen 2018)

Standardirekkojen telien akselimassat ja telien pyörätyypit vaihtelevat merkittävästi. Telien pyörät voivat olla yksikkö- tai paripyöriä ja rekka voi olla täyteen lastattu tai tyhjä. Etuakseli on aina varustettu yksikköpyörillä eikä sen akselimassa muutu merkittävästi kuormauksen vaihdellessa. Standardirekan toinen akseli on aina paripyörillä, mutta sen akselimassa muuttuu merkittävästi standardirekan lastauksesta riippuen. Tämän takia standardirekoista valittiin tarkasteltavaksi ensimmäisen akselin vasteet, jotka ovat riittävän vertailukelpoisia vuodenajasta ja rekan kuormauksesta riippumatta.

4.1.2 Eri mittauskohteiden mittausdatan yhdistäminen

Edellisessä kappaleessa esiteltiin, miten käsiteltävät ajoneuvot valittiin ajoneuvopainojen mittausasemalla. Tämän jälkeen etsittiin samat ajoneuvot muilta mittausasemilta. Tämä tehtiin ensisijaisesti perustuen ajoaikaan mittausasemien välillä ja mittausdatasta tulkittuun ajoneuvon akselimäärään. Osassa tapauksia hyödynnettiin ajoneuvopainojen mittausasemalta saatua tietoa rekan akselipainoista.

Tyypillinen mittauskohteiden mittausdata yhdistettiin seuraavasti. Standardirekka ylitti ajoneuvopainojen mittausaseman 17.12.2018 klo 19:13:46. Tämän jälkeen etsittiin mittausasemilta PL5700 ja PL4900 mittausdatasta kellonajan perusteella standardirekkaa vastaavat ylitykset. Tällaiset löytyivät klo 19:16:49 (PL5700) ja 19:17:25 (PL4900). Tä-

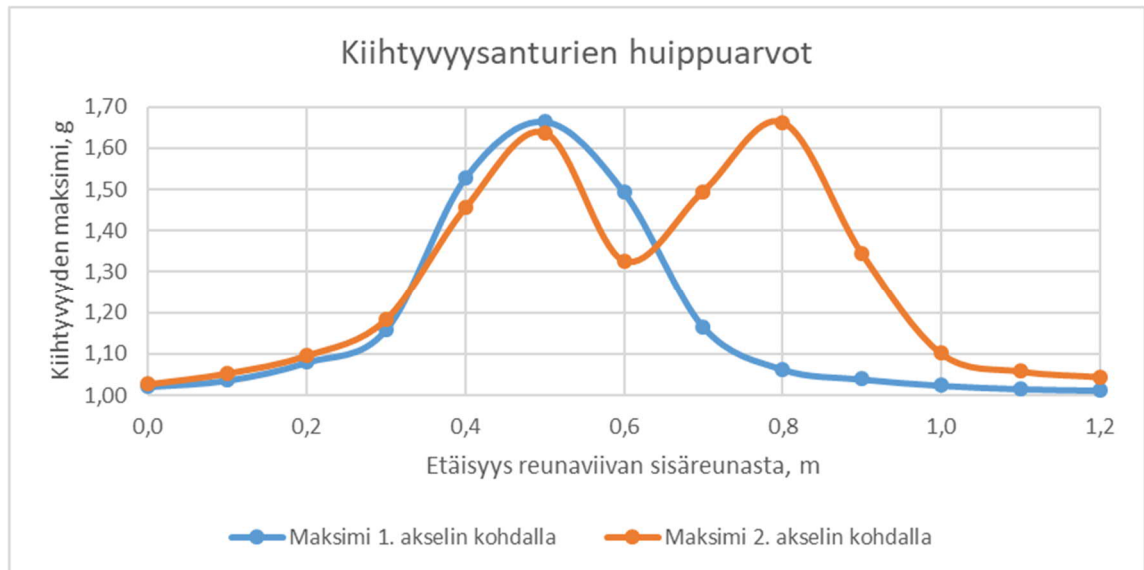
män jälkeen tarkistettiin kiihtyvyyssanturien kuvaajista, että PL5700 ja PL4900 kuormituksissa oli standardirekan akselisto. Koska tämä piti paikkansa, voitiin olettaa, että standardirekka tuli ajoneuvopainojen mittausasemalle klo 19:13:46, ohitti mittausaseman PL5700 klo 19:16:49 ja mittausaseman PL4900 klo 19:17:25. Ajoneuvopainojen mittausaseman kellonaika poikkesi muiden mittausasemien kellonajasta. Tämän poikkeaman suuruus vaihteli vuoden 2018 aikana.

4.1.3 Ajoneuvojen ajolinjojen selvittäminen

Epätarkka pyörän ajolinjan mittaus olisi tehnyt mittaustulosten analysoinnista vaikeaa ja monitulkintaista. Ajoneuvon ajolinja vaihtelee akseleittain (Vuorimies et al. 2018). Tästä johtuen ajolinjan arvoksi ei kelvannut mittauskohteiden profiling stationilta saatava ajolinjan arvo. Profiling stationin arvo kuvaa ajoneuvon ajolinjaa yhdellä luvulla.

Tavoitteena oli selvittää yksittäisen ajoneuvon pyörän ajolinja mahdollisimman tarkasti mittauskohteilla PL5700 ja PL4900. Helppimmaksi tavaksi ajolinjan selvittämiseen osoitautuivat kiihtyvyyssanturit. Ne sijaitsivat 0,1 m välein tien poikittaissuunnassa 1,2 m matkalla, joten niistä sai tarkemman käsityksen ajolinjasta kuin muista mittauskohteiden antureista. Ajolinjaa selvitetessä oletettiin, että kiihtyvyyssanturi antaa suurimmat arvonsa silloin, kun pyörä kulkee sen päältä. Tämän lisäksi oletettiin, että rekan yksikköpyörän leveys on tyypillisesti 0,385 m ja paripyörän hieman yli 0,63 m.

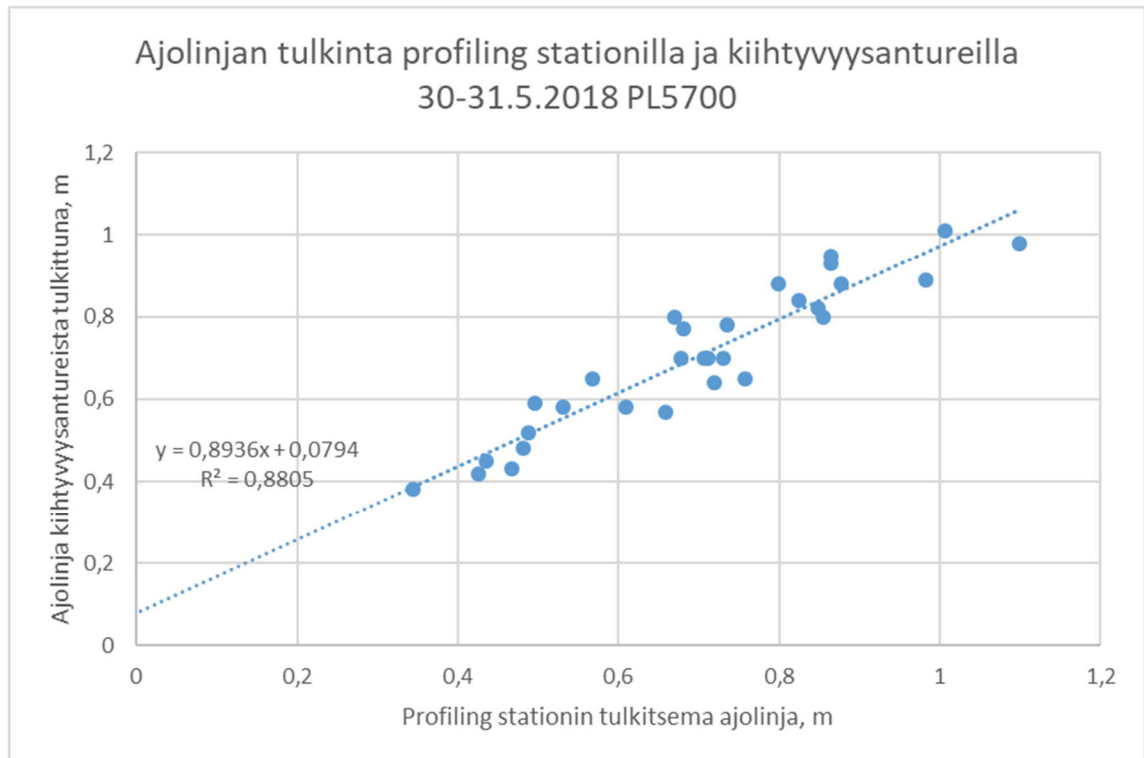
Pyörän sijainnin selvittäminen tehtiin seuraavalla tavalla. Ensin kirjattiin ylös halutun akselin kohdalta jokaisen kiihtyvyyssanturin maksimiarvo. Sitten piirrettiin kiihtyvyyden maksimiarvot kuvaajaan. Lopuksi arvioitiin pyörän sijainti kuvaajasta. Kokeilemalla selvisi, että yksikköpyörä aiheuttaa voimakkaat maksimit 2-4 anturilla ja paripyörä 4-6 anturilla. Kuvassa 35 on esimerkki koekuormitusrekan renkaiden sijainnin tulkinnasta yksikköpyörällä ja paripyörällä. Kuvassa 1. akselin yksikköpyörän keskikohta on noin 0,49 m ja 2. akselin paripyörän keskikohta noin 0,65 m reunaviivan sisäreunasta.



Kuva 35 Koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin pyörien aiheuttamat maksimikihtyvyydet kiihtyvyyssantureissa 24.7.2018 klo 9:42.

Kappaleessa 4.3 ja liitteessä D esitettyjen mittaustuloksien perusteella päätellään, että ajolinjan selvittäminen kiihtyvyyssantureista toimi pääosin hyvin. Jos ajolinjan selvittäminen olisi epätarkkaa, olisivat liitteen D mittaustulokset vaikeatulkintaisia ja sovitteiden tekeminen olisi lähes mahdotonta. Ajolinjojen selvittäminen oli epätarkempaa 10.10.2018 koekuormitusten ja 22-25.10.2018 mittausviikon tuloksista. Tämä johtuu todennäköisesti jäätyneen rakenteen jäykkyyden aiheuttamista pienistä vasteista kyseisinä viikkoina. Mittausviikon 12-18.12.2018 vasteet olivat niin pieniä, että epätarkkuudella ei ollut vaikutusta.

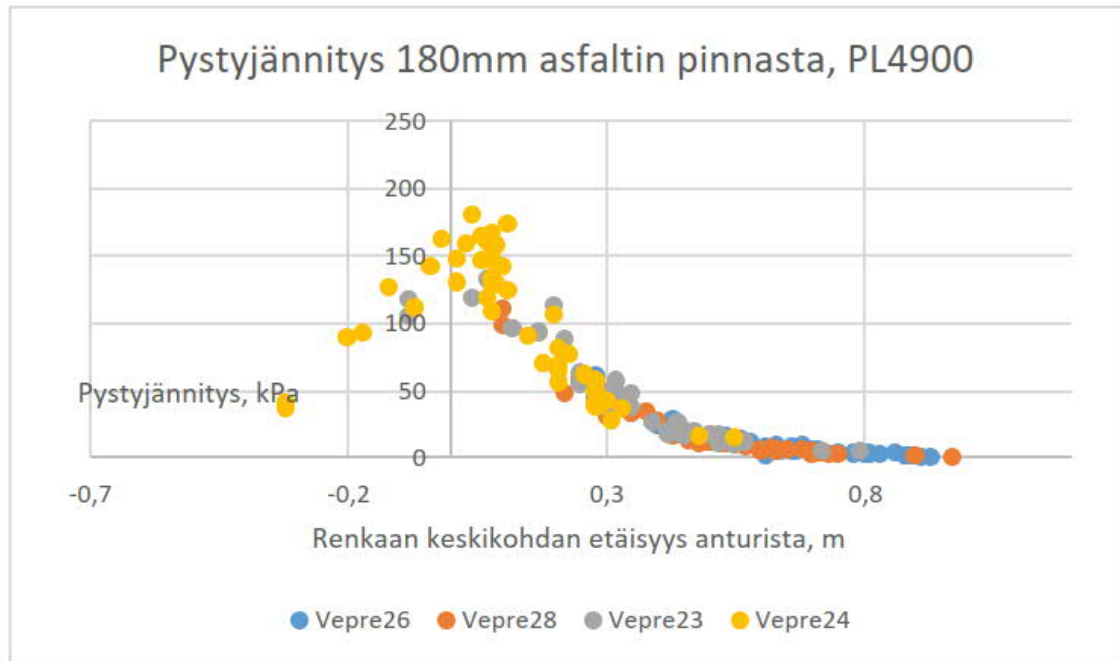
Kuvassa 36 on vertailtu raskaista ajoneuvoista 30-31.5.2018 tulkittuja ajolinjoja profiling stationilta ja kiihtyvyyssantureilta kohteella PL5700. Kiihtyvyyssantureista on tulkittu etupyörän keskikohta eli ajolinja. Profiling station mittaa koko ajoneuvolle ajolinjan yhdellä arvolla, joten se ei huomioi raskaiden ajoneuvojen huojuntaa ja ajolinjan vaihtelua eri akseleilla. Tampereen yliopiston mittaukset eivät mittaa etäältä antureista kulkevaa raskaasta ajoneuvoa. Profiling station ei ole mitannut ajolinjaa suuresta osasta ajoneuvoja, mikä johtunee ympäristöolosuhteista ja menetelmän kokeellisuudesta. Kuvassa 36 on vähän pisteitä, koska ajolinja oli saatavilla molemmilla menetelmillä vain harvasta raskaasta ajoneuvosta. Kuvassa on 30 pistettä. Jokaiselle pisteelle laskettiin hajonta eli itseisarvo kiihtyvyyssantureista tulkitun ja percystationin antaman ajolinjan erotuksesta. Pisteiden hajontojen keskiarvo on 0,05 m ja mediaani 0,04 m. Suurin ero ajolinjalle mitaustapojen välillä 30 pisteen joukosta on 0,13 m. Kokonaisuutena tämä tarkoittaa, että molemmat menetelmät ajolinjojen selvittämiseen toimivat. Kiihtyvyyssantureilla mitataan pyörän tai pyörien ajolinjaa, profiling stationilla rekan laidan sijaintia yhdellä luvulla.



Kuva 36 Ajolinjan tulkinnan tulosten vertailu kiihtyvyyssanturien ja profiling stationin välillä 30-31.5.2018.

4.1.4 Sovitteiden tekeminen

Kappaleessa 4.1.3 on esitetty ajoneuvon ajolinjan selvittäminen. Kappaleissa 3.4.1-3.4.5 on esitetty anturityyppikohtaisesti tarkasteltavien arvojen hakeminen mittausdatasta. Näitä tuloksia yhdistelemällä tehtiin kuvan 37 kaltaisia kuvia eri mitatuille suureille. Kuvassa 37 vaaka-akselina on ajoneuvon tarkasteltavan akselin ulomman puoleisen pyörän keskilinjan etäisyys vasteita mittaavasta anturista. Kuvaajan pystyakselina on mittaavan anturin anturivasteen muutos, joka kuvassa on pystyjännitys 180 mm syvyydellä tien pinnasta. Anturivasteen muutos tarkoittaa anturin kuormittamattoman tilanteen eroa tilanteeseen, jossa tarkasteltava akseli on mittaavan anturin päällä.



Kuva 37 Esimerkki 1. mittausviikon kuvaajasta. Pysty akselilla on pystyjännityksen maksimilisäys ensimmäisen akselin alla suhteessa ennen kuormitusta edeltävään tilaan. Poikittaisella akselilla on ajoneuvon ajolinja suhteessa mittausanturiin.

Kuvan 37 kaltaisia kuvia on paljon. Kuvaajille tehtiin sovitteet, jotta niitä olisi selkeämpää vertailla keskenään. Ne tehtiin pienimmän neliösumman menetelmällä käyttäen Excelin Solver-työkalua. Sovitekäyräksi valittiin

$$y = d + \frac{a+d}{1+\frac{x^b}{c}}$$

jossa x on renkaan keskikohdan etäisyys anturista (m). Sovitekäyrässä y on tarkasteltava suure (kPa, mm, microstrain). Jotta sovitteen tekeminen yhtälöllä onnistuisi, peilattiin y -akselin negatiivisella puolella olevat arvot ensin positiiviselle puolelle. Tälle peilatusalle kuvaajalle tehtiin sovite. Tämän jälkeen sovitteen x -akselin positiivisella puolella oleva sovite peilattiin x -akselin negatiiviselle puolelle.

4.2 Olosuhteet mittausajankohtina

Olosuhteet esitetään tässä mittausviikkojen ja koekuormituspäivien ajalta. Tarkimmat tiedot tierakenteen olosuhteista saadaan percoasemien mittaustulosten avulla. Selvitettävät asiat olivat päällysteen lämpötila, routa, tierakenteen mahdollinen jäätyminen tai sulaminen ja kosteus. Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty tiivistetysti olosuhteet tarkastelujaksojen aikana mittauskohteilla PL5700 ja PL4900.

Taulukko 5 Olosuhteet mittauskohteella PL5700.

Päivämäärä	19-25.4.2018	8-14.6.2018	24.7.2018	20-26.8.2018	10.10.2018	22-25.10.2018	12-18.12.2018
Nimi	Roudan sulamisen alkuvaihe	Roudan sulamisen loppuvaihe	Kesäkauden tilanne kuumana päivänä	Kesäkauden tilanne	Jäätymis-sulamissyklin sulamisvaihe	Nopea jäätyminen 0,5 m syvyydelle	Syvälle jäänyt rakenne
Tyyppi	Mittausviikko	Mittausviikko	Koekuormituspäivä	Mittausviikko	Koekuormituspäivä	Mittausviikko	Mittausviikko
Jää	Sulamisyvyhyke eteni 0,7-0,9 m	Sulamisyvyhyke syvemmällä kuin 1,0 m. Routa melkein sulanut.	Ei ole	Ei ole	Osittain jäänyt, noin 0,5 m syvyyteen	Routaraja laski 4 päivän aikana tien pinnasta 0,5 m syvyydelle	Routaraja noin 1,0m syvyydellä
Kosteus	Sula rakenne kosteaa jään päällä. Kantavan pintakerros jo hieman kuivunut. Heikko kantavuus.	Kohde kuivunut jo melkein kuivimpaan tilaansa 1,0 m syvyyteen asti. Tasainen kosteus viikon aikana.	Kohde kuivunut jo melkein kuivimpaan tilaansa 1,0 m syvyyteen asti. Tasainen kosteus viikon aikana.	Kesäkauden kuivun tilanne.	Ei merkittävää kosteuden muutosta kesään verrattuna.	-	-
Päällysteen lämpötila	Päällyste viileä	Kantava kerros noin 15 astetta, päällysteen pinta ei tätä enempää.	Kantavan kerros 25-30 astetta, päällysteen pinta 23-30	Kantava kerros noin 15 astetta, päällysteen pinta ei tätä enempää.	-	-	-

Taulukko 6 Olosuhteet mittauskohteella PL4900.

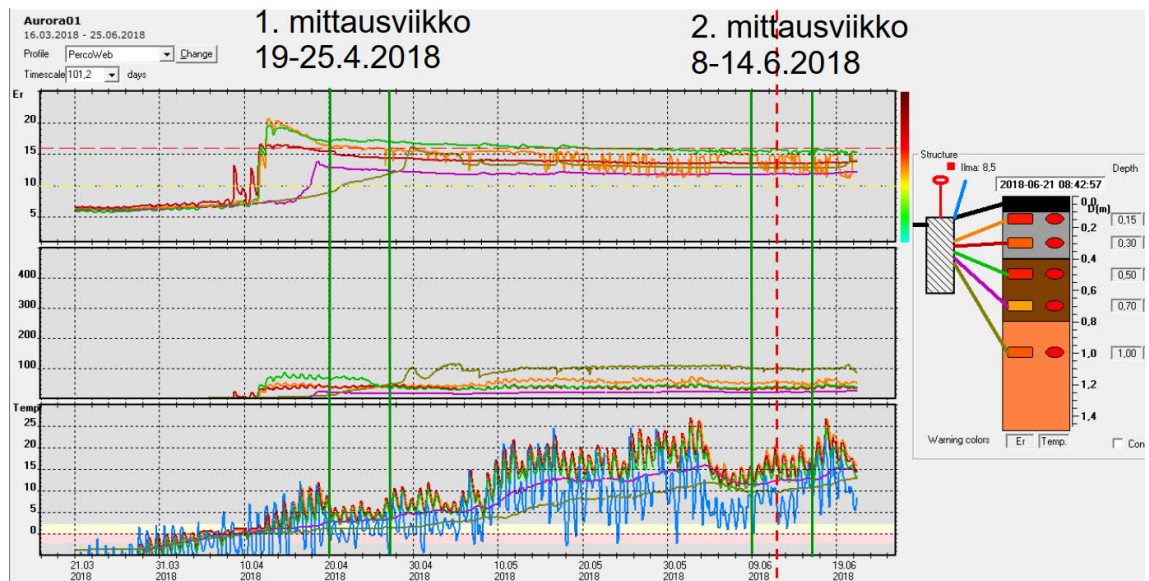
Päivämäärä	19-25.4.2018	8-14.6.2018	24.7.2018	20-26.8.2018	10.10.2018	22-25.10.2018	12-18.12.2018
Nimi	Roudan sulamisen alkuvaihe	Roudan sulamisen loppuvaihe	Kesäkauden tilanne kuumana päivänä	Kesäkauden tilanne	Jäätymis-sulamissyklin sulamisvaihe	Nopea jäätyminen 0,5 m syvyydelle	Syvälle jäänyt rakenne
Tyyppi	Mittausviikko	Mittausviikko	Koekuormituspäivä	Mittausviikko	Koekuormituspäivä	Mittausviikko	Mittausviikko
Jää	Sulamisyvyhyke eteni 0,8-1,1 m	Sulamisyvyhyke syvemmällä kuin 1,1 m. Routa melkein sulanut	Ei ole	Ei ole	Osittain jäänyt, noin 0,3 m syvyyteen	Routaraja laski 4 päivän aikana tien pinnasta 0,5 m syvyydelle	Routaraja 1,1 m syvyydellä
Kosteus	Sula rakenne kosteaa jään päällä. Kuivempi kuin PL5700. Kantava kerros jo hieman kuivunut. Heikko kantavuus.	Kohde kuivunut jo melkein kuivimpaan tilaansa 1,1 m syvyyteen asti. Tasainen kosteus viikon aikana.	Kohde kuivunut jo melkein kuivimpaan tilaansa 1,1 m syvyyteen asti. Tasainen kosteus viikon aikana.	Kesäkauden kuivun tilanne.	Ei merkittävää kosteuden muutosta kesään verrattuna.	-	-
Päällysteen lämpötila	Päällyste viileä	Kantava kerros noin 15 astetta, päällysteen pinta ei tätä enempää	Kantavan kerros 25-30 astetta, päällysteen pinta 23-30	Kantava kerros noin 15 astetta, päällysteen pinta ei tätä enempää	-	-	-

4.2.1 Roudan sulamisen alkuvaihe

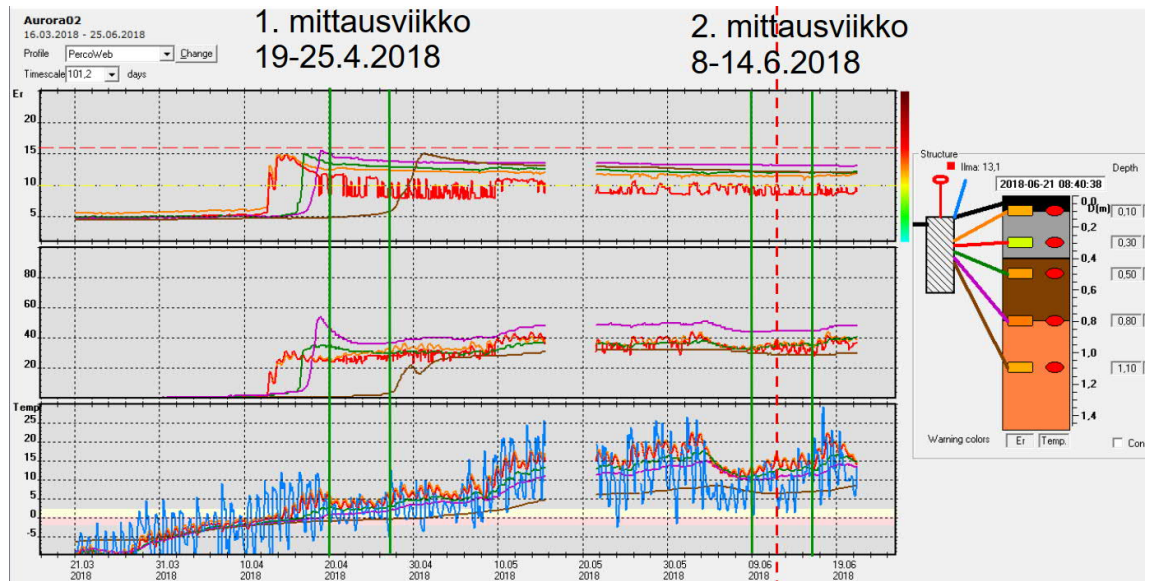
Ensimmäinen mittausviikko 19-25.4.2018 myöhästyi hieman roudan sulamisen alkuvaiheesta. Päällysteen lämpötilat olivat matalia.

Kohteella PL5700 tapahtui nopea sulaminen 10.4.2018 lähtien. Jokaisessa kerroksessa dielektrisyysarvon huippuarvo oli heti kerroksen sulamisen jälkeen, josta dielektrisyysarvo pieneni ensin nopeammin ja jäi sen jälkeen melkein tasapainotilaan. Heti kerroksen sulamisen jälkeen dielektrisyys 0,15 m ja 0,5 m syvyyksillä kävi arvossa 19 ja syvyydellä 0,3 m arvossa 16. Mittausviikon aikana dielektrisyysarvo 0,15 m syvyydellä oli 16 ja 0,5 m syvyydellä 17. Kerros 0,7 m syvyydellä oli täysin sula 18.4.2018 ja kerros 1,0 m syvyydellä 29.4.2018 Mittausviikon aikana rakenne oli kostea varsinkin 0,15-0,5 m syvyydellä, joskin rakenne oli jo hieman kuivunut kantavassa kerroksesta. Viikon aikana sulamisraja eteni 0,7 m syvyydeltä lähtien syvemmälle. Kantavan kerroksen lämpötila oli mittausviikon aikana 3-8 astetta. Kokonaisuutena tämä tarkoittaa rakennetta, jossa kantava kerros oli lähellä vedellä kyllästymistä ja tämän takia kantavuus oli heikko. Kohteen PL5700 percoaseman dielektrisyys, sähkönjohtavuus ja lämpötilamittaukset on esitetty kuvassa 38.

Kohteella PL4900 sitomattomien kerrosten sulaminen alkoi 11.4.2018. Jokaisessa kerroksessa dielektrisyysarvon huippuarvo oli heti kerroksen sulamisen jälkeen, josta dielektrisyysarvo pieneni ensin nopeammin ja jäi sen jälkeen melkein tasapainotilaan. Tämä dielektrisyysarvon maksimi oli jokaisella anturilla välillä 15-15,5. Rakennekerros 0,8 m syvyydessä oli täysin sula 19.4 mennessä. Ensimmäiset merkit sulamisesta 1,1m syvyydellä alkoivat mittausviikon viimeisenä päivänä. Mittausviikon aikana anturien dielektrisyysarvot olivat välillä 12-14,5 ja suurimmat dielektrisyydet esiintyivät 0,8 m syvyydellä tierakenteessa. Kokonaisuutena tämä tarkoittaa rakennetta, joka oli hieman kuivempi kuin kohteessa PL5700, kantava kerros oli jo hieman kuivunut sulamisesta ja jossa oli kosteuden synnyttämää kantavuuden alenemaa erityisesti alusrakenteen yläpinnassa. Dielektrisyysarvot eivät kuitenkaan missään vaiheessa nousseet arvoon 16, joka tarkoittaisi selkeää kosteuden aiheuttamaa kantavuuden alenemaa. Kohteen PL4900 kantavan kerroksen pienempiä Er-arvoja voi selittää myös sekoitusjyrsinnässä kerrokseen kulkeutunut bitumi, joka vähentää materiaalin herkkyttä vedelle. Kohteen PL4900 tulokset on esitetty kuvassa 39.



Kuva 38 Muonion Percoaseman PL5700 tilanne, Lapin percoasemien seuranta-raportti 21.6.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018a)



Kuva 39 Muonion Percoaseman PL4900 tilanne, Lapin percoasemien seuranta-raportti 21.6.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018a)

4.2.2 Roudan sulamisen loppuvaihe

Toinen mittausviikko 8-14.6.2018 sijoittui aikaan, kun routa oli juuri sulanut tai melkein kokonaan sulanut. Percoasemien mittaamalle syvyydelle 1,0-1,1 m asti kohteet olivat kuivuneet melkein kesäkauden kuivimpaan tilanteeseen. Tätä syvemmillä dielektrisyysarvot olivat todennäköisesti suurempia ja kerrosten kantavuus heikentynyt lähellä sulamisvyöhykettä. Kohteilla mitatut dielektrisyysarvot pienentyivät 30.4. alkaen.

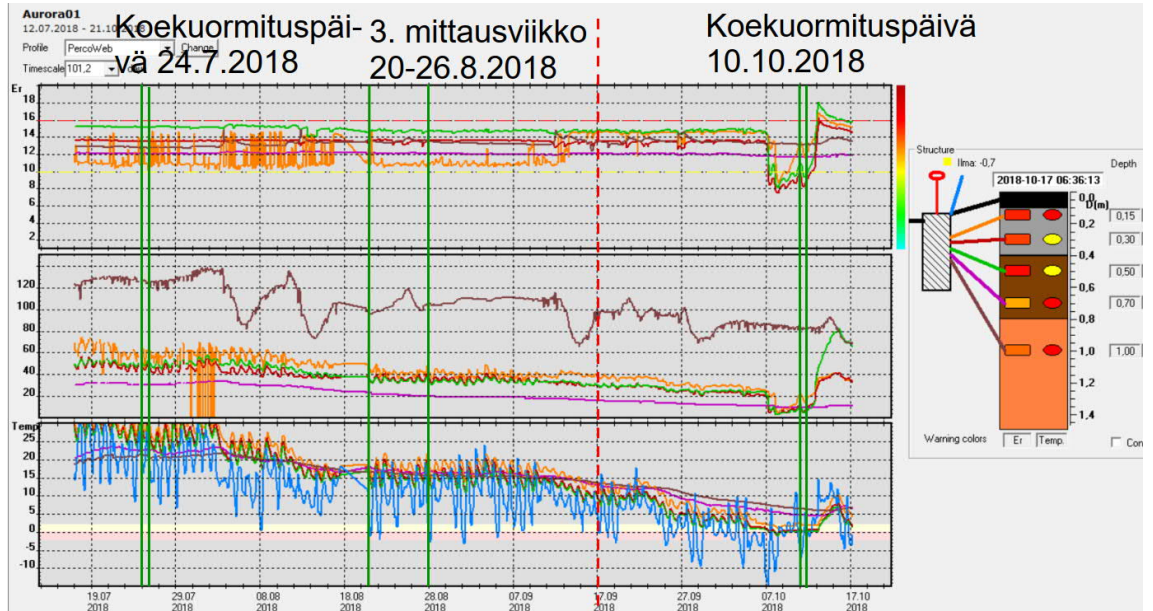
Kohteella PL5700 rakenteen kosteuspitoisuus pysyi tasaisena mittausviikon aikana. Kantavan kerroksen lämpötila vaihteli 15 asteen molemmiin puolin. Suurin dielektrisyys oli 0,5 m syvyydellä 15,5. Muuten dielektrisyydet vaihtelivat välillä 12-14. Kohteen PL5700 tulokset on esitetty kuvassa 38.

Kohteella PL4900 rakenteen kosteuspitoisuus pieneni hitaasti mittausviikon aikana. Rakenteessa oli selvästi vähemmän vettä kuin kohteella PL5700. Suurin dielektrisyysarvo oli 0,8 m syvyydellä 13. Muuten arvot olivat välillä 12-13. Kohde PL4900 oli siis kuivemmassa tilassa kuin kohde PL5700. Kohteen PL4900 tulokset on esitetty kuvassa 39.

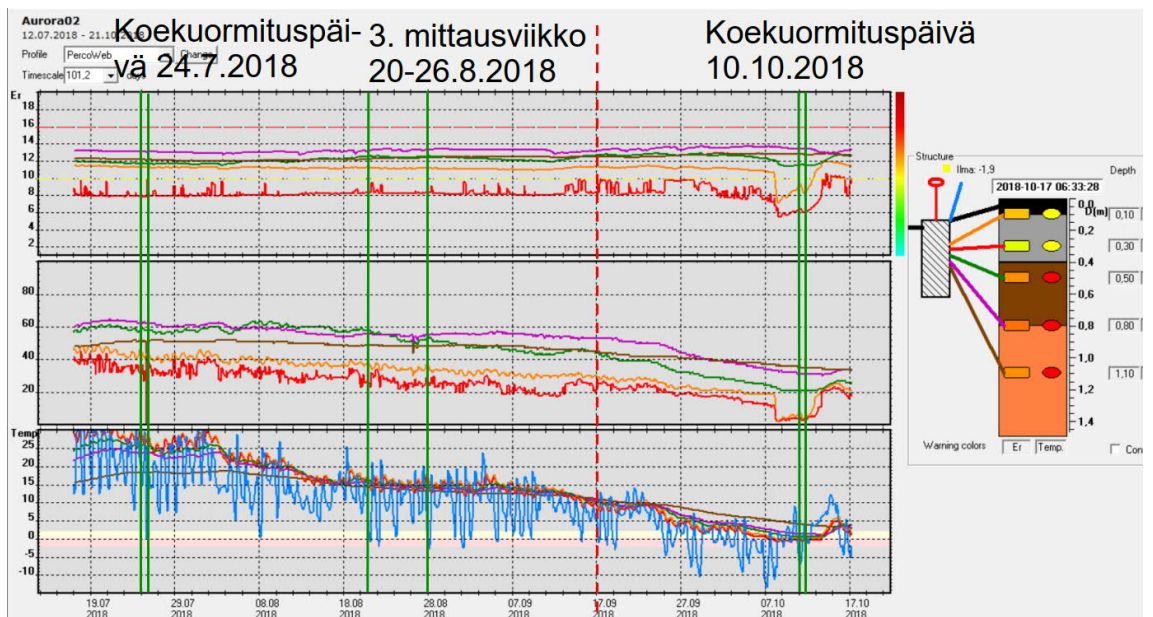
4.2.3 Kesäkauden tilanne

Koekuormituspäivä 24.7.2018 sijoittui kesän kuumimmalle ajalle. Kantavan kerroksen lämpötila liikkui välillä 25-30 astetta ja päällysteen lämpötilat olivat korkeat. Päällysteen lämpötilaksi mitattiin 23 astetta klo 9:00 ja 30 astetta klo 10:50 (Kalliainen 2018b). Koekuormitukset tehtiin klo 9:15-11:07. Kohde oli kuivunut melkein kesäkauden kuivimpaan tilaansa.

Kolmas mittausviikko 20-26.8.2018 sijoittui kesäkaudelle. Viikko kuvaa vuoden kuivinta tilannetta. Mittausviikon aikana ei ollut helteitä, joten päällysteen lämpötila pysyi maltillisena. Kantavan kerroksen lämpötila oli kohteilla noin 15 astetta. Kohteiden tulokset on esitetty kuvissa 40 ja 41.



Kuva 40 Muonion percoaseman tilanne PL5700, Lapin percoasemien seuranta-raportti, 17.10.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018b)



Kuva 41 Muonion percoaseman tilanne PL4900, Lapin percoasemien seuranta-raportti, 17.10.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018b)

4.2.4 Syksyn jäätymis-sulamis- vaihe

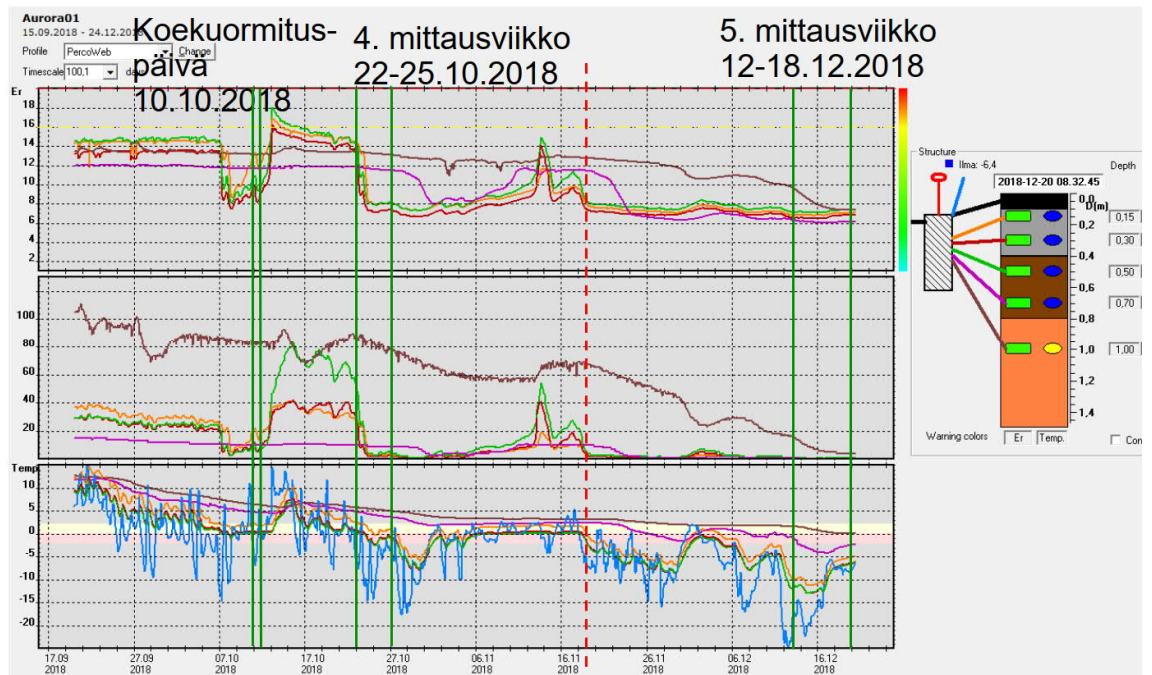
Koekuormituspäivä 10.10.2018 sijoittui jäätymis-sulamissyklin sulamisvaiheeseen. Kuormituspäivän aikana rakenne oli sulamassa kantavan kerroksen yläosasta ja jääty-

neen rakenteen alapinnasta, joka näkyi dielektrisyysarvojen nousuna. Dielektrisyysarvojen nousu alkoi jo 8.10.2018. Koekuormituspäivänä kohteella PL5700 routa oli edennyt hieman yli 0,5 m syvyyteen ja kohteella PL4900 hieman yli 0,3 m syvyyteen. Tierakenne oli 10.10.2018 tilassa, jossa kantavan kerroksen yläpinta oli juuri sulanut ja tämän alla oli sulava jäätynyt kerros. Rakenteen dielektrisyydestä tulkittu kosteus ennen jäätymissulamissykliä oli melkein sama kuin 3. mittausviikolla 20-26.8.2018.

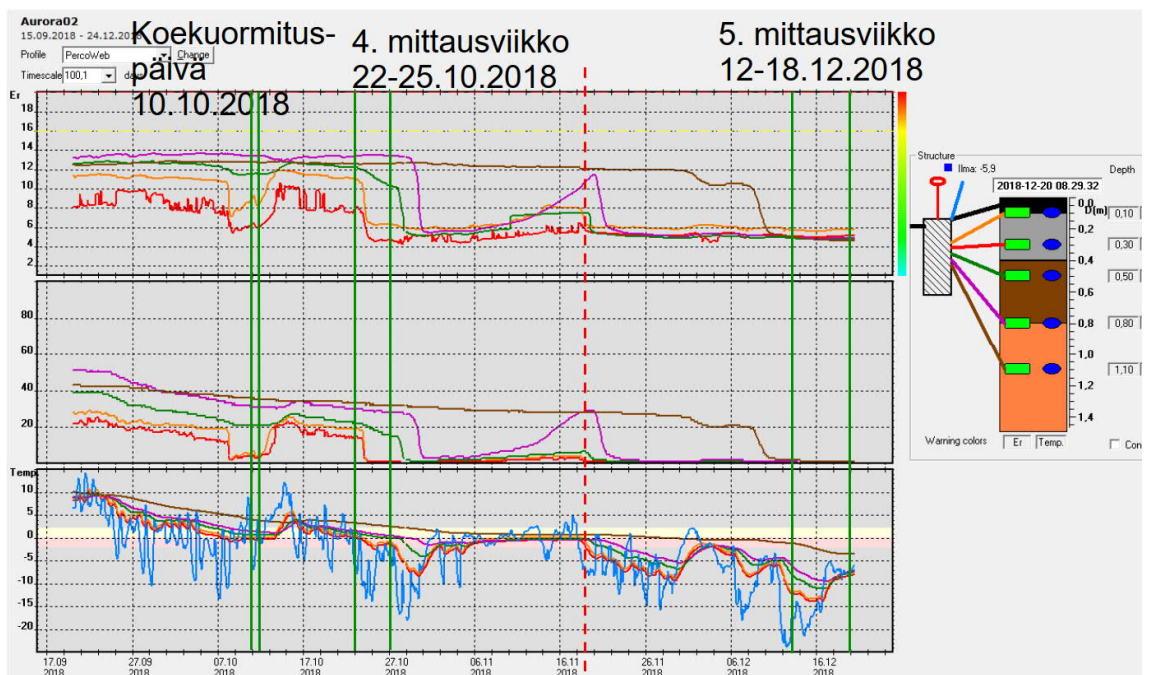
Neljännän mittausviikon 22-25.10.2018 aikana kohteiden kantavat kerrokset jäätyivät ja routa alkoi tunkeutua syvemmälle rakennekerrokseen. Mittausviikon aikana routa tunkeutui tien pinnasta noin 0,5 m syvyydelle. Mittausviikon aikana asfaltin lämpötila oli nollassa ja pakkasen puolella, seuraten todennäköisesti ilman lämpötilaa.

Kohteella PL5700 rakenteen yläosa kävi jäätymissulamissyklin läpi 7-11.10.2018. Heti sulamissyklin jälkeen kohteen dielektrisyysarvot syvyyksillä 0,15 m, 0,3 m ja 0,5 m kävivät piikinomaisesti korkealla. Tällöin tilanne oli hyvin samanlainen kuin keväällä heti roudan sulamisen alettua, joskin dielektrisyysarvot olivat hieman pienemmät. Korkeat piikit esiintyivät koko syklin jäätymissyvyydellä. Rakenne oli sulana vielä 22.10.2018, jolloin routaa oli korkeintaan hyvin ohut kerros asfaltin yläpinnassa. Päivien 23-24.10.2018 aikana rakenne jäätty nopeasti. 25.10.2018 rakenne oli jäätynyt hieman yli 0,5 m syvyyteen. Tämän jälkeen rakenne jatkoi jäätymistä, kunnes rakenteessa oli vielä nopea osittainen sulamis-jäätymissykli 17.11.2018. Kohteen PL5700 tulokset on esitetty kuvassa 42.

Kohteella PL4900 rakenteen yläosassa oli yksi jäätymissulamissykli 7-11.10.2018. Syklin jälkeen ei ollut piikinomaista dielektrisyysarvojen nousua toisin kuin kohteella PL5700. Rakenne oli sulana vielä 22.10.2018, jolloin routaa oli korkeintaan hyvin ohut kerros asfaltin alapinnassa. Päivien 23-24.10.2018. aikana rakenne jäätty nopeasti. 25.10.2018 rakenne oli jäätynyt melkein 0,5 m syvyyteen. Tämän jälkeen rakenne jatkoi jäätymistä, kunnes rakenteessa oli vielä nopea osittainen sulamis-jäätymissykli 17.11.2018. Kohteen PL4900 tulokset on esitetty kuvassa 43.



Kuva 42 Muonion percoaseman tilanne PL5700, Lapin percoasemien seuranta-raportti 20.12.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018c)



Kuva 43 Muonion percoaseman tilanne PL4900, Lapin percoasemien seuranta-raportti 20.12.2018. (Saarenketo & Pääkkö 2018c)

4.2.5 Jäätynyt rakenne talvikautena

Mittausviikon 12-18.12.2018 aikana rakenteissa oli noin 1 m paksuinen routaantunut kerros. Kohteella PL5700 rakenne jäättyi 1,0 m syvyydelle mittausviikon aikana. Ensimmäiset merkit 1,0 m kerroksen jäätymisestä näkyivät kuitenkin jo 28.11.2018. Kohteella PL4900 rakenne jäättyi 1,1 m syvyydellä 11.12.2018. Päätellään, että routa

tunkeutui kummallakin kohteella tätä syvemmälle talven edetessä. Kohteiden tulokset on esitetty kuvissa 42 ja 43.

4.3 Mittaustulokset liikennevirrasta ja koekuormituksista

Mittaustulokset on esitetty pääosin sovitekäyrinä, jolloin tarkasteluajankohtien ja rengastyypin keskenäinen vertailu on selkeämpää. Mittausdatan käsittely mittaustuloksiksi on esitetty kappaleessa 4.1.

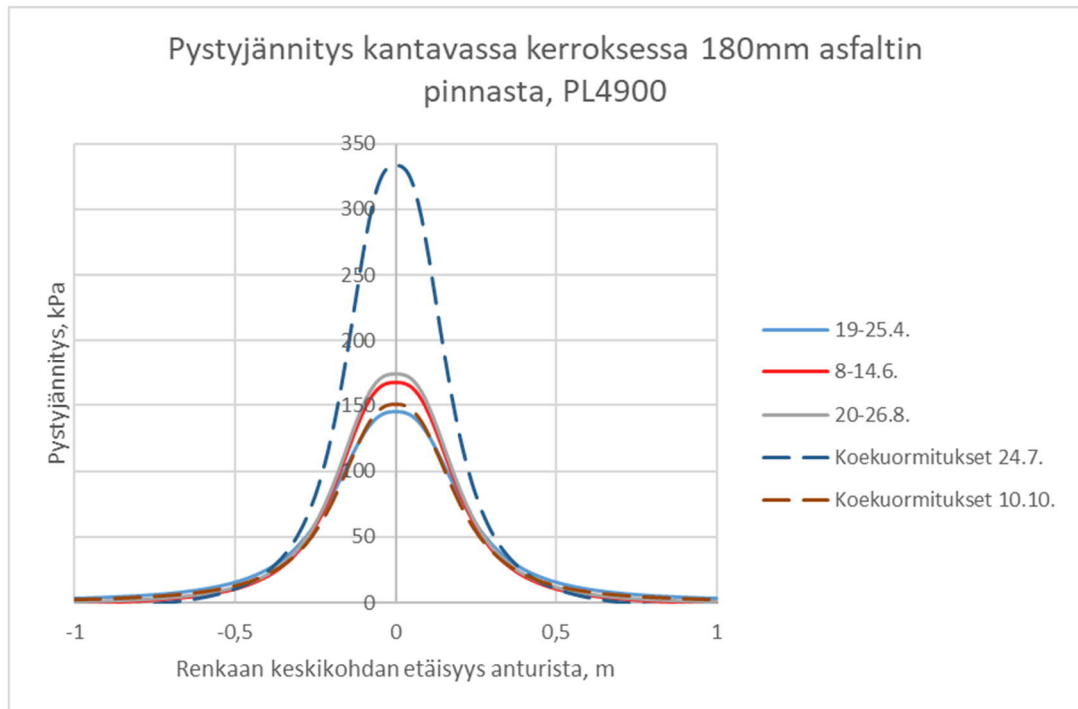
Taulukossa 7 on esitetty koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin akselipainot ja rengastiedot. Koekuormitusrekan 1. akselin pyörät olivat yksikköpyöriä ja 2. akselin pyörät paripyöriä. Heinäkuun koekuormituspäivänä 2. akselin akselipaino oli 1,5-kertainen verrattuna 1. akselin akselipainoon. Lokakuun koekuormituspäivänä 2. akselin akselipaino oli 1,3-kertainen verrattuna 1. akselin akselipainoon.

Taulukko 7 Koekuormitusrekan akselipainot ja rengastiedot. (Kalliainen 2018a)

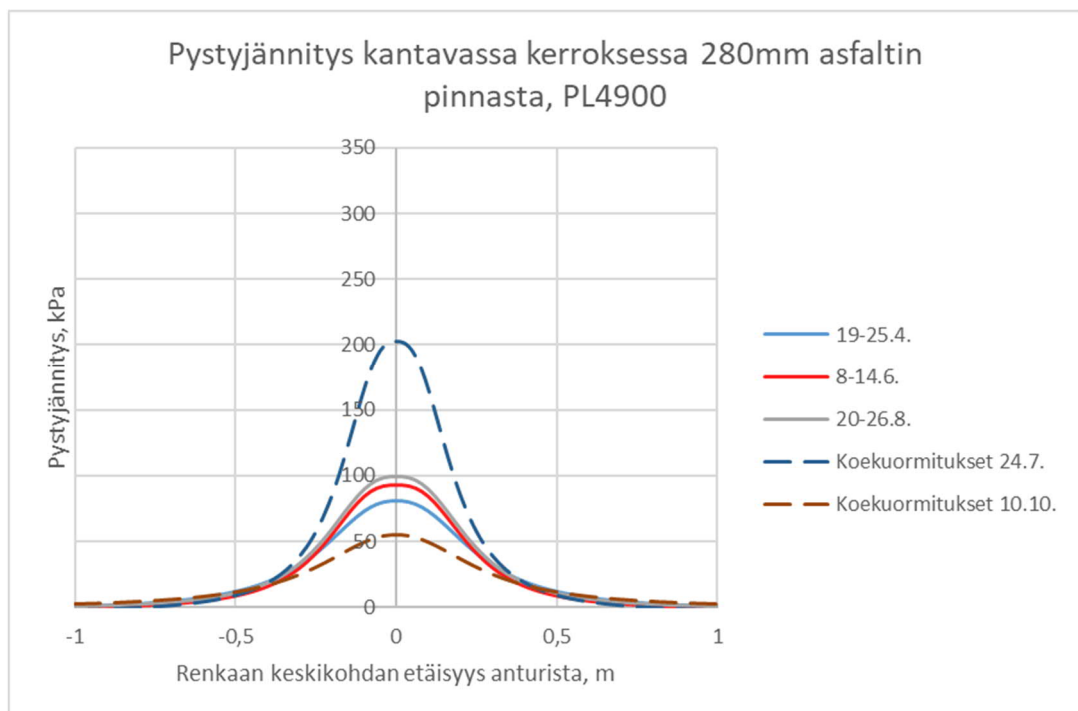
	1. akseli	2. akseli
Koekuormitusrekan akselipainot 24.7.2018	7,5 tn	11,5 tn
Koekuormitusrekan akselipainot 10.10.2018	8,0 tn	10,5 tn
Rengastyypit	385/65 R22.5	315/80 R22.5
	single	double

4.3.1 Pystyjännitys

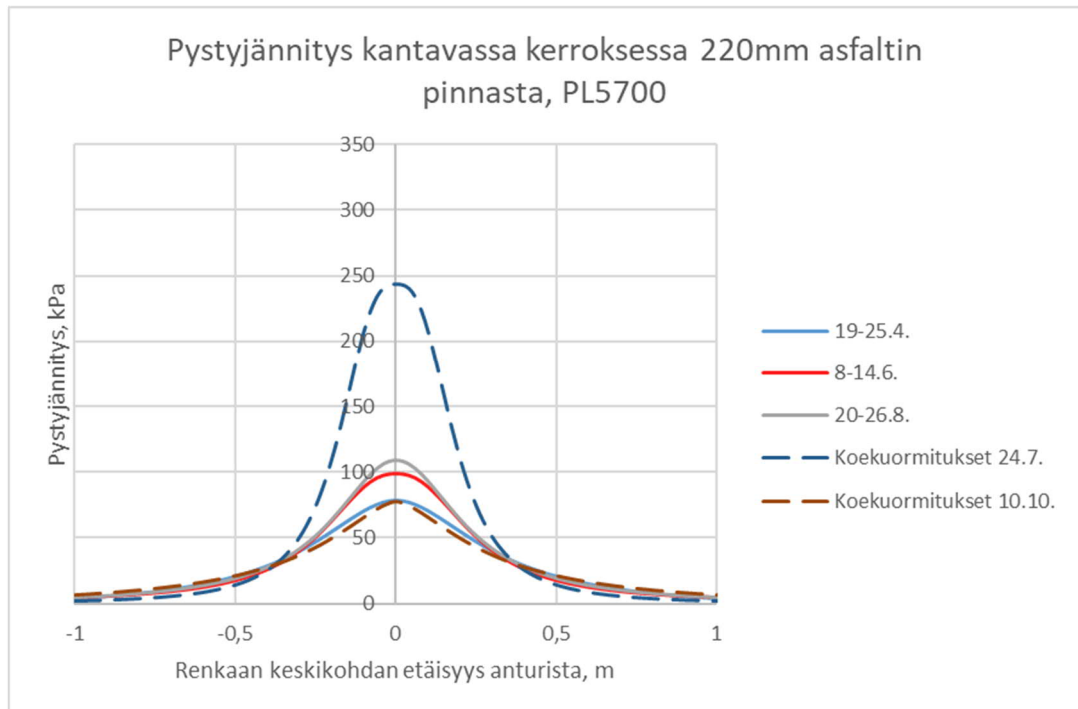
Kuvissa 44 ja 45 on esitetty pystyjännitys 180 mm ja 280 mm syvyydessä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla mittauskohteella PL4900. Kuvissa 46 ja 47 on esitetty pystyjännitys 220 mm ja 315 mm syvyydessä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla mittauskohteella PL5700. Kohteella PL5700 päällystepaksuus on 120 mm ja kohteella PL4900 90 mm. Päällystepaksuuserot ja anturien syvyyserot kohteiden välillä selittävät suurelta osin kohteiden PL4900 kohdetta PL5700 suuremmat pystyjännitykset.



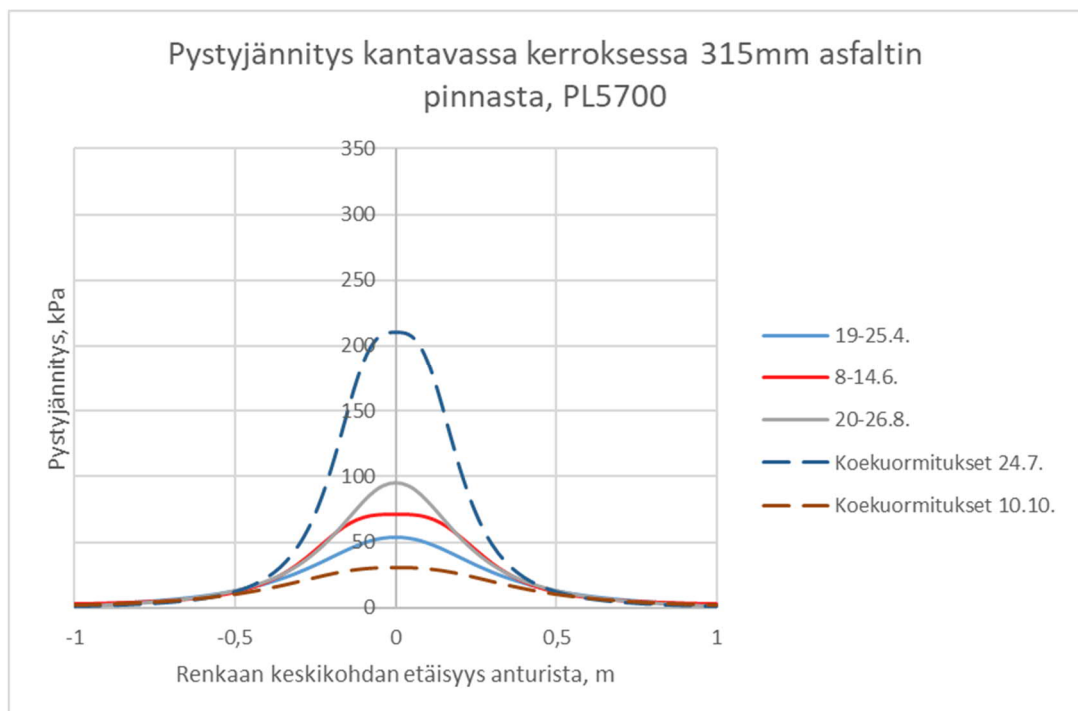
Kuva 44 Pystyjännitys 180 mm syvyydessä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900. Päällystepaksuus 90 mm.



Kuva 45 Pystyjännitys 280 mm syvyydessä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900. Päällystepaksuus 90 mm.



Kuva 46 Pystyjännitys 220 mm syvyydessä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700. Päälystepaksuus 120 mm.



Kuva 47 Pystyjännitys 315 mm syvyydessä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700. Päälystepaksuus 120 mm.

Jäätäneessä, jäätyvässä tai sulavassa rakennekerroksessa pystyjännitysanturien tulokset eivät ole yleensä luotettavia mittauskohteilla. Tämän seurauksena jäätymis-sulamisvaiheen ja jäätyneen rakenteen mittausviikkojen tuloksille ei tehty sovitetta pystyjänni-

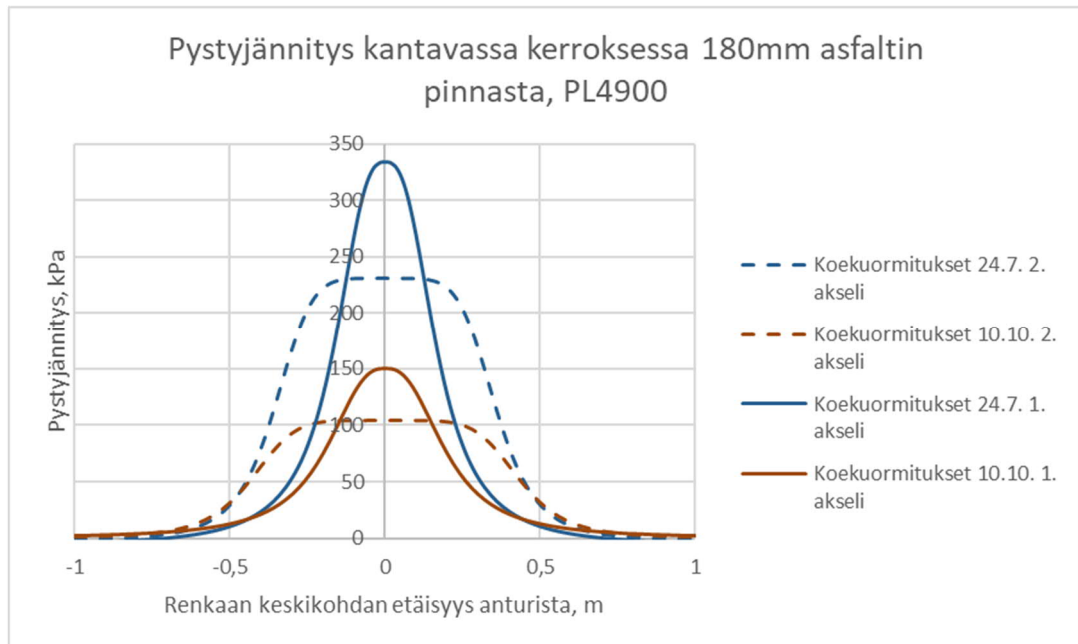
tyksen kuvaajiin. Koekuormituspäivälle 10.10.2018 tehtiin sovite. Tämä sovite oli helpompi tehdä rakenteen osittaisesta jäätymisestä huolimatta, koska 1. akselin akselipaino oli vakio ja ajoneuvoa ajettiin eri ajolinjoja pitkin.

Päällysteen lämpötilan vaikutus näkyy selkeänä pystyjännityksen sovitekäyrissä. Kuumman koekuormituspäivän 24.7.2018 aiheuttamat pystyjännitykset olivat selkeästi suurempia kuin muiden tarkastelujaksojen. Päällysteen lämpötilan vaikutus oli huomattava pystyjännitysten muodostumiseen kantavassa kerroksessa mittauskohteilla. Päällysteen nuori ikä voi selittää osaltaan lämpötilan suurta vaikutusta.

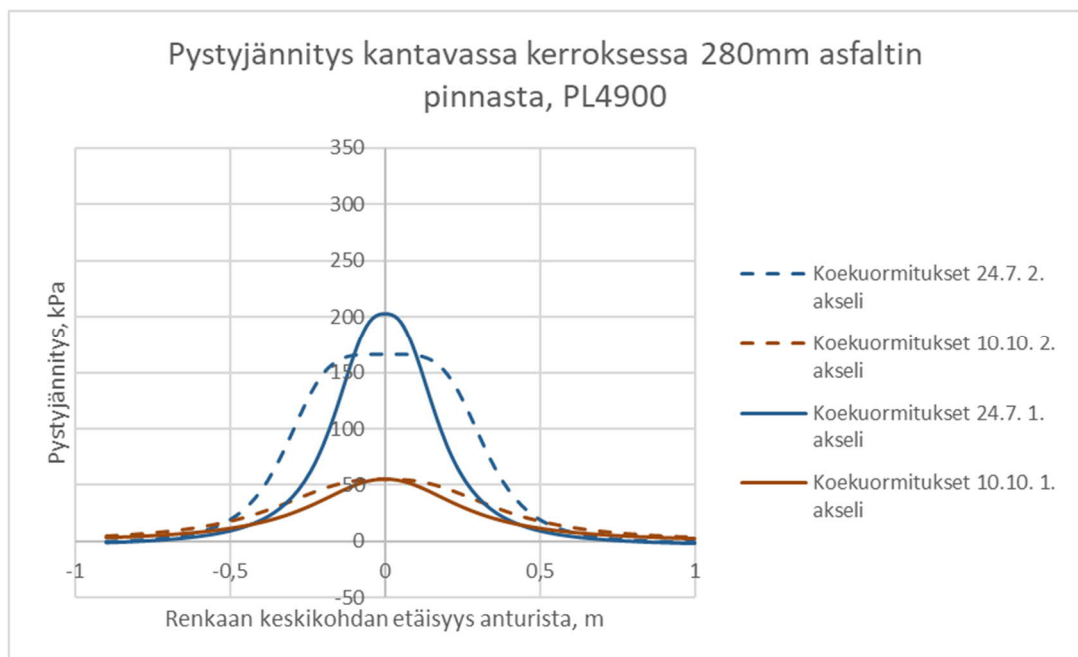
Pystyjännitykset kasvoivat hieman siirryttäessä huhtikuun mittausviikolta kesäkuulle ja elokuulle. Näistä kolmesta mittausviikosta ensimmäisellä oli muita hieman pienempi päällysteen lämpötila, mutta muuten lämpötila oli noin 15 astetta tai hieman alempi. Pystyjännityksen kasvamista voi selittää rakenteen kuivuminen, joka parantaa rakenteen kykyä ottaa vastaan jännityksiä. Toisaalta kuiva kantava kerros jakaa kuormituksia kosteaa kerrosta paremmin laajemmalle alueelle kantavassa kerroksessa, jolloin pystyjännitysten pitäisi pienentyä rakenteen kuivuessa. Yksi mahdollinen selitys pystyjännitysten kasvulle on liikennevirran erot mittausviikkojen välillä. Myös päällysteen alempi lämpötila huhtikuun mittausviikolla voi olla selittävä tekijä.

Koekuormituksen 10.10.2018 pystyjännitykset 180 mm ja 220 mm syvyyksillä olivat samaa mittaluokkaa kuin huhti-, kesä-, ja elokuun mittausviikoilla. Koekuormituksen 10.10.2018 pystyjännitykset 280 mm ja 315 mm syvyyksillä olivat kuitenkin selkeästi pienempiä kuin mittausviikkojen pystyjännitykset. Järkevä selitys tälle on anturin päällä olevan osittain jäätyneen kerroksen kuormitusta jakava vaikutus. Päällysteen lämpötila oli noin 0,5-3 astetta. Pystyjännitysten tulokset 10.10.2018 ovat luotettavia jäätä huolimatta. Siispä tämä on paras löydetty selitys, miksi 0,1 m osa kantavaa kerrosta vaimentaa kesäkautta paremmin pystyjännityksien muodostumista.

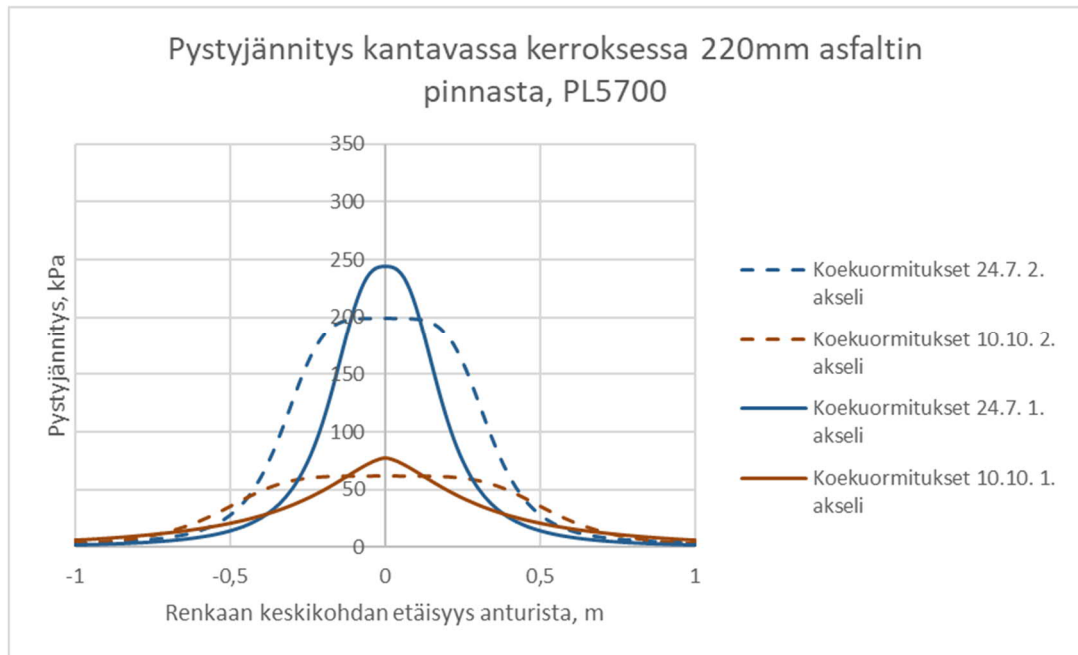
Kuvissa 48 ja 49 on esitetty pystyjännitys 180 mm ja 280 mm syvyydessä koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla mittauskohteella PL4900. Kuvissa 50 ja 51 on esitetty pystyjännitys 220 mm ja 315 mm syvyydessä koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla mittauskohteella PL5700.



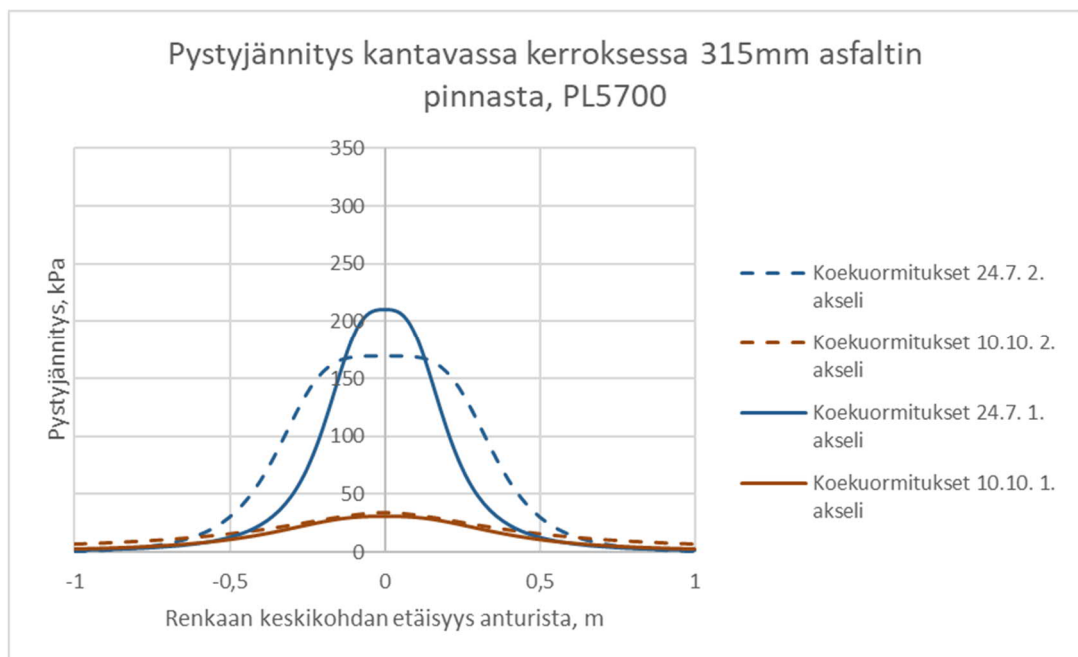
Kuva 48 Pystyjännitys koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla 180 mm syvyydessä. Mittauskohde PL4900. Päällystepaksuus 90 mm.



Kuva 49 Pystyjännitys koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla 280 mm syvyydessä. Mittauskohde PL4900. Päällystepaksuus 90 mm.



Kuva 50 Pystyjännitys koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla 220 mm syvyydessä. Mittauskohde PL5700. Päälystepaksuus 120 mm.



Kuva 51 Pystyjännitys koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla 315 mm syvyydessä. Mittauskohde PL5700. Päälystepaksuus 120 mm.

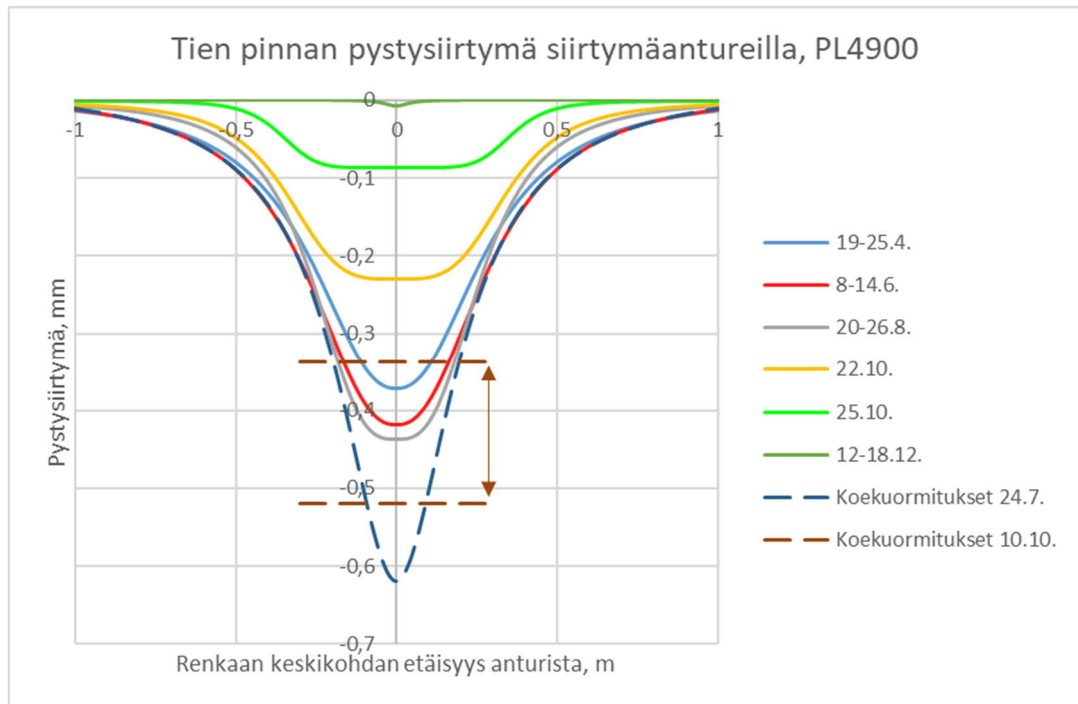
Kuvista 48 - 51 nähdään, että 1. akselin yksikköpyörä aiheutti merkittävästi suuremmat pystyjännityksen maksimi-arvot koekohteiden kantavissa kerroksissa kuin paripyörä. Tämä on erityisen merkittävää, sillä paripyörän akselipaino oli heinäkuun koekuormituksissa 1,5-kertainen ja lokakuun koekuormituksissa 1,3-kertainen verrattuna yksikköpyörään. Vastaavasti nähdään, että paripyörä aiheuttaa pystyjännityksen maksimi-arvoja kantavassa kerroksessa huomattavasti yksikköpyörää leveämmällä alueella. Yksik-

köpyörän ja paripyörän pystyjännityksen maksimien erot eivät näy 10.10.2018 koekuormituksen sovitteissa 280 mm ja 315 mm syvyyksillä. Tämä selittyy sillä, että osittain jäänyt rakenne jakoi yksikköpyörän ja paripyörän jännityksiä tehokkaasti ja että paripyörän akselilla oli 1,3-kertainen akselimassa verrattuna yksikköpyörään.

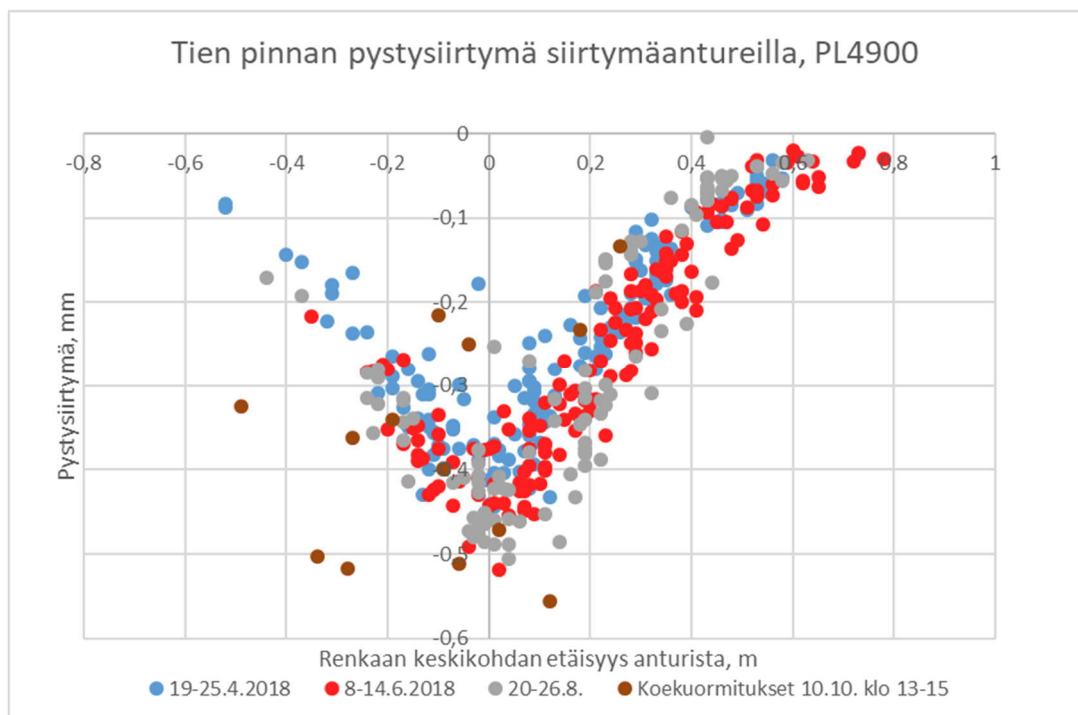
4.3.2 Tien pinnan pystysiirtymä

Kuvassa 52 on esitetty standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla siirtymäantureilla mitatut tien pinnan pystysiirtymät mittauskohteella PL4900. Koekuormituksen 10.10.2018 tulokset olivat epäselviä. Koekuormituksen sovite on korvattu kahdella viivalla, jotka arvioivat pystysiirtymän huipun sijaintia. Tämän koekuormituksen huipun korkeus on tulkinnanvarainen ja sen arvo on välillä 0,33-0,52 mm. Lokakuun koekuormituksen huipun korkeuden tulkinnanvaraisuus on merkittävä epävarmuustekijä.

Kuvassa 53 on esitetty standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla siirtymäantureilla mitatut tien pinnan pystysiirtymät mittauskohteella PL4900. Kuvassa 53 on esitetty huhtikuun, kesäkuun ja elokuun mittausviikkojen sekä lokakuun koekuormituspäivän tulokset ilman sovitteita. Käytännössä tämä tarkoittaa, että yksi piste kuvaajassa vastaa yhtä mittausta yhdellä anturilla. Kuvasta havaitaan, että lokakuun koekuormituksen tulokset ovat hajanaisia. Lokakuun koekuormituksen pystysiirtymän suurimmat arvot ovat kuitenkin hieman isompia kuin mittausviikkojen suurimmat arvot. Tästä voidaan päätellä, että lokakuun koekuormitus aiheutti pahimmillaan suurempia pystysiirtymiä kuin mitä mittausviikoilla havaitut arvot olivat. Lokakuun koekuormituksesta on valittu kuvaan 53 iltapäivän kuormitukset, jolloin tierakenne oli ehtinyt sulaa aamupäivää enemmän.



Kuva 52 Tien pinnan pystysiirtymä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900.



Kuva 53 Tien pinnan pystysiirtymä standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900.

Päällysteen lämpötilan vaikutus näkyy selkeänä tien pinnan pystysiirtymissä kuvassa 52. Kuuman koekuormituspäivän 24.7.2018 aiheuttamat pystysiirtymät olivat selkeästi suurempia kuin muiden tarkastelujaksojen. Osa tästä erosta voi selittyä päällysteen nuoresta iästä ja siitä, että koekuormituksesta on helpompi tehdä luotettava sovitte. Joka

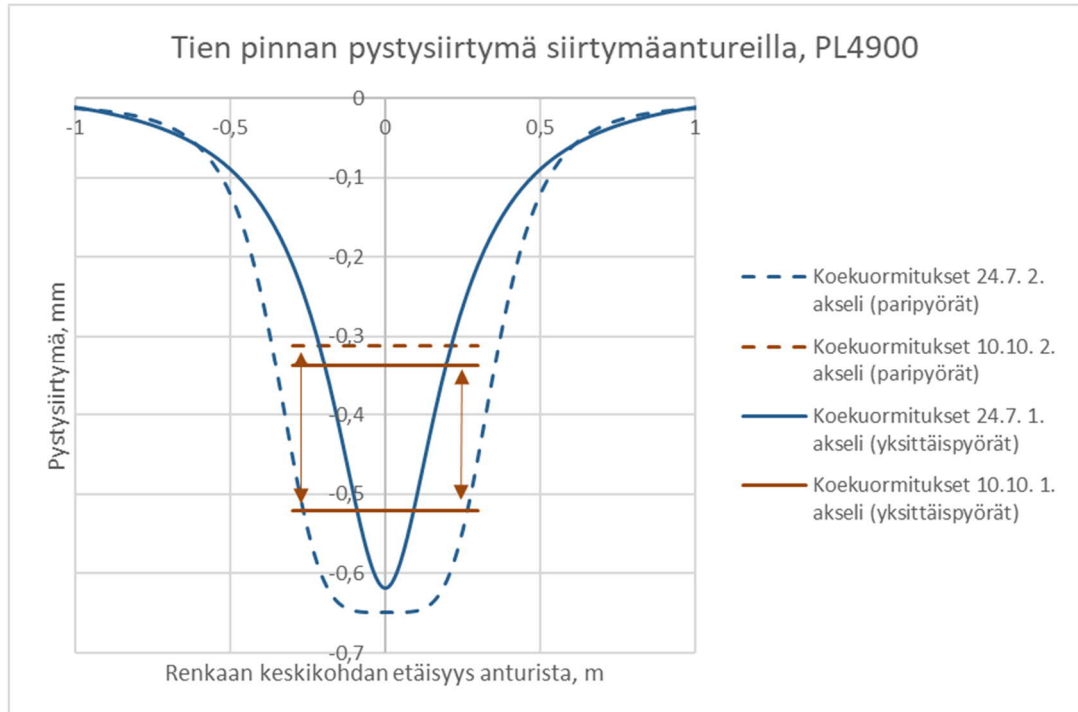
tapauksessa sovitteiden suuruusluokat ovat oikein, joten päällysteen lämpötilan vaikutus oli huomattava tien pinnan pystysiirtymän muodostumiseen mittauskohteella PL4900.

Vertaillessa mittaustuloksia 22.10.2018 ja 25.10.2018 huomataan roudan vaikutus. Roudan tunkeutuminen 0,5 m syvyyteen puolitti tien pinnan pystysiirtymät tänä aikana. Kun tarkastellaan 12-18.12.2018 mittaustuloksia, havaitaan että siirtymät olivat tällöin mitättömiä. Roudan tunkeutuminen metrin syvyydelle pienensi siirtymät mitättömiksi. Sovite pystysiirtymälle ajalta 12-18.12.2018 kuvaa pystysiirtymän maksimiarvoa tuona aikana. Mittausviikolla 12-18.12.2018 pystysiirtymän arvot olivat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta mittaustarkkuuden alapuolella.

Koekuormituksen 10.10.2018 aikana osa kantavasta kerroksesta oli jäässä. Tällöin siirtymät olivat silti suuremmat kuin 22.10.2018. Tämän voi selittää se, että 10.10.2018 osa rakenteen pinnasta oli juuri sulanut ja sulamassa, jolloin rakenteen kosteus on voinut suurentaa siirtymiä. Percoasemalta saatu tieto dielektrisyydestä ei kuitenkaan tue tätä, sillä kohteen PL4900 dielektrisyydet olivat alle 14 kaikilla syvyyksillä 10.10.2018. Myös datankäsittelytavan erilaisuus 10.10.2018 ja 22-25.10.2018 voisi selittää osan erosta. Tämä ei kuitenkaan voi selittää koko eroa. Toisaalta pystysiirtymäanturin asennustekniikka saattoi aiheuttaa eroja, kun jääkerros oli lähellä anturin yläpäättä, mutta tämäkin on epätodennäköistä.

Tien pinnan pystysiirtymät kasvoivat hieman siirryttäessä huhtikuun mittausviikolta kesäkuulle ja elokuulle. Näistä kolmesta mittausviikosta ensimmäisellä oli muita hieman pienempi päällysteen lämpötila, mutta muuten lämpötila oli todennäköisesti noin 15 astetta. Pystysiirtymien kasvun yksi mahdollinen selitystekijä oli roudan sulaminen. Huhtikuun mittausviikolla routa oli sulanut noin 0,8 m syvyydelle, kesäkuun mittausviikolla reilusti yli 1,1 m syvyydelle ja elokuussa routa oli sulanut kokonaan. Tätä teoriaa roudan sulamisen vaikutuksesta näille mittausviikoille vastustaa se, että kuva 60 osoittaa myös kantavan kerroksen kokoonpuristuman kasvaneen mittausviikoilla toukokuusta kesäkuulle ja elokuulle. Lisäksi tien pinnan pystysiirtymästä johtuu pääosin 0,8 m yläpuolella olevien kerrosten kokoonpuristumasta. Parempi selitys tien pinnan pystysiirtymien kasvulle on pystyjännityksen maksimiarvojen kasvu kantavassa kerroksessa. Pystyjännityksen maksimiarvojen kasvu johtuu todennäköisesti päällysteen lämpötilan kasvusta huhtikuulta kesäkuulle ja elokuulle. Myös erot mittausviikkojen liikennevirtojen välillä voivat selittää osan tien pinnan pystysiirtymien kasvusta.

Kuvassa 54 on esitetty tien pinnan pystysiirtymä siirtymäantureilla koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla mittauskohteella PL4900. Koekuormituspäivän 10.10.2018 sovitteet ovat tulkinnanvaraisia, joten sekä 1. että 2. akselin sovite on korvattu kahdella viivalla, jotka arvioivat sovitteen huipun korkeuden.

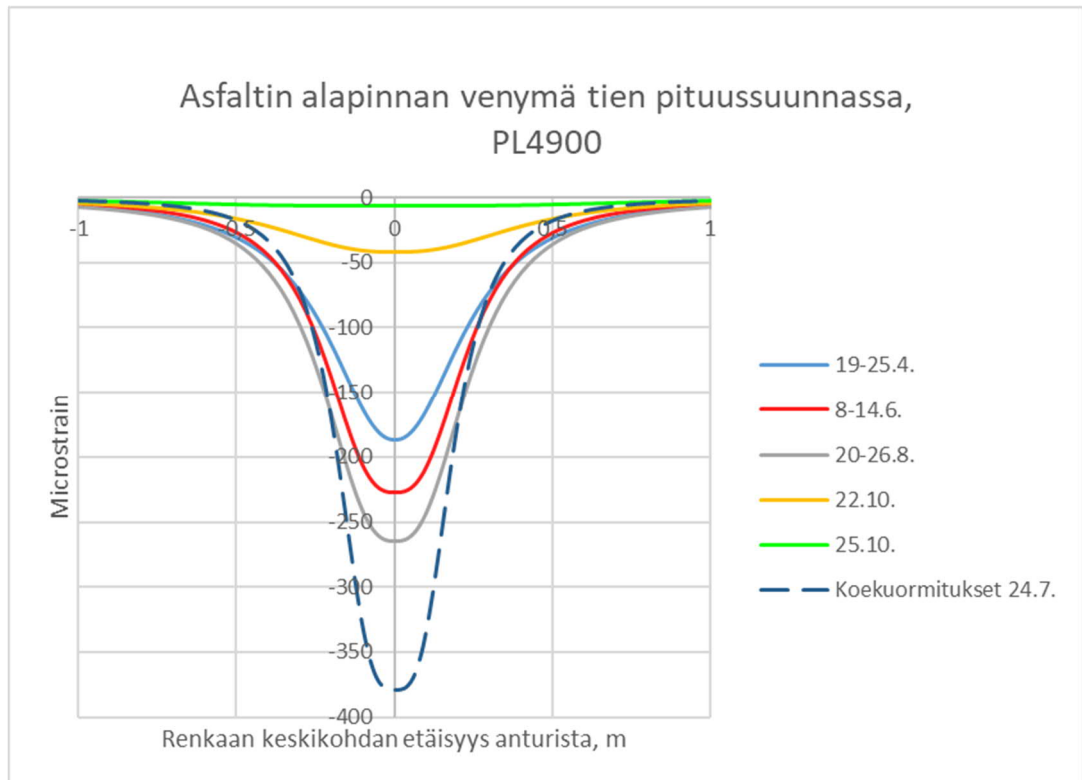


Kuva 54 Tien pinnan pystysiirtymä koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla. Mittauskohte PL4900.

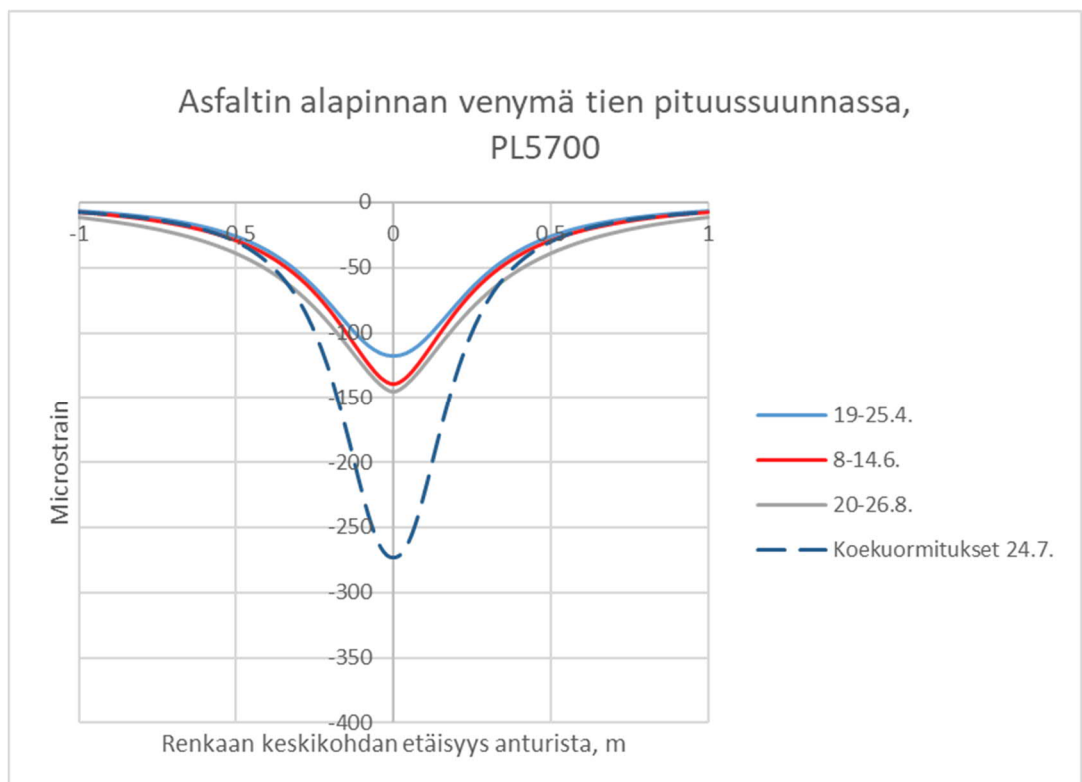
Koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin aiheuttamat pystysiirtymät näyttävät, että 1. akselin yksikköpyörä aiheutti saman suuruiset tai pienemmät tien pinnan pystysiirtymän maksimit kuin paripyörä. Vaikka 24.7.2018 koekuormitusten tuloksissa paripyörä aiheutti hieinan yksikköpyörää isomman siirtymän, niin yksikköpyörän aiheuttaman siirtymän voidaan arvioida olevan merkittävämpi suhteutettuna akselipainoon, sillä paripyörän akselipaino oli 1,5-kertainen yksikköpyörän akselipainoon nähden. Vastaavasti nähdään, että paripyörä aiheutti pystysiirtymiä kantavaan kerrokseen yksikköpyörää leveämmällä alueella.

4.3.3 Asfaltin alapinnan venymä

Kuvassa 55 on esitetty asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla mittauskohteella PL4900. Kuvassa 56 on esitetty asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla mittauskohteella PL5700.



Kuva 55 Asfaltin alapinnan venymän maksimi-arvo tien pituussuunnassa mitattuna standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900. Päälystepaksuus 90 mm.



Kuva 56 Asfaltin alapinnan venymän maksimi-arvo tien pituussuunnassa mitattuna standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700. Päälystepaksuus 120 mm.

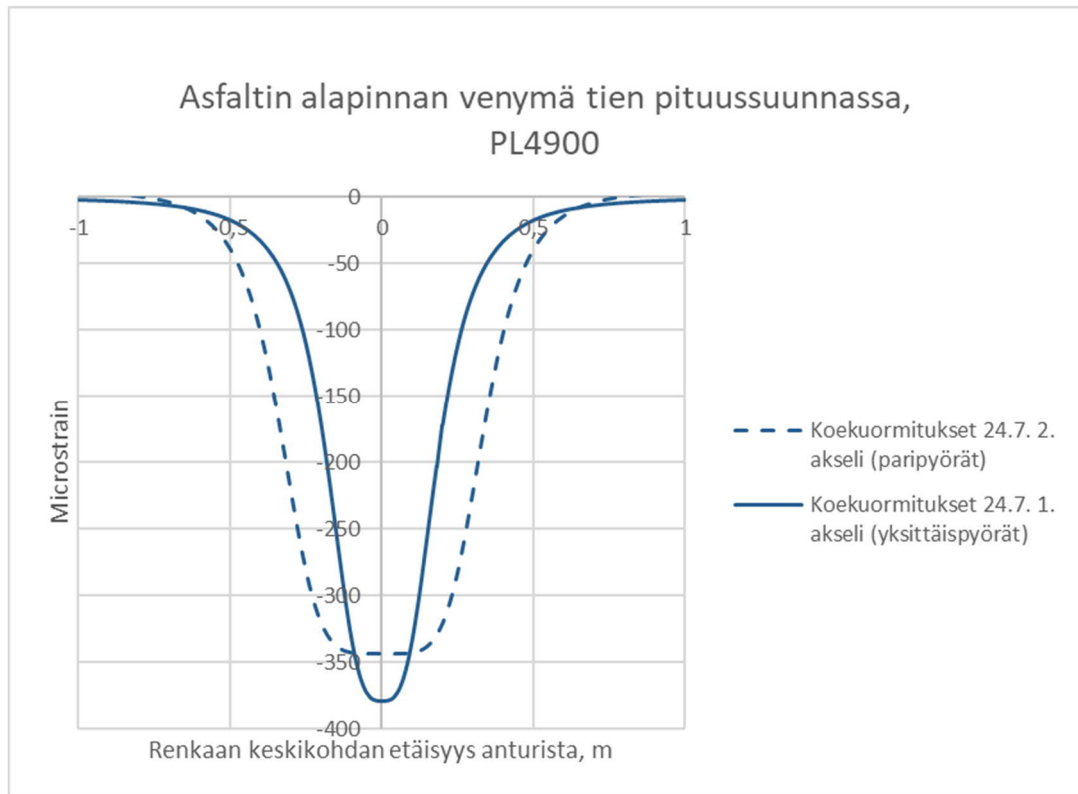
Päällysteen lämpötilan vaikutus näkyy selkeänä asfaltin alapinnan venymän kuvissa. Kuumen koekuormituspäivän 24.7.2018 aiheuttamat venymät olivat selkeästi suurempia kuin muiden tarkastelujaksojen. Päällysteen lämpötilan vaikutus oli huomattava asfaltin alapinnan tien pituussuuntaisen venymän muodostumiseen mittauskohteilla PL4900 ja PL5700. Päällysteen nuori ikä voi selittää osaltaan lämpötilan suurta vaikutusta.

Tulokset olivat sekavia 10.10.2018. Näistä tuloksista ei tehty sovitetta, sillä se olisi vaatinut paljon työtä ja sovite olisi silti jäänyt epävarmaksi.

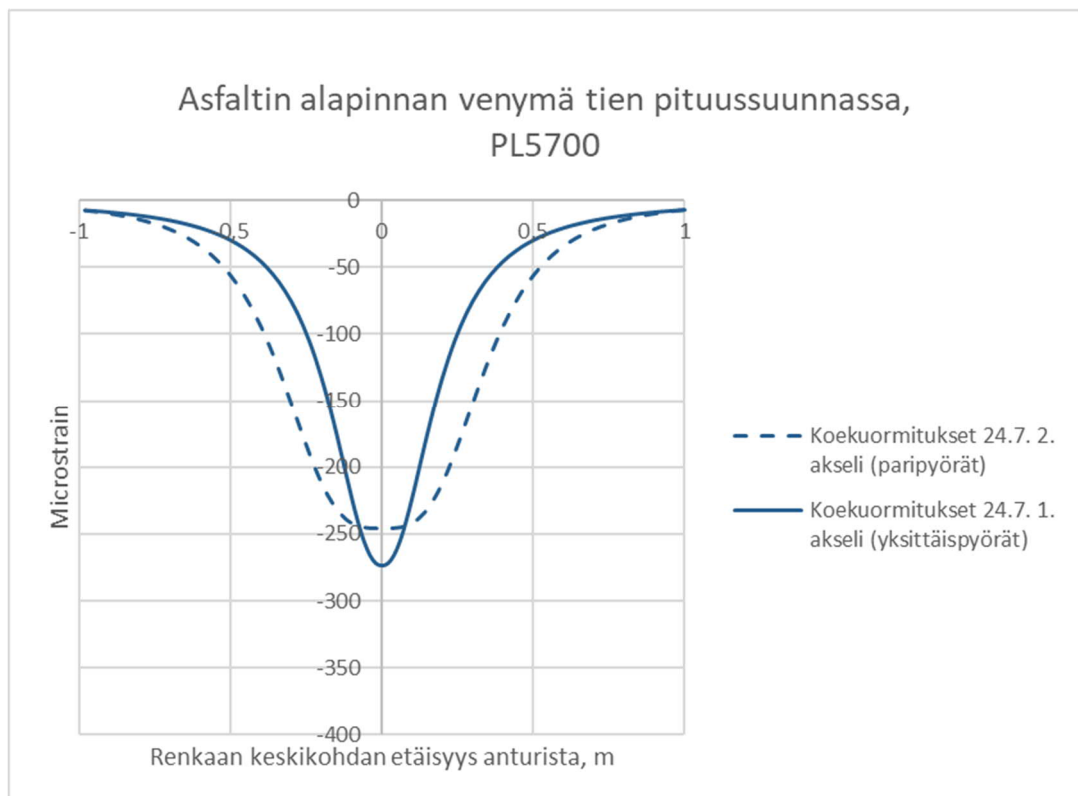
Vertailtaessa mittautuloksia 22.10.2018 ja 25.10.2018 huomataan roudan vaikutus. Routa tunkeutui 0,5 m syvyyteen. Tämä pienensi kolmessa päivässä asfaltin alapinnan tien pituussuuntaisen venymän pieneksi. Mittausdataa 12-18.12.2018 ei käsitelty sovitteeksi, sillä tulos olisi itsestään selvä, eli venymät olisivat jääneet mittaustarkkuutta pienemmiksi.

Asfaltin alapinnan tien pituussuuntaiset venymät kohteella PL4900 kasvoivat merkittävästi siirryttäessä huhtikuun mittausviikolta kesäkuulle ja elokuulle. Tätä eroa voivat selittää päällysteen alempi lämpötila huhtikuun mittausviikolla, erot mittausviikkojen liikennevirtojen välillä ja muutokset rakenteen kosteudessa ja jäätilanteessa.

Kuvassa 57 on esitetty asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla mittauskohteella PL4900. Mittauskohteen PL4900 2. akselin sovite on tehty silmämääräisesti luotettavan soviteen varmistamiseksi. Kuvassa 58 on esitetty asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla mittauskohteella PL5700. Koekuormituspäivän 10.10.2018 sovitteita ei tehty, sillä ne olisivat olleet epävarmoja ja vaatineet paljon työtä.



Kuva 57 Asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900. Päällystepaksuus 90 mm.

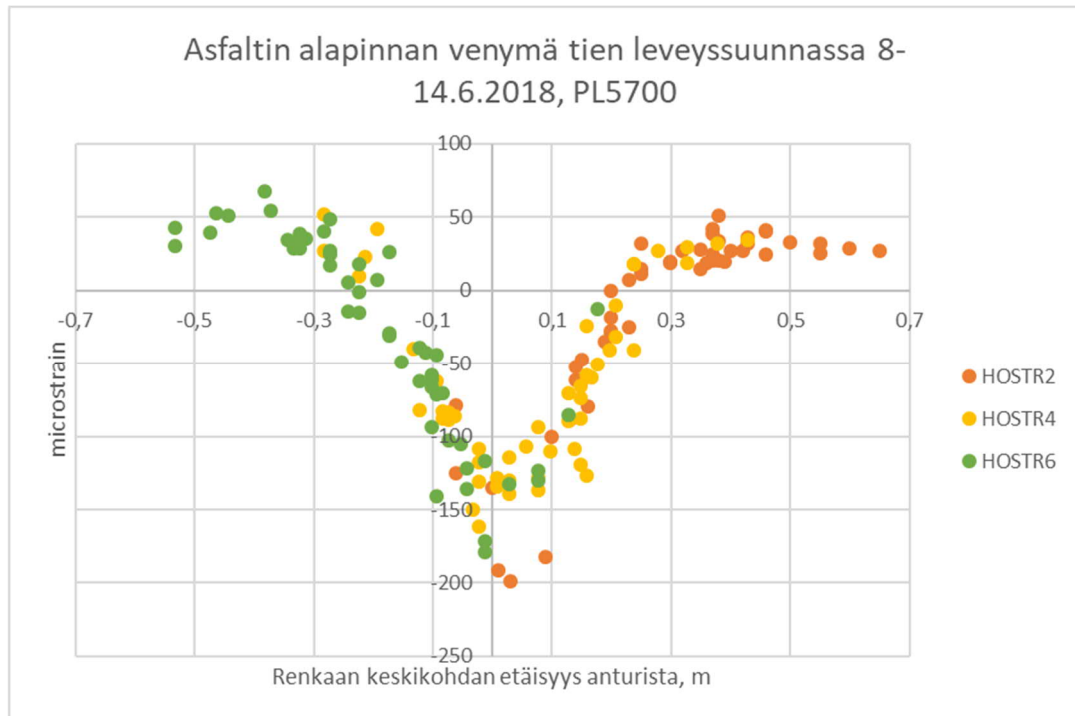


Kuva 58 Asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700. Päällystepaksuus 120 mm.

Koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin asfaltin alapinnan venymät tien pituussuunnassa näyttävät, että 1. akselin yksikköpyörä aiheutti suuremmat venymät kuin paripyörä.

Tämä on erityisen merkittävää, sillä paripyörän akselipaino oli heinäkuun koekuormituksissa 1,5-kertainen. Vastaavasti nähdään, että paripyörä aiheutti asfaltin alapintaan venymiä tien pituussuunnassa huomattavasti yksikköpyörää leveämmällä alueella.

Kuvassa 59 on esimerkki asfaltin alapinnan venymästä tien leveyssuunnassa mittausviikolla 8-14.6.2018 standardirekan 1. akselin kohdalla. Venymä on esitetty ilman sovitetta. Kuvasta näkyy sulan ajan tyypillinen asfaltin alapinnan venyminen renkaan alla sekä alapinnan puristuminen ajolinjan sivulla.



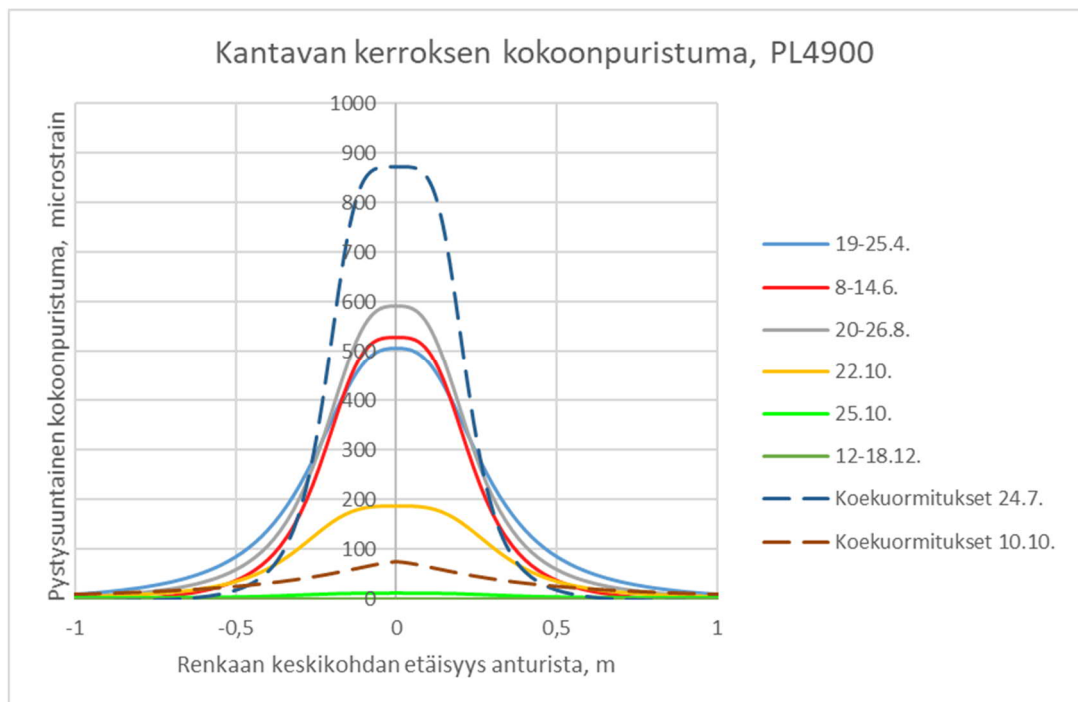
Kuva 59 Asfaltin alapinnan venymän maksimiarvo tien leveyssuunnassa mitattuna mittausviikolla 8-14.6.2018 standardirekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700.

4.3.4 Kantavan kerroksen pystysuuntainen kokoonpuristuma

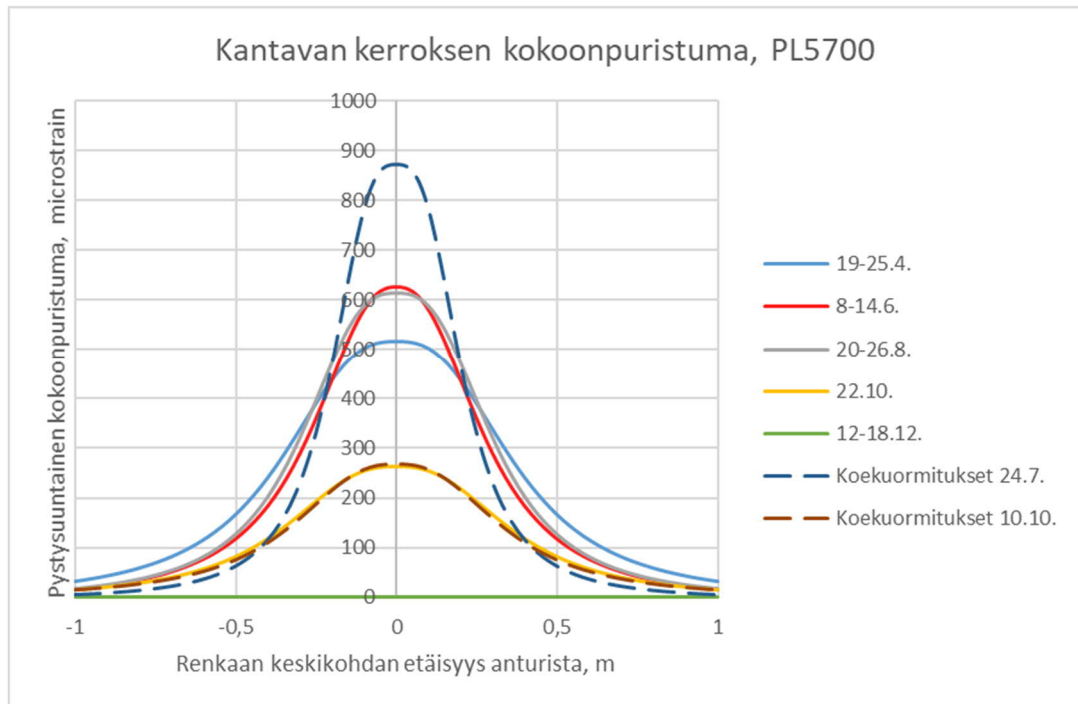
Kuvassa 60 on esitetty kantavan kerroksen kokoonpuristuma standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla mittauskohteella PL4900. Kuvassa 61 on esitetty kantavan kerroksen kokoonpuristuma standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla mittauskohteella PL5700. Kuvassa 61 oleva sovitte koekuormituksille 10.10.2018 on arvioitu silmämääräisesti.

Kohteiden PL4900 ja PL5700 kuvia 60 ja 61 vertaillen näkee, että kohteella PL4900 sovitteikäyrän huippu on selvästi leveämpi kuin kohteella PL5700. Tämä johtuu todennäköisesti pienestä virheestä kantavan kerroksen kokoonpuristuma-anturien sijainnin mittaamisessa. Kantavan kerroksen kokoonpuristuman sovitteiden huipun leveydessä on siis systemaattista virhettä. Virhe ei vaikuta sovitteen huipun korkeuteen. Sen sijaan

virhe saattaa hieman vaikuttaa sovitteen reunojen kulmakertoimeen, mutta silmämääräisesti tarkasteltuna kulmakertoimen virhe ei ole merkittävä. Ei ole selvää, kumman kohteen anturien sijaintimittaus on virheellinen. Ei siis ole mahdollista sanoa, kummassa kuvaajassa systemaattinen virhe esiintyy. Havaintoa systemaattisesta virheestä tukee se, että sovitteiden huippu on leveämpi kohteella PL4900, jossa on ohuempi päällyste. Ohuemman päällysteen takia kuormitus jakautuu huonommin ja sovitteen huipun pitäisi olla kapeampi kohteella PL4900 kuin kohteella PL5700. Systemaattinen virhe voi johtua mittausvirheen sijaan myös kokoonpuristuma-anturien sijoittelun eroista kohteiden välillä. Kohteen PL4900 anturit ovat lähempänä tien reunaa.



Kuva 60 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900. Päällystepaksuus 90 mm.



Kuva 61 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma standardirekan ja koekuormitusrekan 1. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700. Päälystepaksuus 120 mm.

Päälysteen lämpötilan vaikutus näkyy selkeänä kantavan kerroksen kokoonpuristuman kuvissa. Kuumen koekuormituspäivän 24.7.2018 aiheuttamat kokoonpuristumat olivat selkeästi suurempia kuin muiden tarkastelujaksojen. Päälysteen lämpötilan vaikutus oli huomattava kantavan kerroksen kokoonpuristuman muodostumiseen mittauskohteilla PL4900 ja PL5700. Päälysteen nuori ikä voi selittää osaltaan lämpötilan suurta vaikutusta.

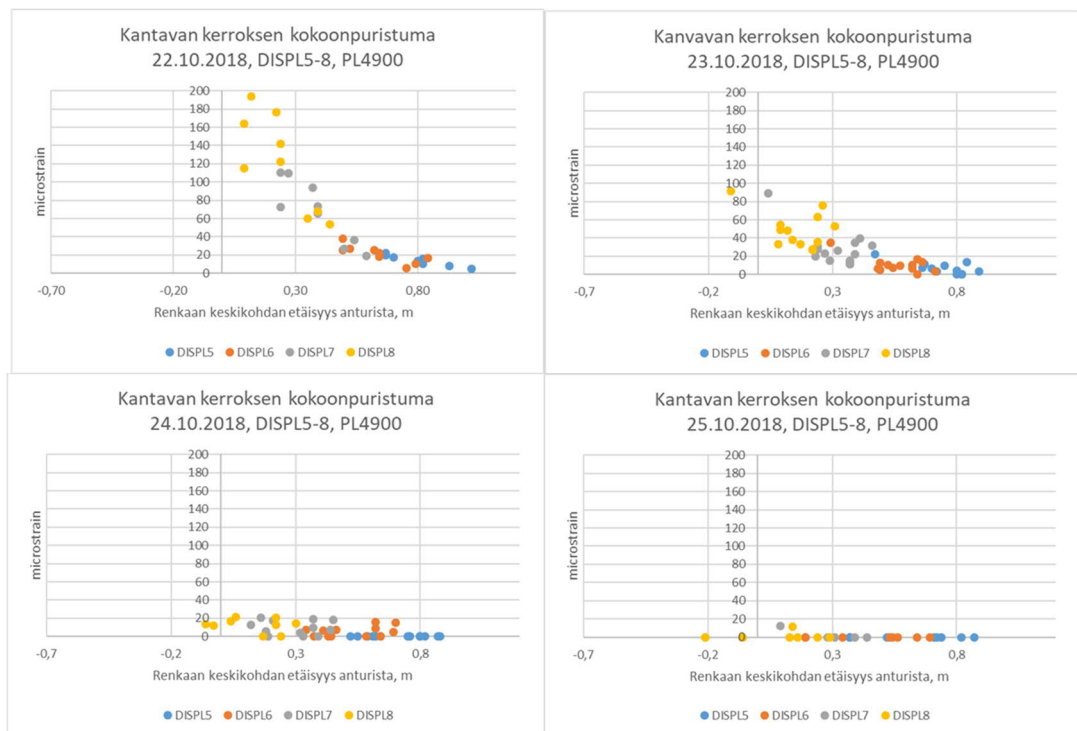
Vertailtaessa mittauksia 22.10.2018 ja 25.10.2018 huomataan jälleen roudan vaikutus. Roudan tunkeutuminen 0,5 m syvyyteen jäädettiin kantavan kerroksen. Tämä pienensi kolmessa päivässä kantavan kerroksen kokoonpuristuman mitättömäksi. Mittausviikolla 12-18.12.2018 kantavan kerroksen kokoonpuristumat olivat mittauksarkkuutta pienempiä. Näistä kolmesta kuvaajasta voidaan havainnoida roudan vaikutusta kantavan kerroksen kokoonpuristumiin.

Tulosten tulkinta 10.10.2018 koekuormituksista on haasteellista. Voidaan arvioida, että kantavassa kerroksessa oli jäätä jäätymis-sulamissyklin jäljiltä. Tämän takia kuivemmassa kohteessa PL4900 kantavan kerroksen kokoonpuristuma oli pienempi kuin 22.10.2018 mitattu kokoonpuristuma. Kohteessa PL5700 esiintyvä suurempi kantavan kerroksen kokoonpuristuma voi johtua kerroksessa esiintyvistä kosteudesta, joskaan percoaseman dielektrisyysmittaukset eivät tue tätä teoriaa.

Kantavan kerroksen kokoonpuristumat kasvoivat hieman siirryttäessä huhtikuun mittausviikolta kesäkuulle ja elokuulle. Näistä kolmesta mittausviikosta ensimmäisellä oli muita

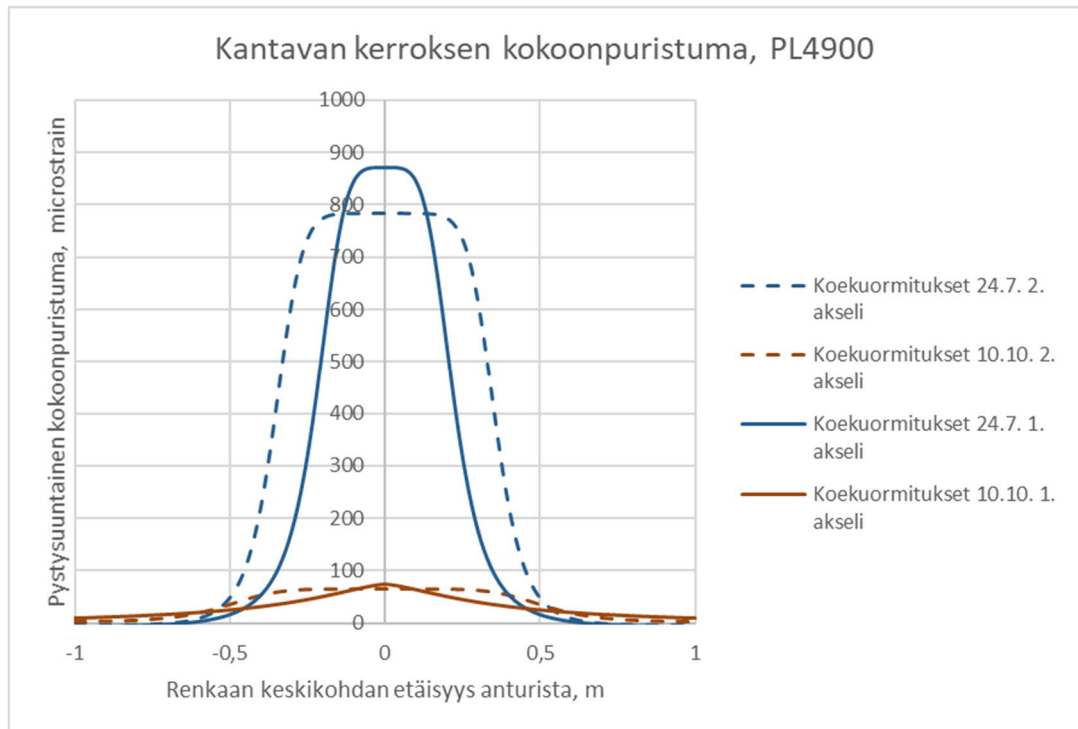
hieman pienempi päällysteen lämpötila, mutta muuten lämpötila oli noin 15 astetta. Kantavan kerroksen pienempi kokoonpuristuma huhtikuun mittausviikolla on yllättävää, sillä tällöin kantava kerros oli kosteampi ja kerroksessa olisi voinut alentuneen kantavuuden vuoksi olla suurempi kokoonpuristuma. Tätä kantavan kerroksen kokoonpuristumien kasvamista siirryttäessä huhtikuusta elokuulle voi selittää päällysteen alempi lämpötila huhtikuun mittausviikolla ja erot mittausviikkojen liikennevirtojen välillä.

Kuvassa 62 on esitetty jäätyneen vaikutus kantavan kerroksen kokoonpuristumaan 22-25.10.2018 mittauskohteella PL4900. Tänä aikana rakenne jäätynyt noin 0,5 m syvyyteen. Samalla kokoonpuristumat pienenevät kymmenesosaan 22.10.2018 tilanteesta. Kuvasta näkee kokoonpuristumien muuttumisen päivittäin. Kantavan kerroksen kokoonpuristumien pieneneminen oli nopeaa rakenteen jäätyessä. Sama ilmiö on havaittavissa asfaltin alapinnan venymäantureilla ja tien pinnan pystysiirtymäantureilla.

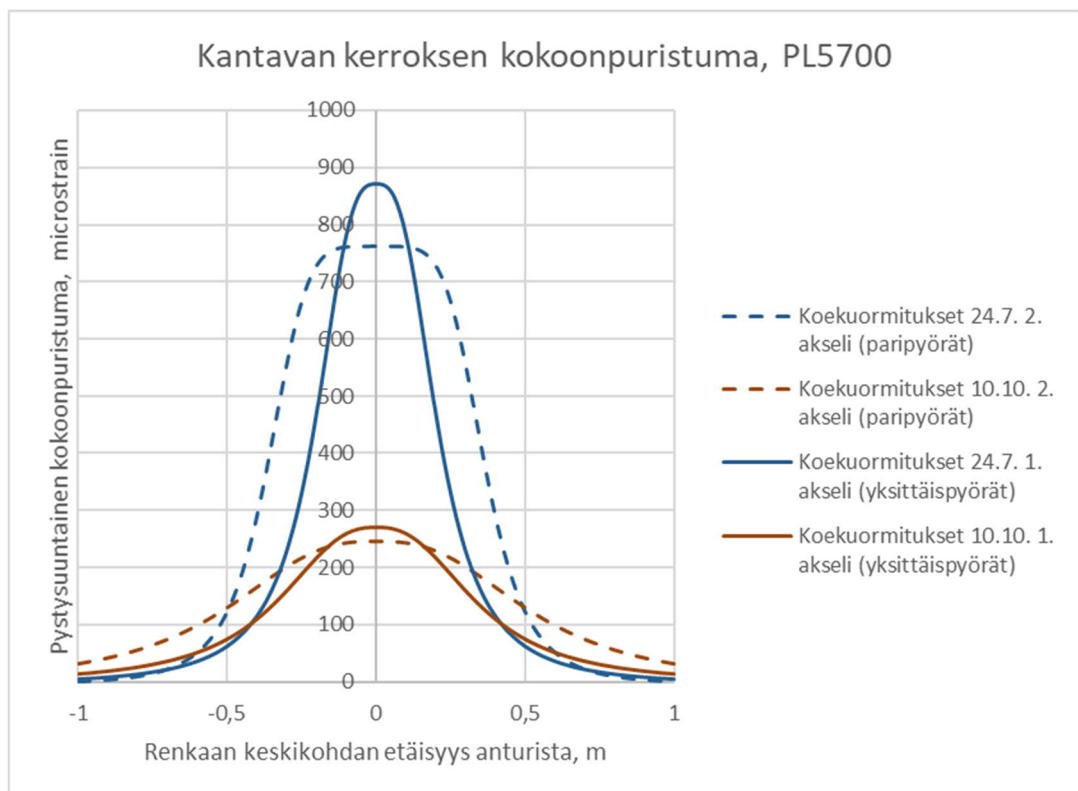


Kuva 62 Routaantumisen vaikutus kantavan kerroksen kokoonpuristumaan 22-25.10.2018. Mittauskohde PL4900.

Kuvassa 63 on esitetty kantavan kerroksen kokoonpuristuma koekuormitusrekan 1. ja 2. akseliin kohdalla mittauskohteella PL4900. Kuvassa 64 on esitetty kantavan kerroksen kokoonpuristuma koekuormitusrekan 1. ja 2. akseliin kohdalla mittauskohteella PL5700.



Kuva 63 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla. Mittauskohde PL4900.



Kuva 64 Kantavan kerroksen kokoonpuristuma koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kohdalla. Mittauskohde PL5700.

Koekuormitusrekan 1. ja 2. akselin kantavan kerroksen kokoonpuristumat näyttävät, että 1. akselin yksikköpyörä aiheutti suuremmat kokoonpuristumat koekohteen kantavan ker-

roksen rakenteeseen kuin paripyörä. Tämä on erityisen merkittävää, sillä paripyöräakselin akselipaino oli heinäkuun koekuormituksissa 1,5-kertainen ja lokakuun koekuormituksissa 1,3-kertainen verrattuna yksikköpyöräakseliin. Vastaavasti nähdään, että paripyörä aiheutti pystyjännityksiä kantavaan kerrokseen huomattavasti yksikköpyörää leveämmällä alueella.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Johtopäätökset tierakenteen käyttäytymisestä ja liikennekuormituksen vaikutuksesta tehtiin tierakenteen käyttäytymisen teoriaan ja kappaleen 4 mittaustuloksiin perustuen. Tutkimuksen molemmat mittauskohteet edustavat korkeapenkereistä, hyväkuntoista ja vahvaa tierakennetta, jonka päällystepaksuus on noin 0,1 m. Johtopäätökset ovat parhaiten sovellettavissa mittauskohteiden kaltaisille tierakenteille.

5.1 Tierakenteen käyttäytyminen eri vuodenaikoina

Jään vaikutus

Mittaustuloksista on selkeästi nähtävissä tierakenteen jäätyminen vaikutus. Kun routaan-tuneen rakennekerroksen paksuus kasvoi, pienivät kantavan kerroksen kokoonpuris-tumat, tien pinnan pystysiirtymät, pystykiihtyvyydet päällysteen pinnassa ja asfaltin ala-pinnan venymät. Maanpaineanturien mittaustulokset muuttuivat pääosin epäselviksi ra-kenteen jäätyessä. Koekuormituspäivän 10.10.2018 maanpaineanturien mittaustulok-sista kuitenkin nähdään, että kyseisenä päivänä osittain sulanut rakenne jakoi pystyjän-nityksiä sulaa rakennetta paremmin. Yhden vuorokauden aikana tapahtunut jäätyminen 22-23.10.2018 pienensi kantavan kerroksen kokoonpuristuman maksimiarvoja selkeästi. Mittauskohteilla tierakenne jäätynyt 22-25.10.2018 välisenä aikana sulan rakenteen tilan-teesta 0,5 m syvyydelle. Tämä muutti mitatut vasteet tierakenteen yläosassa pieniksi. Mittausviikolla 12-18.12.2018, kun rakenne oli jäänyt noin 1,0 m syvyydelle, vasteet olivat mitättömiä ja jopa mittaustarkkuutta pienempiä. Tästä voidaan päätellä, että jo muutaman kymmenen senttimetrin jääkerros rakenteen pintaosassa pienentää mitattuja vasteita jäätyneessä kerroksessa ja sen alapuolella.

Jäätymis-sulamissyklit, osittaiset sulamis-jäätymissyklit ja keväällä roudan sulaminen saavat aikaan tilanteita, joissa tierakenteen jäätyneen kerroksen yläpuolella on sulanut kerros sitomattomia rakennekerroksia. Koekuormituspäivän 10.10.2018 pystyjännity-santurien tuloksiin ja päättelyyn tukeutuen voidaan todeta, että jäätynyt kerros ei suojaa sen yläpuolella olevia sulia rakennekerroksia liikennekuormituksen rasituksilta. Jäätynyt rakennekerros myös estää veden virtaamisen itsensä lävitse, jolloin kyllästysaste sula-neessa rakennekerroksessa jäätyneen kerroksen yläpuolella voi nousta korkeaksi. Kyl-lästysasteen nousemista havaittiin koekohteiden percoasemien dielektrisyysmittauksilla keväällä ja jäätymis-sulamissykleissä. Tämä voi teoriassa aiheuttaa merkittävää kanta-vuuden heikkenemistä, vaikka kantavuuden heikkenemistä kosteuden vaikutuksesta ei tässä tutkimuksessa havaittu Tampereen yliopiston asentamalla antureilla mittausviikoilla

ja koekuormituspäivillä. Näistä asioista voidaan päätellä, että koekohteilla tierakenteen käyttäytymiseen vaikuttavat jäätyneen rakennekerroksen paksuus ja sijainti tierakenteessa.

Menettelytapaa, jossa sallitaan suuremmat akselipainot talvella, kun tierakenteen kuormituskestävyys on parempi, kutsutaan nimellä "winter-premium". Mittaustuloksien ja kappaleen 2.2.1 teorian perusteella arvioidaan, että winter-premium on mahdollinen ratkaisu sekä paksupäällysteisillä jykevärakenteisilla teillä, että ohutpäällysteisillä alempi-luokkaisilla teillä, kun tierakenne on pysyvästi jäässä. Ainakin kuivahko rakenne voi parhaimmillaan jäätyä muutamassa päivässä tarpeeksi syvälle winter-premiumin käyttöön-ottoon. Toisaalta sulamis-jäätymissykli tai osittainen jäätymis-sulamissykli voi nopeasti sulattaa kantavan kerroksen yläosan, jolloin winter-premiumin suuremmat akselipainot voivat vaurioittaa tierakennettä nopeasti. Winter-premiumin toimintaa on tässä käsitelty kriittisten jännitysten ja tierakenteen yläosan muodonmuutosten kautta. Winter-premiumin käyttökelpoisuutta pitäisi vielä tarkastella muidenkin tekijöiden, esimerkiksi siltojen sekä tierakenteen ja sen alla olevan pohjamaan stabiliteetin kannalta.

Päällysteen lämpötilan vaikutus

Mittaustulosten perusteella bitumilla sidotun päällysteen lämpötila vaikutti merkittävästi mittauskohteiden tierakenteiden toimintaan. Lämpötilan suurta vaikutusta voi selittää se, että päällyste oli vain vuoden vanhaa. Lämpötilan kasvaessa päällysteen jäykkyys aleni. Tällöin alempiin rakennekerrokseen välittyi suurempia pystyjännityksiä ja kantavan kerroksen kokoonpuristuman, tien pinnan pystysiirtymän sekä päällysteen alapinnan venymän maksimiarvot kasvoivat selkeästi. Kappaleessa 2.2.2 esitetty teoria tukee tätä ilmiötä. Mittaustuloksissa yllättävää oli, että heinäkuun kuuma koekuormituspäivä aiheutti selvästi suuremmat anturivasteiden maksimit kuin roudan sulamisen alkuvaihe, jolloin rakenteessa oli enemmän kosteutta. Tästä seuraa kysymys, että voivatko kesäkauden kuumat lämpökaudet aiheuttaa tierakenteen merkittävää vaurioitumista muutenkin kuin päällysteen deformaation muodossa.

Kosteuden vaikutus

Kappaleen 2.2.1 perusteella kosteus tierakenteessa voi aiheuttaa merkittävää kantavuuden alenemaa. Tarkastelluissa mittaustuloksissa ei kuitenkaan havaittu kosteuden merkittävää vaikutusta. Lokakuun koekuormituksista voidaan tarkoitushakuisesti tulkita sulan veden vaikuttavan tien pinnan pystysiirtymien kasvuun. Tämä tulkinta on mahdollinen, mutta epävarma. On todennäköistä, että kosteuden vaikutusta ei saatu mitattua tarkasteluajankohtien ja mittausanturien sijoittelun ja kantavan kerroksen materiaalin takia. Kosteuden vaikutus olisi todennäköisesti näkynyt olemassa olevilla antureilla heti

kantavan kerroksen sulamisen jälkeen 12-14.4.2018. Tällöin kantavan kerroksen kyllästysaste oli suurimmillaan. Dielektrisyysarvot kesä kautena pysyivät vakaina kesäkuun mittausviikolta lähtien. Kantavan kerroksen materiaalit olivat mahdollisesti myös erittäin hyvin kosteutta sietäviä, jolloin kosteuden muutos ei vaikuta herkästi kerroksen käyttäytymiseen. Lisäksi anturit sijaitsevat kantavassa kerroksessa, jolloin syvemmällä tapahtuvaa kosteuden aiheuttamaa kantavuuden heikkenemää ei voitu mitata.

Kantavan kerroksen urautuminen

Kantavan kerroksen urautuminen eli tyyppin 1 urautuminen voi teorian perusteella olla suuri riski tierakenteessa roudan sulamisen alkuvaiheessa. Mittausviikolla 19-25.4.2018 kantava kerros mittauskohteella PL5700 oli kokonaan sula ja sen kyllästysaste oli dielektrisyysmittausten perusteella huolestuttavan korkea. Kantavan kerroksen kokoonpuristuman, asfaltin alapinnan venymän ja pystyjännityksen maksimit olivat tällöin kuitenkin pienempiä kuin kesäkuun ja elokuun mittausviikoilla. Tästä voidaan päätellä, että huhtikuun mittausviikolla tyyppin 1 urautuminen ei ollut erityinen riski koekohteiden kantavissa kerroksissa, vaikka kohteella PL5700 oli kantavassa kerroksessa vielä korkea kyllästysaste. Riski tyyppin 1 urautumiselle saattoi olla suurimmillaan mittauskohteilla 12-14.4.2018, koska tällöin mitattiin selkeästi mittausviikkoja korkeammat kosteudet kantavista kerroksista.

Pohjamaan urautuminen

Pohjamaan urautumista eli tyyppin 2 urautumista ei ollut mahdollista mitata tässä tutkimuksessa, sillä asennetut anturit mittaavat rakenteen yläosan käyttäytymistä. Tarkastelujaksojen suurimmat tien pinnan pystysiirtymän maksimit mitattiin 24.7.2018 kuumana koekuormituspäivänä. Dielektrisyysmittausten perusteella suurimmat kosteudet rakennekerroksissa mitattiin kussakin rakennekerroksessa heti kerroksen sulamisen jälkeen. Näiden tietojen perusteella voidaan karkeasti arvioida, että suurin riski pohjamaan urautumiselle koekohteilla oli heti pohjamaan yläosan sulettua roudasta alkukesästä tai kun päällysteen lämpötila oli korkea kesällä. Joka tapauksessa näin vahvoilla rakenteilla tyyppin 2 urautuminen ei ole todennäköistä.

Kosteuden ja lämpötilan yhteisvaikutus

Voidaan arvioida, että joustavan päällysrakenteen omaavalla tierakenteella on heikko kuormituskestävyys, kun rakenne on märkä ja bitumilla sidotun päällysteen lämpötila on korkea. Tällainen tilanne voi esimerkiksi syntyä keväällä auringon paistaessa ja roudan sulaessa nopeasti. Tällöin päällysteen lämpötila nousee, vesi ei poistu nopeasti rakenteesta alapuolisen jäätyneen rakennekerroksen takia ja jäätynyt rakennekerros ei jousta

kuormituksen alla. Toinen tilanne, jossa kosteuden ja lämpötilan yhtäaikainen vaikutus voi syntyä, on huonosti kuivatettu tierakenne kuumalla auringonpaisteella.

5.2 Liikennekuormituksen vaikutus tierakenteen käyttäytymiseen

Yksikkö- ja paripyörän vertailu

Kappaleessa 2.3 esitetyn teoriakatsauksen perusteella tiedetään, että raskaat ajoneuvot ovat merkittävin tierakennetta vaurioittava liikennekuormitus. Raskaan ajoneuvon pyörätyypin vaikutusta mittauskohteilla tutkittiin vertailemalla koekuormitusrekan yksikköpyörän 385/65 ja paripyörän 315/80 vasteita tierakenteessa 24.7.2018 ja 10.10.2018. Tässä tutkimuksessa ei käsitelty 445-495 mm levyisiä yksikköpyöriä.

Kappaleessa 4.3 koekuormituksista esitettyihin tuloksiin vaikuttivat rengaspaineet, joita ei tiedetä. Rengaspaineet ohjaavassa yksikköpyörässä olivat todennäköisesti suurempia kuin 2. akselin paripyörässä. Tämä suurensi osaltaan yksikköpyörän aiheuttamia vasteita, kuten kappaleessa 2.3.3 esitetään, jos oletus yksikköpyörän suuremmista rengaspaineista pitää paikkaansa.

Kappaleessa 4.3 esitettyjen tulosten perusteella tiedetään, että yksikköpyörä aiheutti paripyörää suurempia kantavan kerroksen kokoonpuristumia, asfaltin alapinnan venymiä ja pystyjännityksiä kantavassa kerroksessa kuin paripyörä. Tämä on merkittävää, sillä paripyöräakselin akselipaino oli yksikköpyöräakseliin verrattuna 1,5-kertainen 24.7.2018 ja 1,3-kertainen 10.10.2018. Toisaalta yksikköpyörän aiheuttama vaste on tierakenteessa kapeampi. Näiden perusteella arvioidaan, että yksikköpyörä aiheuttaa paripyörää enemmän päällysteen alapinnan halkeilua ja tyyppin 1 urautumista. Mittaustulosten perusteella yksikköpyörä aiheuttaa paripyörää suuremmat kriittiset jännitykset kantavan kerroksen yläosaan ja asfaltin alapintaan.

Kappaleessa 4.3 esitettyjen tulosten perusteella tiedetään, että tien pinnan pystysiirtymän maksimi oli yksikköpyörällä pienempi tai yhtä suuri kuin paripyörällä. Taulukon 7 perusteella tiedetään, että koekuormitusrekan paripyöräakselin akselipainot olivat huomattavasti yksikköpyöräakselin akselipainoja suurempia. Tämä huomioiden voidaan arvioida, että yksikköpyörä aiheuttaisi koekohteilla paripyörää suurempia tien pinnan pystysiirtymiä, jos yksikköpyörän akselipaino olisi sama kuin paripyörällä. Tarkka arviointi yksikköpyörän ja paripyörän välillä on kuitenkin vaikeaa akselipainoeron takia. Arviointia vaikeuttaa myös se, että akselipainon jakautumisesta akselin eri puolille ei ole tietoa.

Edellisten kappaleiden perusteella koekohteilla yksikköpyörä vaurioitti tierakenteen päällystettä ja kantavaa kerrosta paripyörää enemmän. Nastarengaskulutus on rajattu tämän

tarkastelun ulkopuolelle. Kappaleessa 2.1.2 esitetyn teorian perusteella tiedetään, että pyöräkuormitus jakautuu tierakenteessa sitä laajemmalle, mitä syvemmällä tierakennetta tarkastellaan. Tämän seurauksena pari- ja yksikköpyörän kuormituksessa on sitä enemmän eroa, mitä ylempänä tierakennetta tarkastellaan.

Peräkkäisten akselien vaikutus

Peräkkäisten akselien vaikutusta mittauskohteiden tierakenteeseen ei ollut tämän tutkimuksen yhteydessä mielekäästä tutkia. Mittauskohteet ylittävien raskaiden ajoneuvojen ominaisuuksien vaihtelu on merkittävää varsinkin muilla kuin 1. akselilla. Nämä erot ylityksissä ja jykevä tierakenne olisivat tehneet luotettavan akselimäärän vaikutuksen tutkimisen erittäin hankalaksi ja työlääksi.

5.3 Muut havainnot

Alusrakenteen vaikutus

Mittauskohteiden alusrakenteilla ei tässä tutkimuksessa havaittu olevan oleellista vaikutusta koekohteiden tierakenteen käyttäytymiseen. Tierakenteen korkea pengeri vähensi pohjamaan vaikutusta tierakenteen yläosan käyttäytymiseen. Päälysteen paksuuden, anturien sijainnin ja roudan syvyyden erot mittauskohteiden välillä vaikuttivat merkittävästi mittaustuloksiin, jolloin mahdollinen alusrakenteen vaikutus jäi muiden tekijöiden takia huomaamatta.

Mittausdatan käsittelyn automatisointi

Automaattiset mittaukset ovat tuottaneet erittäin paljon mittausdataa. Siitä olisi löydettävissä merkittäviä mittaustuloksia. Mittausdatan laajempi analysointi käsityönä ei ole järkevää. Datan käsittelyn automatisointi on suositeltavaa, jos suuresta mittausdatamäärästä halutaan tuottaa yhteenvetoja järkevästi.

5.4 Jatkotutkimusmahdollisuudet

Kappaleessa 4.1.3 on esitelty ajoneuvon pyörätyypin ja ajolinjan selvittäminen kiihtyvyyssanturien avulla. Jokaisesta ajoneuvon ylityksestä olisi mahdollista selvittää akselimäärä, ajonopeus, tunnistaa pari- ja yksikköpyörät sekä selvittää jokaisen pyörän ajolinjan. Tämän perusteella olisi mahdollista laskea mitatulle ajoneuvolle sallittu kokonaispaino sekä sallitut akselipainot akselikohtaisesti. Myös ajoneuvojen käyttämien rengastuksien tilastointi olisi mahdollista. Ilman kiihtyvyyssanturidatan käsittelyn automatisointia nämä menetelmät ovat hitaita. Menetelmät ovat automatisoitavissa, ja tämä mahdollistaisi suuren tietomäärän keräämisen ajoneuvojen ajokäyttäytymisestä, akselimäärästä ja

rengastuksista. Kiihtyvyyssanturit asennetaan päällysteen pintakerrokseen, joten mittauskohteiden rakentaminen olisi yksinkertaista ja nopeaa.

Päällysteen lämpötilan merkitys oli yllättävän suuri kesäkauden mittaustuloksia tulkittaessa. Lämpötila vaikuttaa päällysteen jäykkyyteen ja haurauteen. Herää kysymys, millaisia lämpötiloja päällysteessä esiintyy sulamisjäätymis- ja jäätymissulamissykliin sulamisvaiheissa sekä keväällä roudan sulamisen alkuvaiheessa. Tätä tietoa voisi hyödyntää sen arvioimiseen, kuinka merkittäviä jäätymis-sulamis- ja sulamis-jäätymissykliit ovat tien vaurioitumiselle verrattuna kevään roudan sulamisen alkuvaiheeseen.

Päällysteen lämpötila oli mittauskohteilla mitatuilla suureilla merkittävämpi tekijä tierakenteen käyttäytymiselle kuin vesi tierakenteessa. Tästä seuraa luonnollisesti kysymys, että voivatko kesäkauden kuumat lämpökaudet aiheuttaa tierakenteen merkittävää vaurioitumista muutenkin kuin päällysteen deformaation muodossa. Toinen kysymys on, miten ikääntyminen vaikuttaa päällysteen jäykkyyden lämpötilariippuvuuteen.

Maanpaineanturien käyttäytymisessä oli epäselvyyttä jäätyvissä, jäätyneissä ja sulavissa tien rakennekerroksissa. Maanpaineanturien käyttäytymisen tutkiminen näissä olosuhteissa lisäisi varmuutta maanpaineanturitulosten tulkintaan tulevilla projekteilla. Tutkimuksen lähtöaineistona voisi käyttää Tampereen yliopiston tässä tutkimuksessa tuottamaa avointa dataa.

Uudemman sukupolven 445-495 mm levyisiä yksikköpyöriä ei käsitelty tässä tutkimuksessa. Kappaleen 2.3.3 teoriakatsauksen perusteella nämä leveät yksikköpyörät vaurioittavat tierakennetta selvästi vähemmän kuin perinteiset yksikköpyörät. Herää kysymys, ovatko leveät yksikköpyörät vai paripyörät kokonaisuutta ajatellen parempi vaihtoehto. Vertailussa tulee huomioida taloudellisuus, kuormitusvaikutus ja ympäristönäkökohdat.

6. YHTEENVETO

Tampereen yliopisto asensi kattavat rakenneinstrumentoinnit kahdelle mittauskohteelle Muonioon vt21 Aurora-älyliikennetielle kesällä 2017. Tampereen yliopisto mittaa liikennevirrasta automaattisesti tien pinnan pystysiirtymiä, päällysteen pystykiihtyvyyksiä, asfaltin alapinnan venymiä ja kantavan kerroksen kokoonpuristumia sekä pystyjännityksiä. Mittausten avulla on mahdollista tarkastella tierakenteen käyttäytymistä ajoneuvo- ja akselikohtaisesti vuoden ympäri. Mittausten ylläpitosopimus päättyy 30.6.2020. Mittausdata on saatavilla avoimena datana Väyläviraston palvelimella.

Mittaukset tuottivat paljon tietoa liikennekuormituksen vaikutuksesta tierakenteeseen eri vuodenaikoina. Mittauskohteiden paksupäällysteisellä ja hyväkuntoisella tiellä esiintyivät tyypilliset olosuhteiden vaihtelut vuodenajoin. Tierakenteessa vallitsevat olosuhteet selvitettiin Roadscanners Oy:n asentamien Percoasemien avulla.

Olosuhteiden vaihtelun merkitystä tutkittiin vertailemalla standardirekkojen etuakseliin aiheuttamia vasteita eri vuodenaikoina. Standardirekka oli tässä tutkimuksessa yli 40 tn painava 6-akselinen rekka, jossa on ohjaava etuakseli, 2-akselinen teli ja 3-akselinen teli. Yksikkö- ja paripyöräasennuksen vaikutusta tierakenteeseen vertailtiin kahden koekuormituspäivän koekuormitusrekan ensimmäisen ja toisen akselin vasteita vertailemalla.

Tämän diplomityön painopiste oli kenttämittausten dokumentoinnissa, mittausdatan käsittelyssä ja mittaustulosten analysoinnissa. Mittaustulokset olivat pääosin järkeviä ja niistä löytyi vastauksia Väylävirastolle tehdyssä tutkimuspalvelusuunnitelmassa esitettyihin kysymyksiin. Mittaustuloksien käsittely tuotti hyviä esimerkkikuvia pyöräkuormituksen vaikutuksesta tierakenteeseen eri vuodenaikoina. Kaikkiin kysymyksiin ei kuitenkaan saatu vastauksia mittaustuloksista, kuten esimerkiksi kysymyksiin peräkkäisten akselien vaikutuksesta ja pohjamaan urautumisesta. Mittaustuloksista löytyi yllättäviä mutta selitettävissä olevia asioita, kuten päällysteen lämpötilan oletettua suurempi vaikutus kriittisiin rasituksiin ja se, että merkittävää kosteuden aiheuttamaa kuormituskestävyyden alenemaa ei tällä kohteella havaittu.

Mittaustuloksien ja teorian perusteella tehtiin seuraavia johtopäätöksiä:

- Mittaustulosten perusteella mittauskohteilla tierakenteen käyttäytymiseen vaikuttivat liikennekuormituksen laatu, päällysteen paksuus, päällysteen lämpötila sekä jäätyneen kerroksen paksuus ja sijainti tierakenteessa. Kosteudella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta mittaustulosten perusteella, mutta teorian perusteella tiedetään, että oikeissa olosuhteissa sen vaikutus on merkittävä.

- Merkittävin ero mittauskohteiden rakenteissa oli todennäköisesti päällystepaksuus. Kohteen PL5700 anturien kohdalla se oli 120 mm ja kohteella PL4900 90 mm. Teoriaosuuden perusteella arvioidaan, että merkittävin kriittinen rasitus tällaiselle melko paksupäällysteiselle tielle on asfaltin alapinnan venymä.
- Lämpötilan nousu pienentää bitumilla sidotun päällysteen jäykkyyttä merkittävästi. Heinäkuun kuuma koekuormituspäivä aiheutti mittauskohteilla selvästi suuremmat liikennekuormituksesta aiheutuvat tien pinnan pystysiirtymät, muodonmuutokset ja kriittiset rasitukset kuin roudan sulamisen alkuvaihe, vaikka roudan sulamisvaiheessa rakenteessa oli enemmän kosteutta. Lämpötilaherkkyyttä voi selittää osaltaan se, että päällyste oli noin vuoden ikäinen.
- Kosteudella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta tierakenteen käyttäytymiseen mittauskohteilla. Tämä johtuu todennäköisesti tarkasteluajankohtien sijoittumisesta, paksusta päällysteestä ja kantavan kerroksen murskeen kosteuden sietokyvystä. Roudan sulamisen alkuvaiheen tarkasteluajankohta myöhästyi ajankohdasta, jolloin kantavassa kerroksessa oli suurin kosteuspitoisuus. Teoriaosuuden perusteella tiedetään, että oikeissa olosuhteissa kosteuden vaikutus on merkittävä.
- Kantavan kerroksen urautumisriskin nousua ei havaittu roudan sulamisen alkuvaiheessa mittauskohteilla. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että tarkasteluajankohta myöhästyi ajankohdasta, jolloin kantavassa kerroksessa oli suurin kosteuspitoisuus. Tämän lisäksi kantavan kerroksen murske on todennäköisesti hyvin kosteutta sietävää ja tie on paksupäällysteinen. Teoriaosuuden perusteella tiedetään, että kantavan kerroksen urautuminen voi olla merkittävää roudan sulamisen alkuvaiheessa.
- Tutkimuksen perusteella voidaan arvioida, että joustavalla päällysrakenteella on todennäköisesti heikoin kuormituskestävyys silloin, kun päällysteen lämpötila on korkea ja rakenteessa on riittävästi vettä. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi keväällä rakenteen sulaessa nopeasti tai kesällä jos tierakenne on huonosti kuivattu.
- Tierakenteen jäätyminen 0,3-0,5 m syvyydelle pienensi mittauskohteilla liikennekuormituksen aiheuttamia tien pinnan pystysiirtymiä, pystyjännityksiä, asfaltin alapinnan venymiä ja kantavan kerroksen muodonmuutoksia merkittävästi. Teoriaosuus tukee havaintoa.
- Jäätynyt tierakennekerros sulan kerroksen alapuolella ei vähennä liikennekuormituksen aiheuttamia pystyjännityksiä ja sitomattomien kerrosten kokoonpuristumia jäätyneen kerroksen yläpuolella.
- Arvioidaan, että winter-premium eli suurempien akselipainojen salliminen talvella on tierakenteen kannalta mahdollinen ratkaisu, kun rakenne on pysyvästi jäässä. Esimerkiksi sulamis-jäätymissyklit yhdistettynä winter-premiumin suurempiin akselipainoihin voisivat kuitenkin mahdollisesti vaurioittaa tierakennettä nopeasti.
- Yksikköpyörää 385/65 ja paripyörää 315/80 mittauskohteilla vertailtaessa havaittiin, että yksikköpyörä rasittaa tierakenteen yläosaa paripyörää enemmän. Teoriaosuus tukee havaintoa.
- Teoriaosuuden perusteella uuden sukupolven 445-490 mm leveät yksikköpyörät vaurioittavat tierakennettä selvästi vähemmän kuin kapeammat yksikköpyörät mutta ovat hieman paripyöräasennusta vahingollisempia tierakenteelle.
- Teoriaosuuden perusteella on viitteitä siitä, että itseohjautuvien ajoneuvojen ajo-elinjojen vaihtelua suunnitteleamalla voisi vähentää tierakenteelle aiheutuvia vaurioita verrattuna ihmisen ohjaamiin ajoneuvoihin.

Teoriaosuus sisältää pääosin jo pitkään tunnettua yleistietoa tierakenteen toiminnasta ja liikennekuormituksen vaikutuksesta. Ajolinjaa, rengastyyppejä ja lyhyen aikavälin liikennekuormitushistoriaa käsittelevät teoriaosuudet sisältävät uudempia ja merkittäviä havaintoja sekä tutkimustuloksia.

Tutkimuksessa tuotettua avointa dataa ja diplomityössä tuotettuja mittaustuloksia sekä johtopäätöksiä on mahdollista jalostaa ja käyttää tulevissa tutkimuksissa. Diplomityön johtopäätöksiä voidaan pitää suhteellisen luotettavina. Mittausdatan erittäin suuri määrä mahdollistaa kuitenkin paljon tätä diplomityötä laajemman tutkimuksen ja analyysin.

Tämän diplomityön tekemisen yhteydessä löytyi useita mahdollisia jatkotutkimusaiheita. Hyödyllisiä tutkimuskohteita voisivat esimerkiksi olla:

- 445-490 mm leveiden yksikköpyörien vertailu paripyöreasennukseen tierakenteen vaurioituminen, taloudellisuus ja ympäristönäkökohdat huomioiden.
- Päällysteen lämpötilan vaikutuksen arviointi tierakenteen vaurioitumiskäyttäytymiseen kuumana kesä kautena, roudan sulamisen alkuvaiheessa ja talven sulamisjäätymis- ja jäätymissulamissykleissä.
- Sulamisjäätymis- ja jäätymissulamissykliä aiheuttaman kuormituskestävyyden aleneman merkitys winter-premiumille.

LÄHTEET

- Akkanen, A. (2018). Valokuva standardirekasta 19.4.2018 mittauskohteella PL5700
- Belt, J. Lämsä, V. P. Liimatta, L. Ehrola, E. (2000). Kevytpäällysteteiden vauriomallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet. Tielaitoksen selvityksiä 18/2000. Helsinki. 106 s.
- Belt, J. Lämsä, V. P. Savolainen, M. Ehrola, E. (2002). Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto. Tiehallinnon selvityksiä 15/2002. Helsinki. 74 s.
- Belt, J. & Kolisoja, P. & Alatyttö, V. & Valtonen, J. (2006) Tierakenteen rappeutuminen ja kunnan ennustaminen. Oulun yliopiston rakentamisteknologian tutkimusryhmän julkaisu 2. 43 s. ISBN 951-42-8052-0
- Chen, F. & Song, M. & Ma, X & Zhy, X. (2019). Assess the impacts of different autonomous trucks' lateral control modes on asphalt pavement performance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 103, Issue 0, 2019, pp 17-29.
- Dawson, A. et al. (2009). *Water in Road Structures. Movement, Drainage and Effects*. Volume 5. Edited by: Dawson. Springer Science+Business Media B. V. UK. 454 s. ISBN: 978-1-4020-8561-1.
- Dessouky, S & Al-Qadi, I & Jun Yoo, P. (2013). Full-depth flexible pavement responses to different truck tyre geometry configurations. *International Journal of Pavement Engineering*, 2014. Vol. 15, No. 6, 512-520.
- Ehrola, E. (1996). *Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet*. Helsinki, Suomi: Rakennustieto Oy. 365 s. ISBN 951-682-338-6
- Haakana, V. (2014). *Raskaiden ajoneuvojen rengastuksen vaikutus tierasitukseen*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere, Suomi. 89 s.
- Hjort, M. & Haraldsson, M & Jansen, J.M. (2008) *Road Wear from Heavy Vehicles – an overview*. Report nr. 08/2008. Nordiska Vägtekniska Rörbundet committee Vehicles and Transports. 45 s. ISSN: 0347-2485
- Huang, Y. (2012). *Pavement analysis and design, second edition*. London, Pearson Education LTD. 2012. 760 s. ISBN-13: 978-0-13-272610-8
- Kalliainen, A. (2019). *Infra Challenge – Loppuraportti: osatehtävät 2a, 5b*. Luonnos. Liikennevirasto. 191 s.
- Kalliainen, A. (2018a). Sähköposti 1.8.2018
- Kalliainen, A. (2018b). Sähköposti 28.3.2018.
- Kulauzovic, B. (2018). *ANALYSIS REPORT: Bridge WIM (Weih-in-motion) Measurements for E8-Aurora project*. Cestel. June 2018. 24 s.
- L. Al-Qadi, Imad & A. Hernandez, Jaime & Gamez, Angeli & Ziyadi, Mojtaba & Gungor, Osman Erman & Kang, Seunggu. (2018). *Impact of Wide-Base Tires on Pavements: A*

- National Study. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 036119811875796. 10.1177/0361198118757969.
- Liikennevirasto. (2018). Tierakenteen suunnittelu 28.11.2018. Liikennevirasto. 139 s. https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf
- Luomala, H. (2019) Monitoring the Vertical Deformation Behavior of Road and Railway Structures. Tampere University Dissertations 81. Academic dissertation. Tampere University, Faculty of Built Environment. Tampere 2019. 153 s. ISBN 978-952-03-1134-6
- Mallick, R. B. & El-Korchi, T. (2013) Pavement engineering: principles and practice. Boca Raton, FL: Taylor & Francis 2013. 666 s. ISBN 978-1-4398-7035-8
- Mäki, V. (2017). Traffic Speed Deflectometer- tekniikan käyttö tierakenteiden diagnostiikassa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere, Suomi. 130 s.
- OECD. (1988). Road transport research: heavy trucks, climate and pavement damage. Paris, OECD cop. 1988. 175 s. ISBN 92-64-13150-7
- OECD. (1998). Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (DIVINE). Technical report. 151 s.
- PANK ry. (2017). Asfalttinormit 2017. Helsinki, Suomi. 122 s. ISBN 978-952-99985-2-4
- Rahiala, J. (1988). Maabetoni ja betonipäällysteet ... käytössä maailmalla sopivatko Suomeen?. Rakennusaineteollisuusyhdistys, Tie- ja vesirakennushallitus. 287 s.
- Roadex E-Learning. (2014). Verkkojulkaisu. [Viitattu 26.4.2019] Saatavissa: <https://www.roadex.org/e-learning/>
- Roadscanners. (2017). Tutkimuspalvelusuunnitelma: Aurora / Intelligent Asset Management. 5.5.2017
- Saarenketo, T. & Pääkkö, J. (2018a). Lapin Percoasemien seurantaraportti, 21.6.2018
- Saarenketo, T. & Pääkkö, J. (2018b). Lapin Percoasemien seurantaraportti, 17.10.2018
- Saarenketo, T. & Pääkkö, J. (2018c). Lapin Percoasemien seurantaraportti, 20.12.2018
- Tiehallinto. (2004). Tietoa tiensuunnitteluun nro 71C. Tiehallinto, tie- ja geotekniikka. 9 s.
- TRB OF NATIONAL ACADEMIES. (2004). Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing. A Synthesis of Highway Practice. NCHRP SYNTHESIS 325. COOPERATIVE HIGHWAY PROGRAM. ISBN 0-309-06974-2
- Ullidtz, P. (1987). Pavement analysis. Amsterdam: Elsevier 1987. 318 s. ISBN 0-444-42817-8
- Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta. (2019). 10.1.2019 1257/1992. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190031>
- Varin, P. (2017). Valokuvat mittauskohteilta 29.6.2017

Vuorimies, N., Kalliainen, A., Rossi, J. Kurki, A. Kolisoja, P. Varin, P. & Saarenketo, T. (2018) Liikenneviraston julkaisuja ja selvityksiä 63/2018: Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015-2017. Liikennevirasto. 132 s.

Zhou, F. & Hu, S. & Yangwoo, K. & Damnjanovis, I. & Talebpour, A. & Espejo, A. (2019). Optimization of Lateral Wandering of Automated Vehicles to Reduce Hydroplaning Potential and to Improve Pavement Life. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Issue 0, 2019. ISSN: 0361-1981.

LIITE A: KOEKUORMITUSAJONEUVOJEN TIEDOT

Muonion rekka-ajot 10.10.2018: 9-aks rekka (4+5)

Nuppiin lastattiin 19,83 tn ja kärryyn 29,50 tn.

Rekkatiedot; painot katsottu tasaisella tiealueella noin klo 10:10 ja 11:50

s	p	p	s		p	p	p	p	s	single- vai paripyörä
8,00	10,5	8,8-8,9	8,2-8,3		peräkärry 29,5+9,86 = 39,36 tn					punnittu / mitattu tn
		peräkärryn akseleiden arvio?			8,2	8,2	8,2	8,2	6,6	arvio, tn
3,90	1,35	1,30	väli?	1,36	3,70	1,36	1,36		akseliväli, m	

single pyörät 385/65, paripyörät 315/80

Koekuormitusajoneuvon tiedot 10.10.2018 (Nuutti Vuorimies)

	Steering	Triple bogie			Steering	Double bogie		Triple bogie		
Axle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Axle load (kg)	7500	11500	9500	8700	37100					
Tyre type	Single	Dual	Dual	Single	Dual	Dual	Dual	Dual	Single	
Wheelbase (mm)	385/65 R22.5	315/80 R22.5	315/80 R22.5	385/65 R22.5	315/80 R22.5	315/80 R22.5	315/80 R22.5	315/80 R22.5	315/80 R22.5	385/65 R22.5
Tyre pressure, estimated (kPa)	4000	1450	1450	4900	1450	3750	1450	1450	1450	
Total load (kg)	74 100 kg									

Koekuormitusajoneuvon tiedot 24.7.2018 (Kalliainen 2018a)

LIITE B: TAMPEREEN YLIOPISTON ASENTAMIEN ANTURIEN TIEDOT

Anturin nimi mittaustiedostossa	Sisältö	Valmistaja	Anturityyppi	Yksikkö	Mittausalue
DISPL1-8	Tien kantavan kerroksen pystysuuntaisen muodonmuutoksen mittaus 150mm paksuudelta	Solartron metrology	LVDT AS/15	mm	+15mm
DISPL9-11	Tierakenteen pinnan pystysiirymän mittaus tiiviiseen pohjamaakerrokseen ankkuroiduilla siirtymäantureilla sidottujen kerrosten alapinnan tasolta	Solartron metrology	LVDT AS/25	mm	+25mm
VEPRE6-7, VEPRE9-10	Tierakenteessa vallitsevan pystysuuntaisen maanpaineen mittaus kantavasta kerroksesta	TOKYO	KDA-500KPA	kPa	
VEPRE17-28	Tierakenteessa vallitsevan pystysuuntaisen maanpaineen mittaus kantavasta kerroksesta	KYOWA	BEM-A-500KPZ15	kPa	
HOSTR1-12	Asfalttikerrosten alapinnassa vallitsevien vaakasuuntaisten venymien mittaus (parittomat anturit mittaavat tien suuntaan, parilliset poikittaissuuntaan)	Dynatest	PAST-2 (pavement strain transducer PAST-2)	Strain	
VEACC1-40	Tien pinnan taipumamuodon mittaus kiihtyvyyssantureilla tierakenteen sisältä pinnan läheisyydestä	Murata	Murata SCA620-C13H1A	g	+1,5 g

Figure 1 Anturityyppien esittely

PL4900 / TTY-VT21-01	Syvyys tien pinnasta (mm)	Etäisyys reunaviivan sisäreunasta (mm)
DISPL5	128	-15
DISPL6	134	158
DISPL7	135	409
DISPL8	135	562
DISPL9	Kantavan yläpinta	320
DISPL10	Kantavan yläpinta	560
DISPL11	Kantavan yläpinta	770
VEPRE6	277	580
VEPRE7	280	380
VEPRE23	180	330
VEPRE24	185	570
VEPRE25	285	-20
VEPRE26	182	-30
VEPRE27	293	190
VEPRE28	185	150
HOSTR7	Asf. Alapinta	68
HOSTR8	Asf. Alapinta	10
HOSTR9	Asf. Alapinta	257
HOSTR10	Asf. Alapinta	262
HOSTR11	Asf. Alapinta	511
HOSTR12	Asf. Alapinta	515

Figure 2 Anturien sijainti kohteella PL4900 / TTY-VT21-01

PL5700 / TTY-VT21-02	Syvyys tien pinnasta (mm)	Etäisyys reunaviivan sisäreunasta (mm)
DISPL1	175	280
DISPL2	170	437
DISPL3	172	588
DISPL4	169	765
VEPRE9	311	820
VEPRE10	313	270
VEPRE17	221	210
VEPRE18	227	400
VEPRE19	321	650
VEPRE20	321	480
VEPRE21	219	810
VEPRE22	223	580
HOSTR1	Asf. Alapinta	396
HOSTR2	Asf. Alapinta	401
HOSTR3	Asf. Alapinta	649
HOSTR4	Asf. Alapinta	623
HOSTR6	Asf. Alapinta	873

Figure 3 Anturien sijainti kohteella PL5700 / TTY-VT21-02

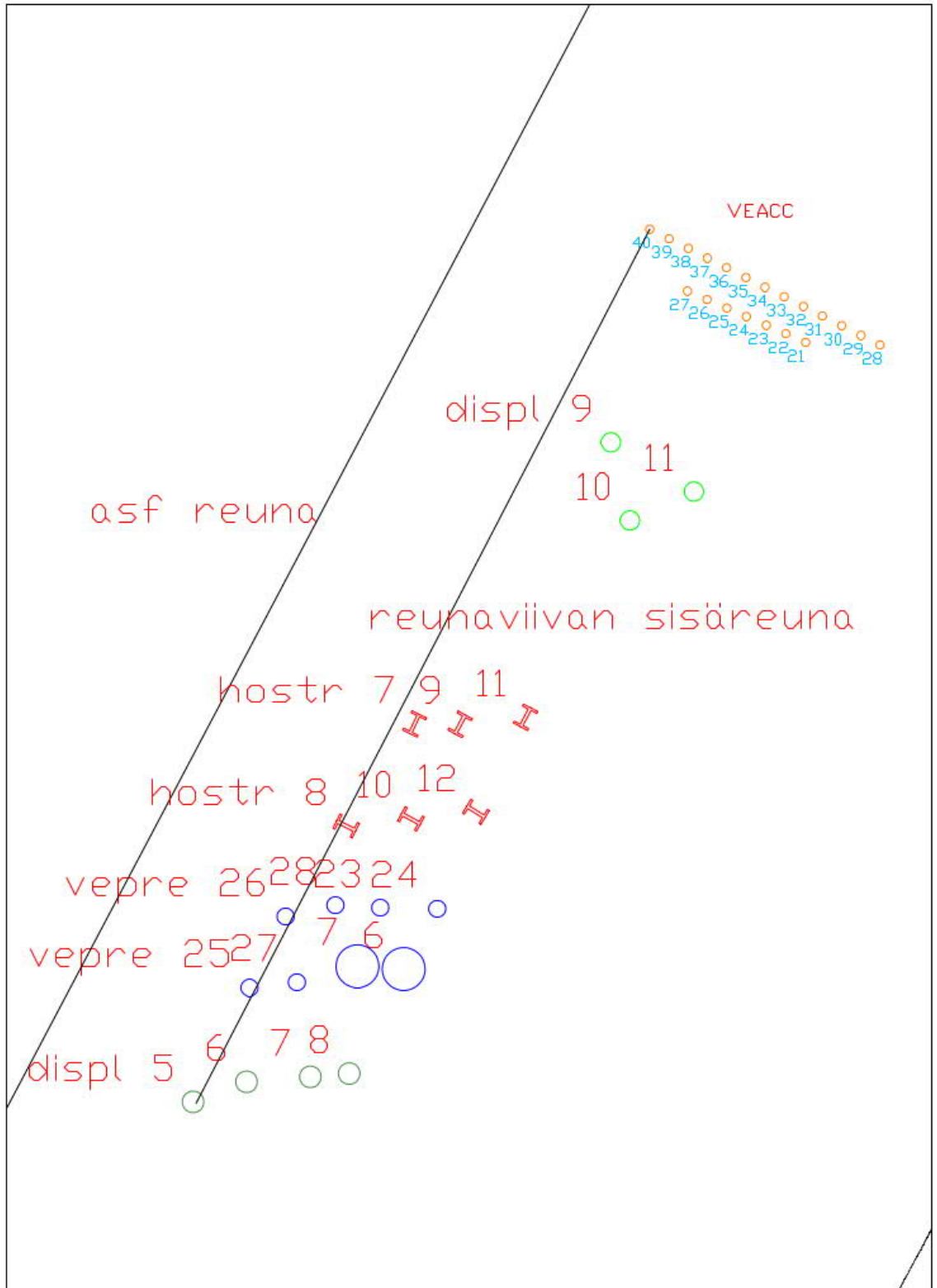
PL5700 / TTY- VT21- O2	Etäisyys reunaviivan sisäreunasta (mm)	Rivi
VEACC1	1200	1
VEACC2	1100	
VEACC3	1000	
VEACC4	900	
VEACC5	800	
VEACC6	700	
VEACC7	600	
VEACC15	500	
VEACC16	400	
VEACC17	300	
VEACC18	200	
VEACC19	100	2
VEACC20	0	
VEACC8	900	
VEACC9	800	
VEACC10	700	
VEACC11	600	
VEACC12	500	
VEACC13	400	
VEACC14	300	

Figure 4 Kiihtyvyyssanturien sijainti kohteella PL5700

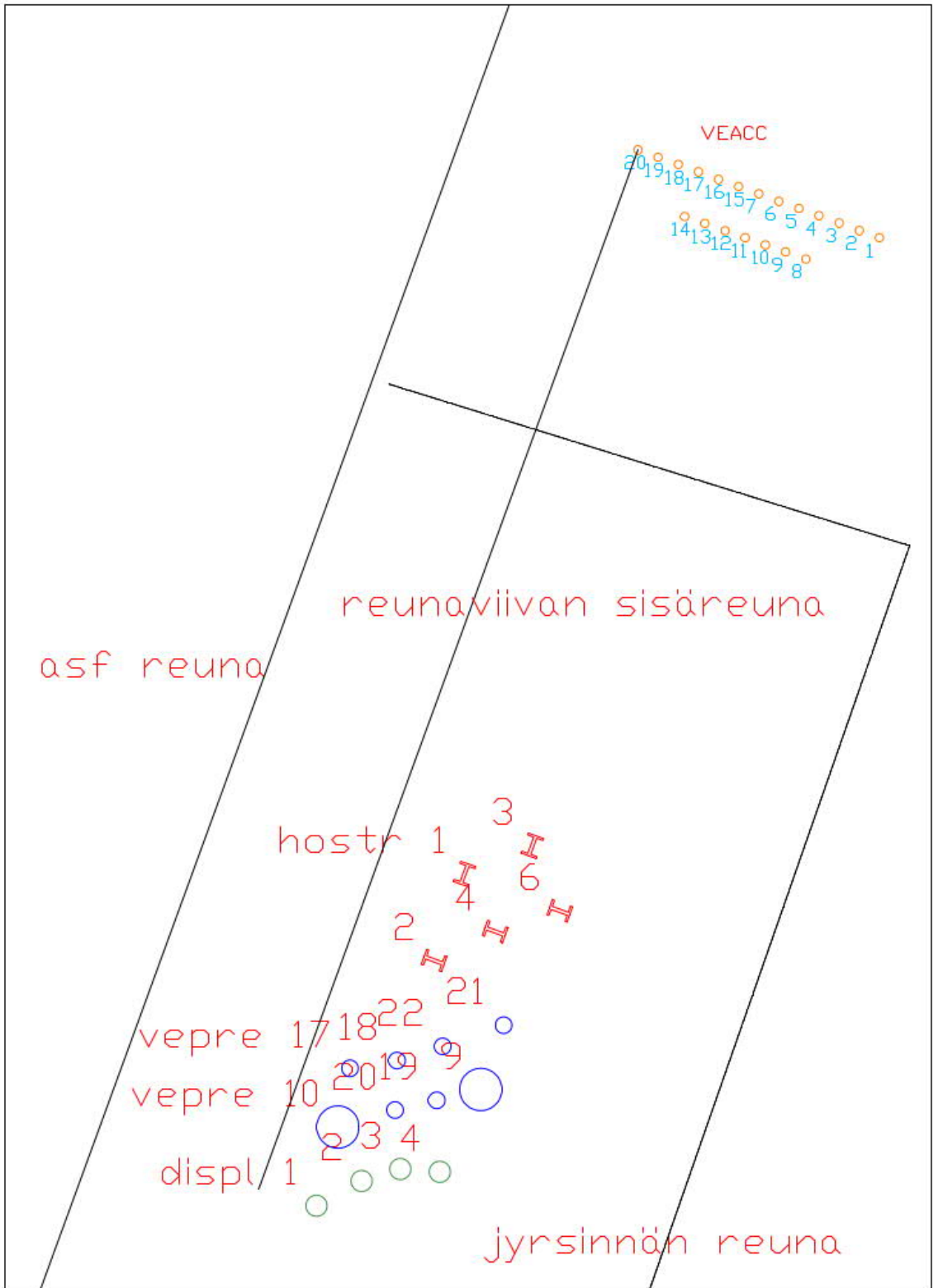
PL4900 / TTY- VT21- O1	Etäisyys reunaviivan sisäreunasta (mm)	Rivi
VEACC21	900	4
VEACC22	800	
VEACC23	700	
VEACC24	600	
VEACC25	500	
VEACC26	400	
VEACC27	300	
VEACC28	1200	3
VEACC29	1100	
VEACC30	1000	
VEACC31	900	
VEACC32	800	
VEACC33	700	
VEACC34	600	
VEACC35	500	
VEACC36	400	
VEACC37	300	
VEACC38	200	
VEACC39	100	
VEACC40	0	

Figure 5 Kiihtyvyyssanturien sijainti kohteella PL4900

AURORA PL4900



AURORA PL5700



LIITE C: JOUSTAVAN ALUSRAKENTEEN KOHTEEN KANTAVALLE KERROKSELLE TEHDYT LABORATORIOKOKKEET

Tampereen teknillinen yliopisto
Maa- ja Pohjarakenteet

MPR/240/2018

Pesuseulonta SFS-EN 933-1:2012 (+Liite A)

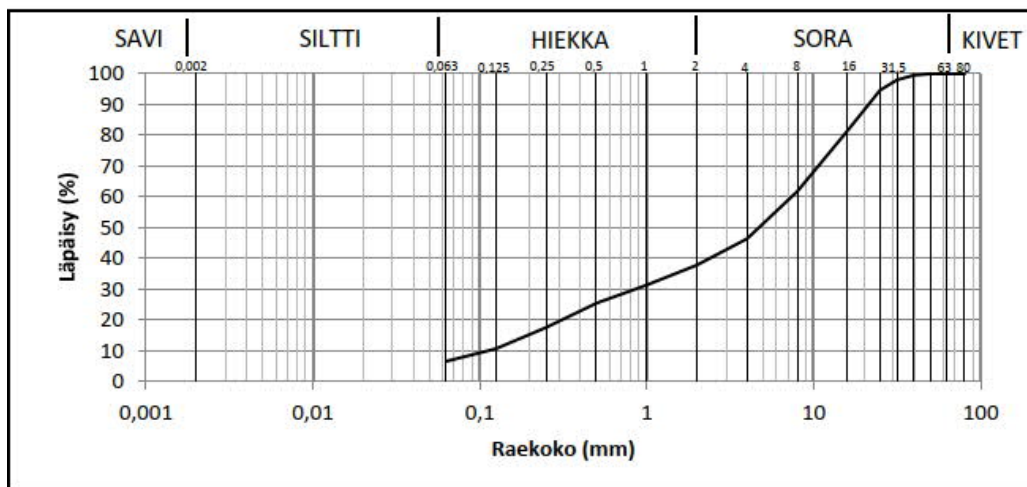
Näyte Sekoitusjyrsitty kantava kiviaines, näyte otettu 29.6.2016

Tutki: RK

pvm: 4.10/8.10.2018

Näytteen massa kuivana	13166,3
Näytteen massa pesun jälkeen	12418,7
Pesutappio	747,6

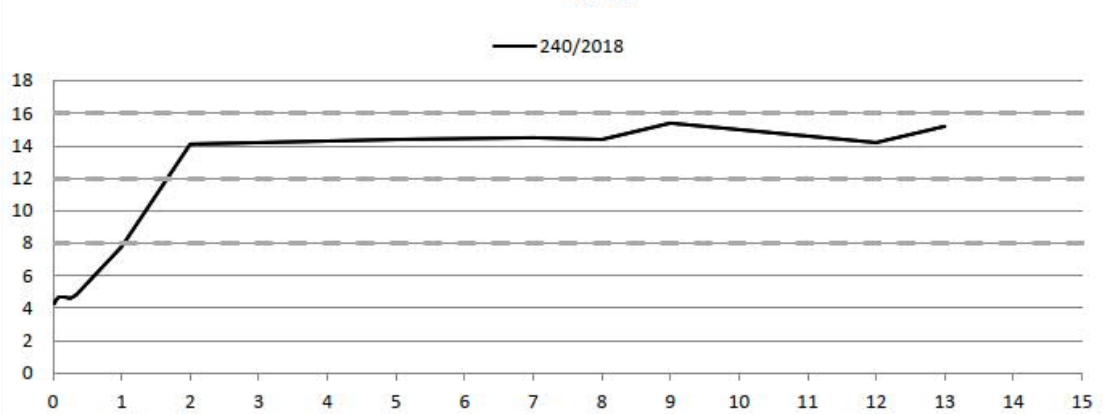
Seula (mm)	Seulalle jäi (g)	Seulalle jäi (%)	Läpäisy (%)
80	0,0	0,0	100
63	0,0	0,0	100
50	0,0	0,0	100
40	79,7	0,6	99
31,5	202,5	1,5	98
25	433,4	3,3	95
16	1721,2	13,1	81
8	2585,0	19,6	62
4	2035,6	15,5	46
2	1122,6	8,5	38
1	853,8	6,5	31
0,5	776,8	5,9	25
0,25	1035,0	7,9	18
0,125	902,5	6,9	11
0,063	538,4	4,1	6,6
POHJA	121,6		
POHJA+PESUTAPPIO	869,2	6,6	
YHTEENSÄ	13155,8		



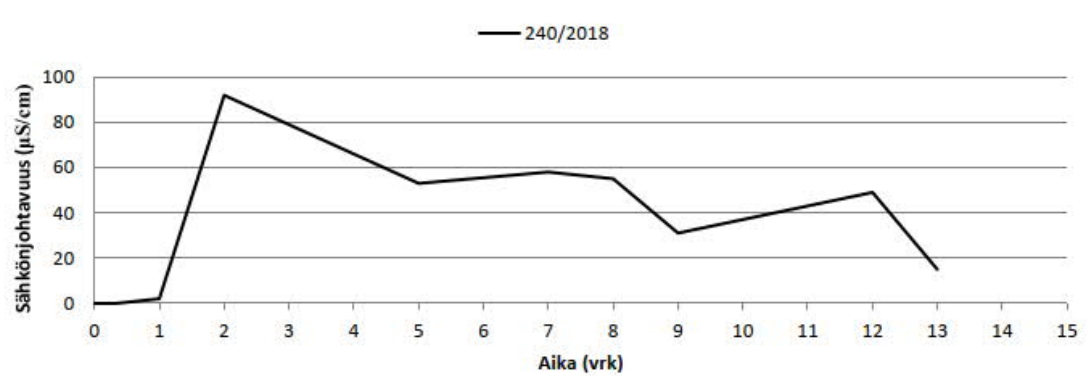
HUOM: Vesipitoisuus 4,3 %

Tube Suction Test

Näytteen tunnus	240/2018		
Näytteenottoaika	Auroran koetiekohte, sekoitusjyrsitty kantava		
Koekappaleen tiivistämispäivä (ICT)	29.8.2018		
Kuivaitilavuuspaino (kN/m ³)	22,5		
Tiivistysvesipitoisuus (%)	5,0		
Vesipitoisuus ennen mittauksia (%)	1,6		
Vesipitoisuus lopussa (%)	6,2		
Vesipitoisuus _{ylhäällä} (%)	4,7		
Vesipitoisuus _{alhaalla} (%)	6,5		
e_r (12 vrk)	14,2		
e_r (3 viimeisen mittauksen ka)	14,9		
J (12 vrk) (μS/cm)	49		
J (3 viimeisen mittauksen ka) (μS/cm)	32		

Dielektrisyys (e_r)

Sähkönjohtavuus (J)



Dielektrisyys

Mittaukset:	Aika	ϵ_r	ϵ_r	ϵ_r
	0 min	4,3		
	30 min	4,3		
	1 h	4,5		
	2 h	4,7		
	4 h	4,7		
	6 h	4,6		
	8 h	4,8		
	1 vrk	7,8		
	2 vrk	14,1		
	5 vrk	14,4		
	7 vrk	14,5		
	8 vrk	14,4		
	9 vrk	15,4		
	12 vrk	14,2		
	13 vrk	15,2		

Sähkönjohtavuus

Mittaukset:	Aika	J	J	J
	0 min	0		
	30 min	0		
	1 h	0		
	2 h	0		
	4 h	0		
	6 h	0		
	8 h	0		
	1 vrk	2		
	2 vrk	92		
	5 vrk	53		
	7 vrk	58		
	8 vrk	55		
	9 vrk	31		
	12 vrk	49		
	13 vrk	15		

LIITE D: MITTAUSTULOKSET MITTAUSVIIKOILTA JA KOEKUORMITUSPÄIVILTÄ

Mittausdata, josta mittaustulokset koostettiin, on saatavilla avoimena datana osoitteessa ”<https://aineistot.vayla.fi/aurora/>”.

Mittaukset kerättiin kahdelta mittauskohteelta Muonion eteläpuolelta Vt21 tieltä 1000 Hz mittaustaajuutta käyttäen. Kumpikin mittauskohde edusti korkeapenkereistä, hyväkuntoista ja vahvaa tierakennetta. Kohteella PL4900 päällystepaksuus on 90 mm ja kohteella PL5700 120 mm.

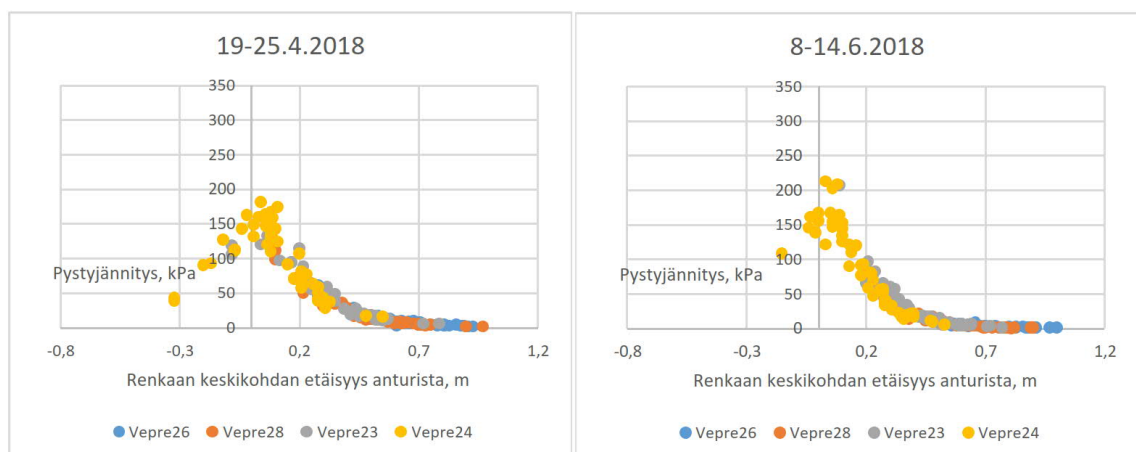
Mittausviikoilla mittaukset tehtiin kohteiden läpi kulkeneesta liikennevirrasta. Mittausviikojen tulokset koostettiin 6-akselisien, yli 40 tn painavien rekkojen ensimmäisten akselien yksikköpyörien aiheuttamista vasteista.

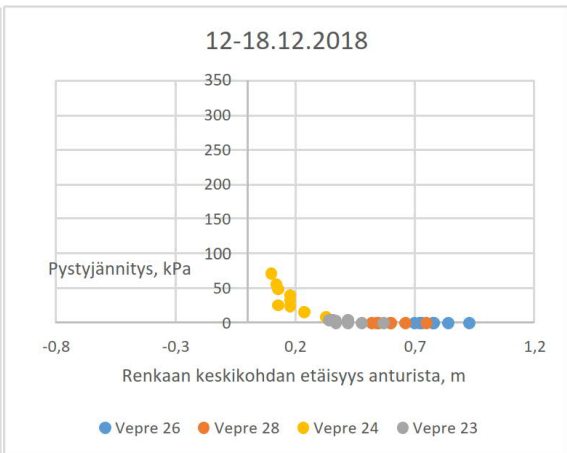
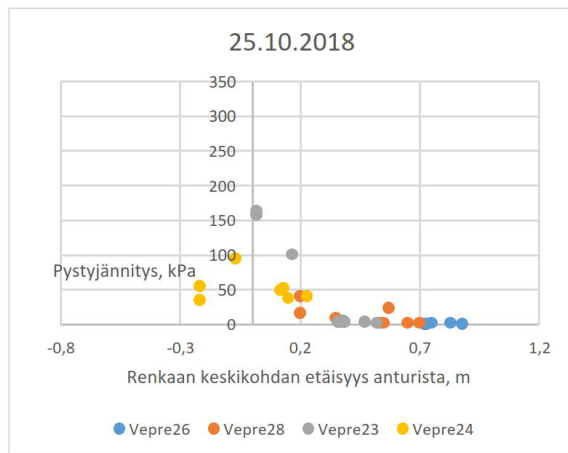
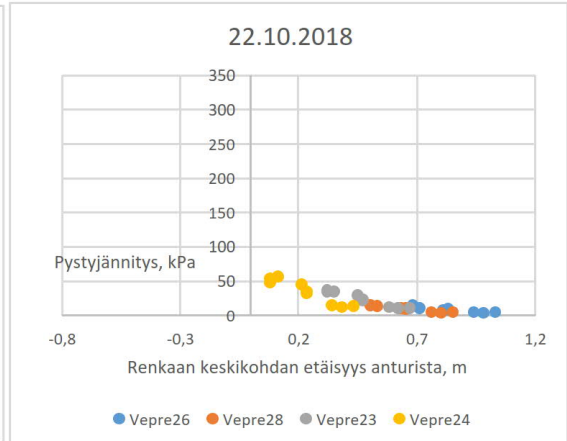
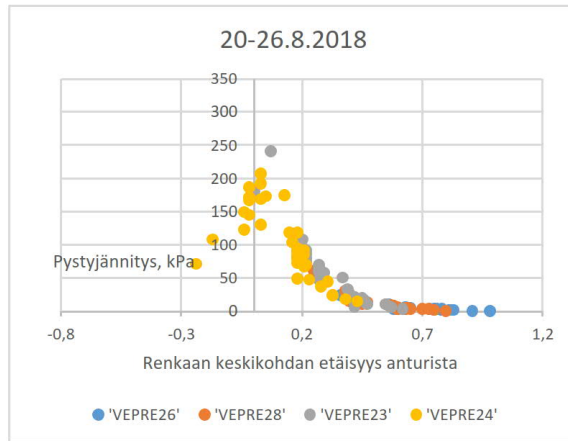
Koekuormituspäivinä mitaustulokset koostettiin 9-akselisen koekuormitusajoneuvon 1. akselin 385/65 yksikköpyörän ja 2. akselin 315/80 paripyörän aiheuttamista vasteista. Koekuormituspäivänä 24.7.2018 1. akselin akselimassa oli 7,5 tn ja 2. akselin 11,5 tn. Koekuormituspäivänä 10.10.2018 1. akselin akselimassa oli 8,0 tn ja 2. akselin 10,5 tn.

Ensimmäisen mittauskohteen nimi on PL4900 / Aurora 2 / Joustavan alusrakenteen mittauskohde. Toisen mittauskohteen nimi on PL5700 / Aurora 1 / Jäykän alusrakenteen mittauskohde.

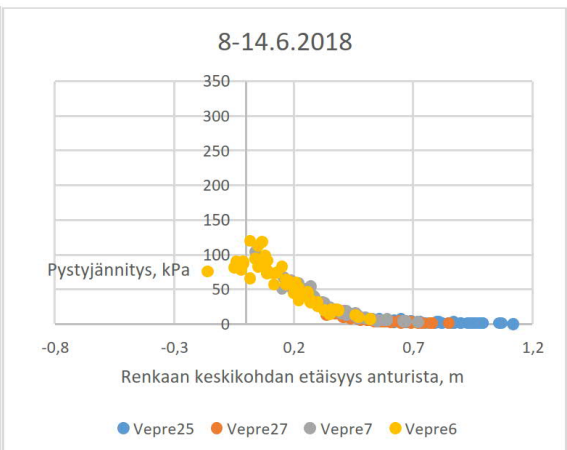
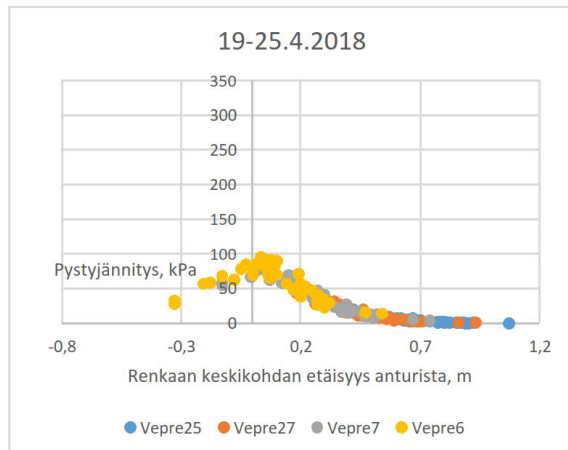
PL4900 / Aurora 2 / Joustavan alusrakenteen mittauskohde: Mittausviikot

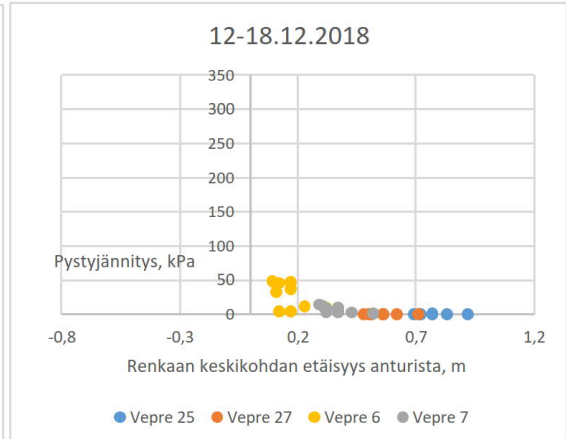
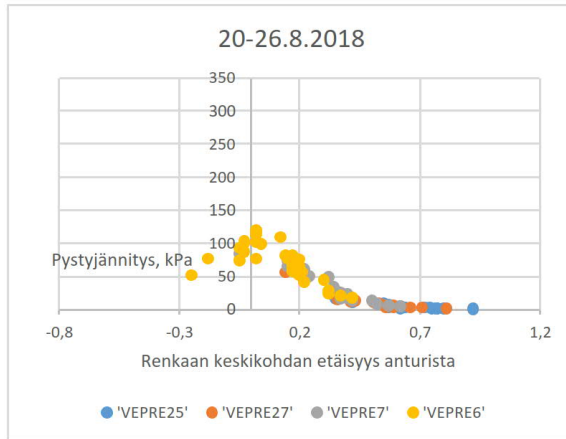
Pystyjännitys 180 mm syvyydellä kantavassa kerroksessa



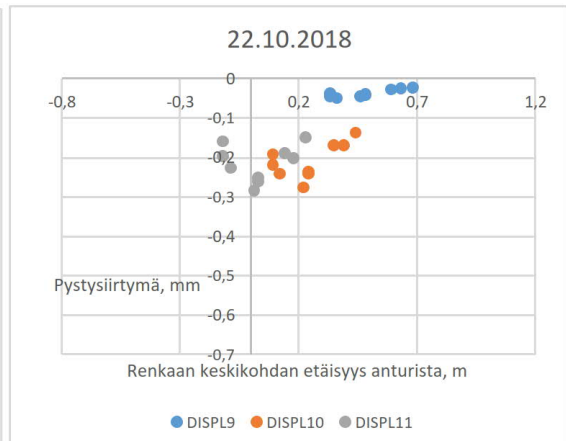
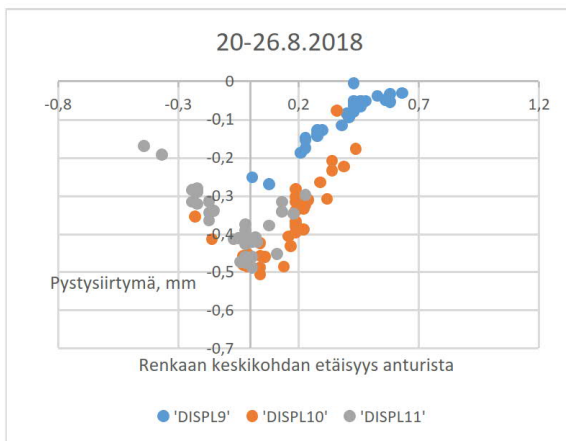
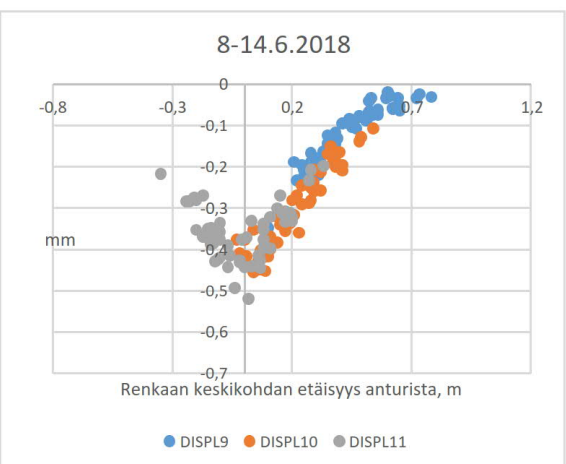
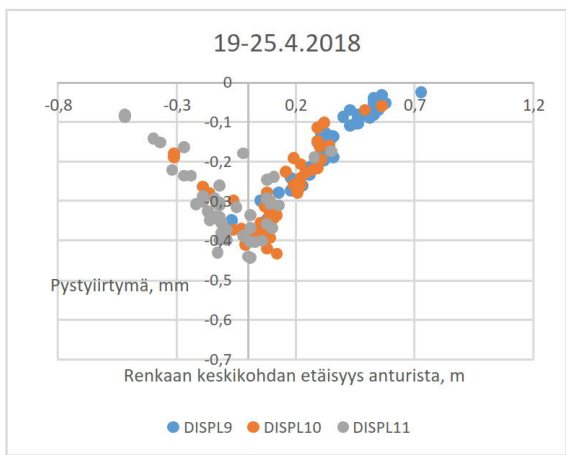


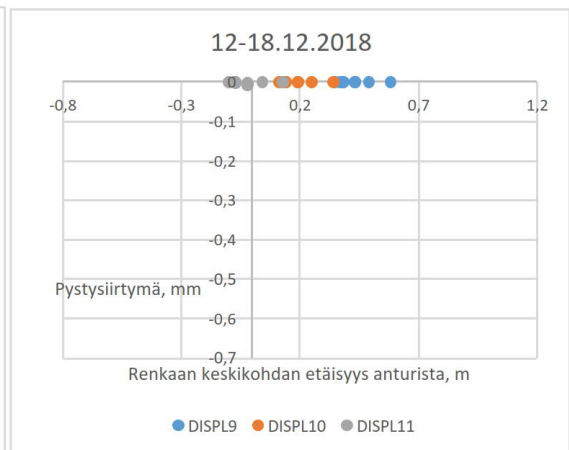
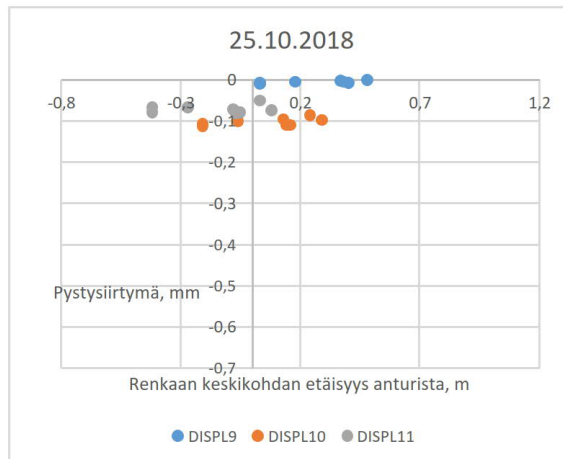
Pystyjännitys 280 mm syvyydellä kantavassa kerroksessa



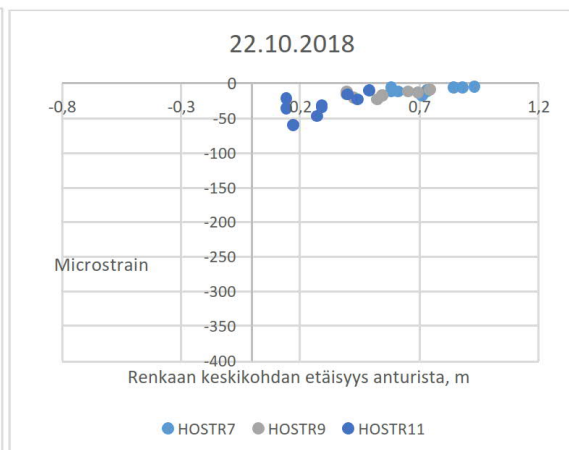
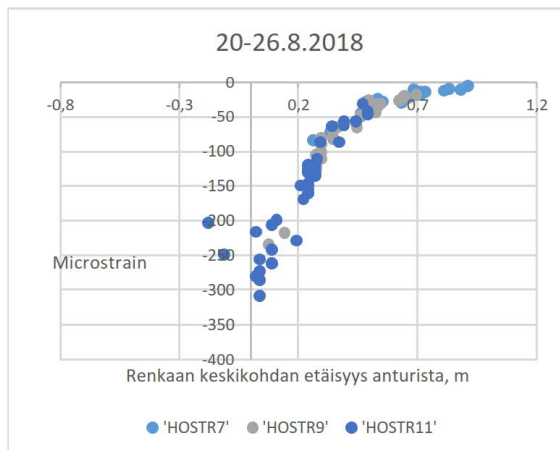
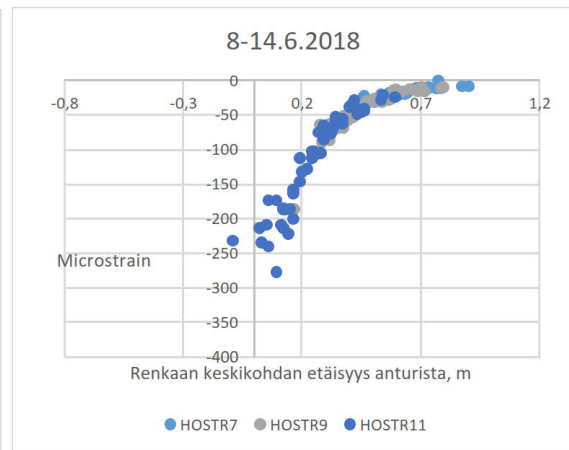
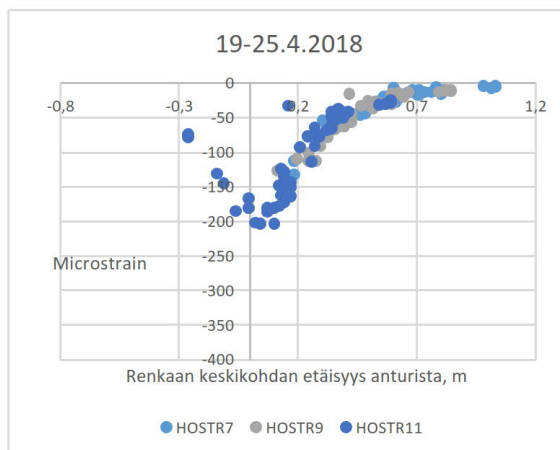


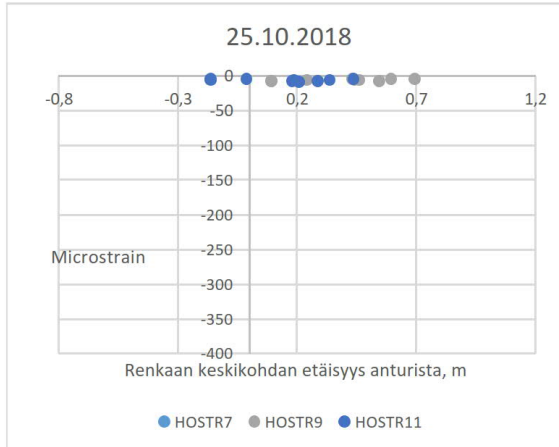
Tien pinnan pystysiirtymä siirtymäantureilla



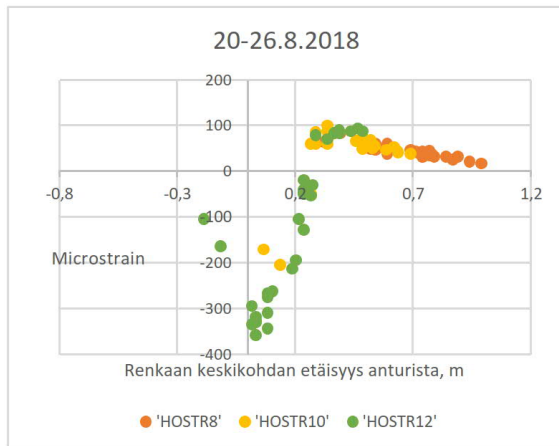
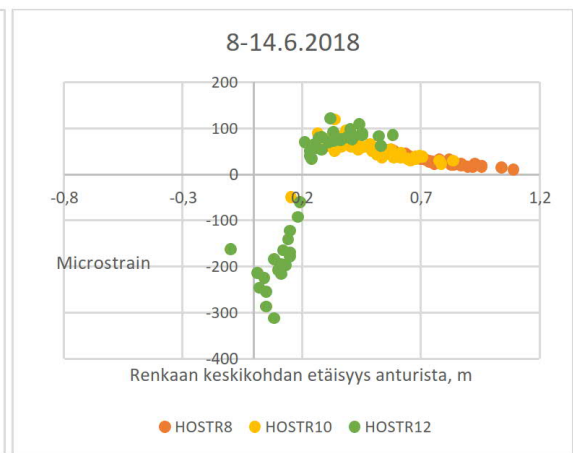
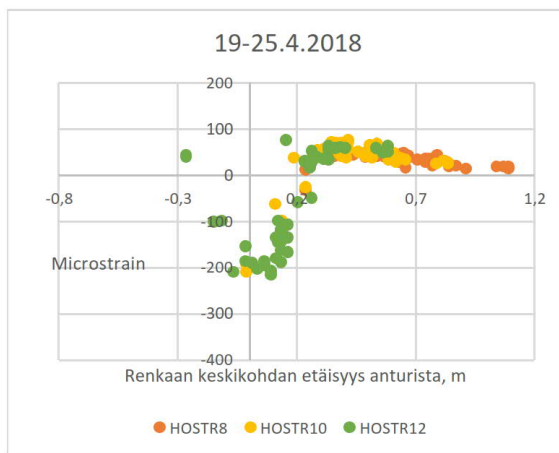


Asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa

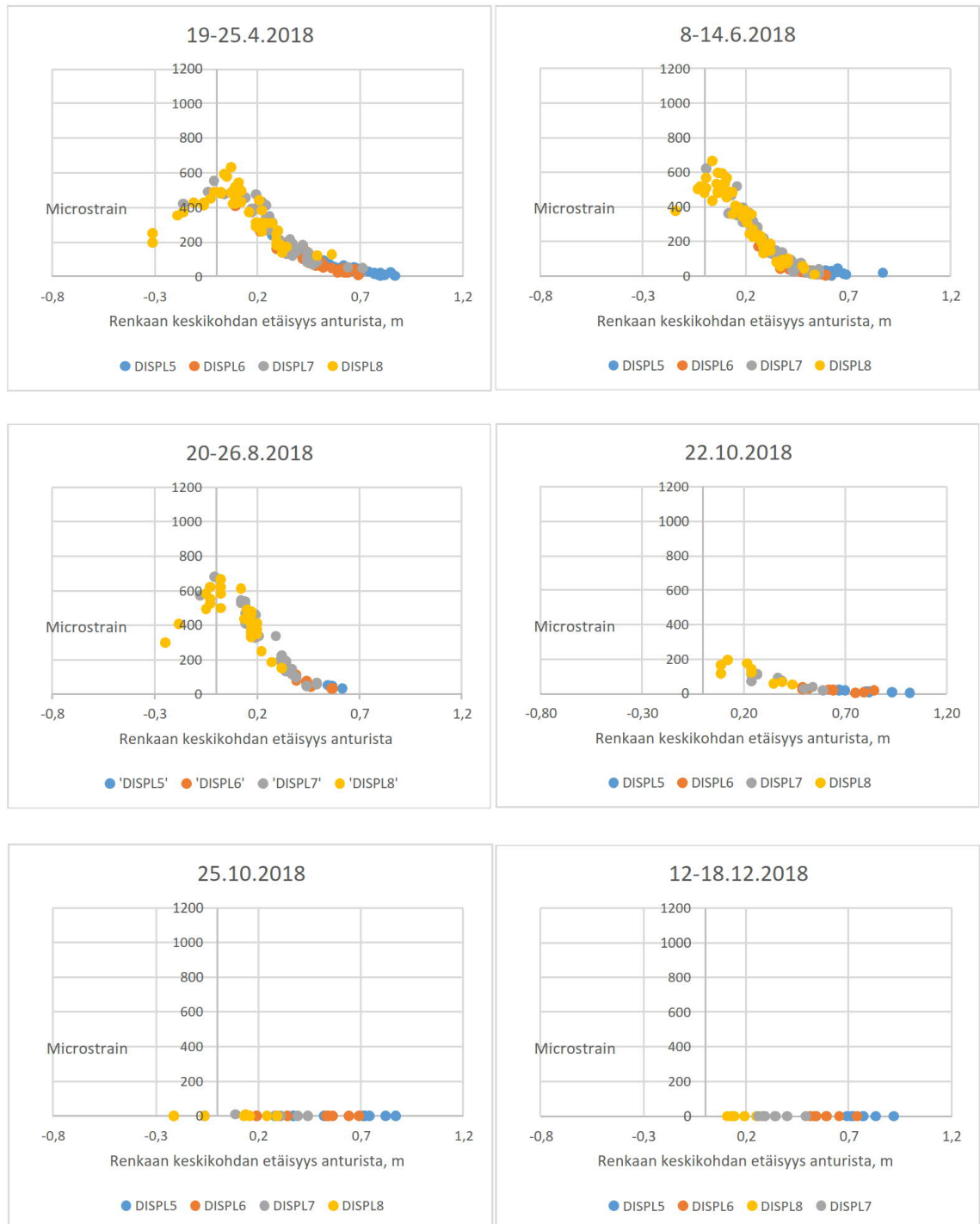




Asfaltin alapinnan venymä tien poikittaissuunnassa

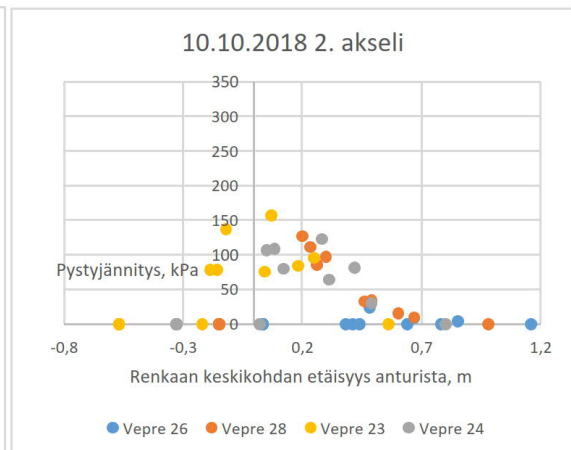
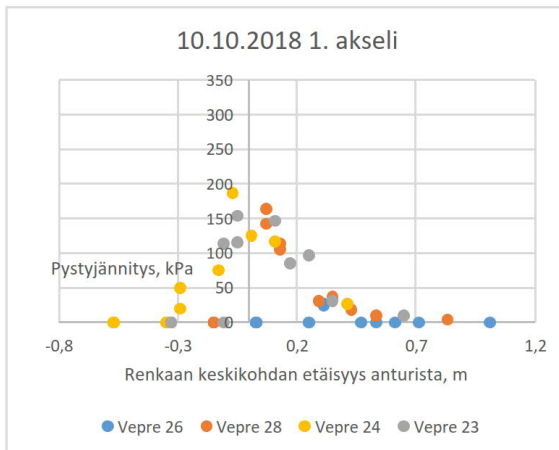
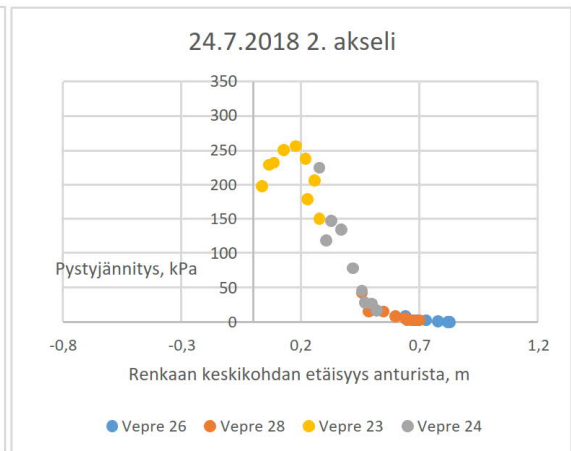
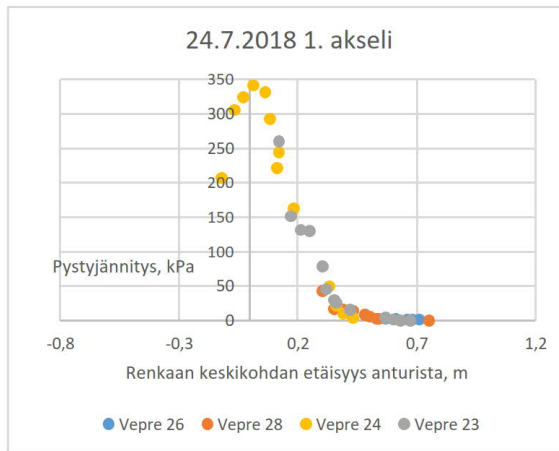


Kantavan kerroksen pystysuuntainen kokoonpuristuma

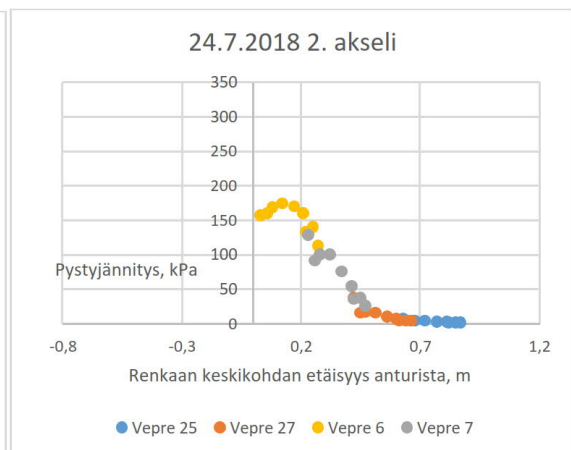
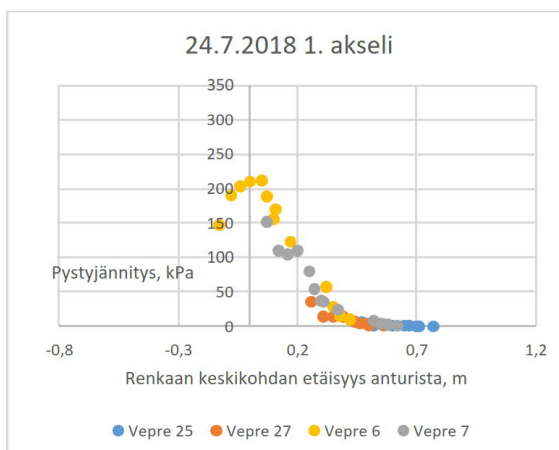


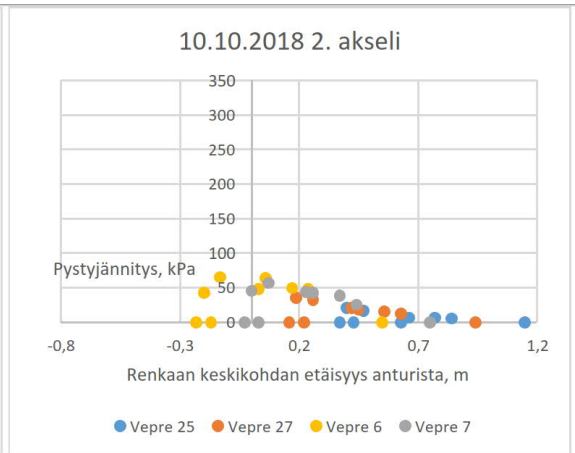
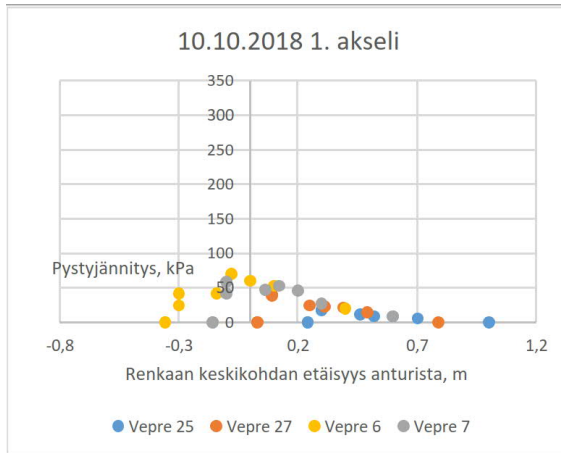
PL4900 / Aurora 2 /Joustavan alusrakenteen mittauskohde: Koekuormitukset

Pystyjännitys 180 mm syvyydellä kantavassa kerroksessa

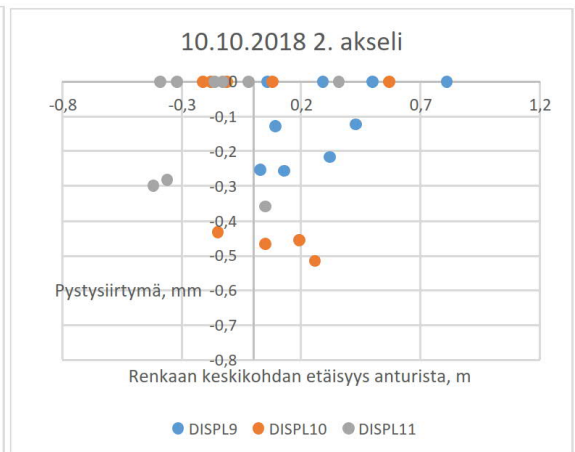
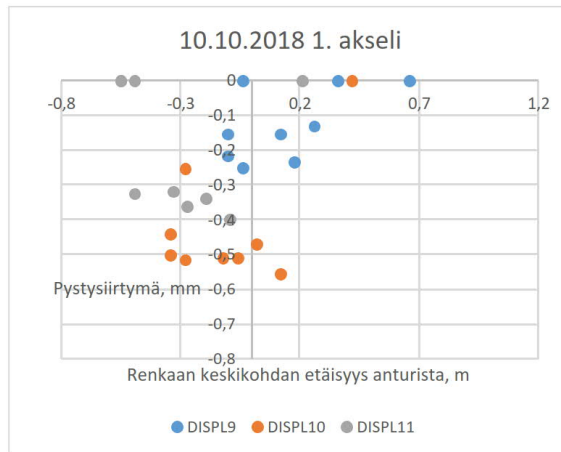
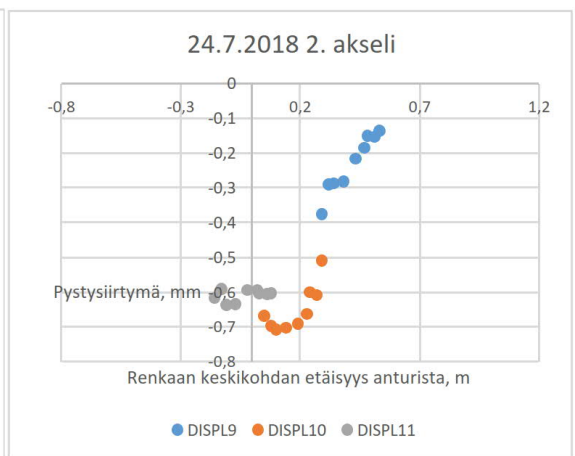
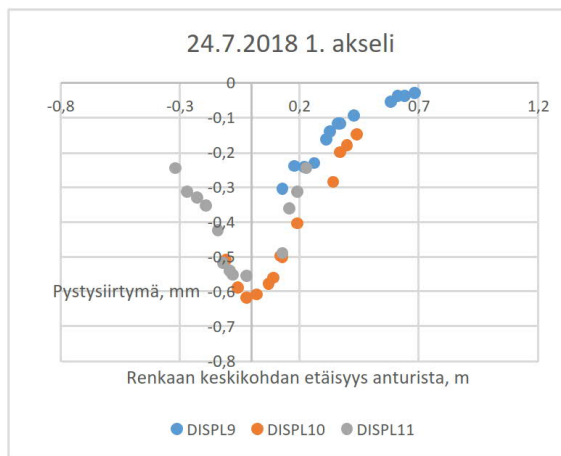


Pystyjännitys 280 mm syvyydellä kantavassa kerroksessa

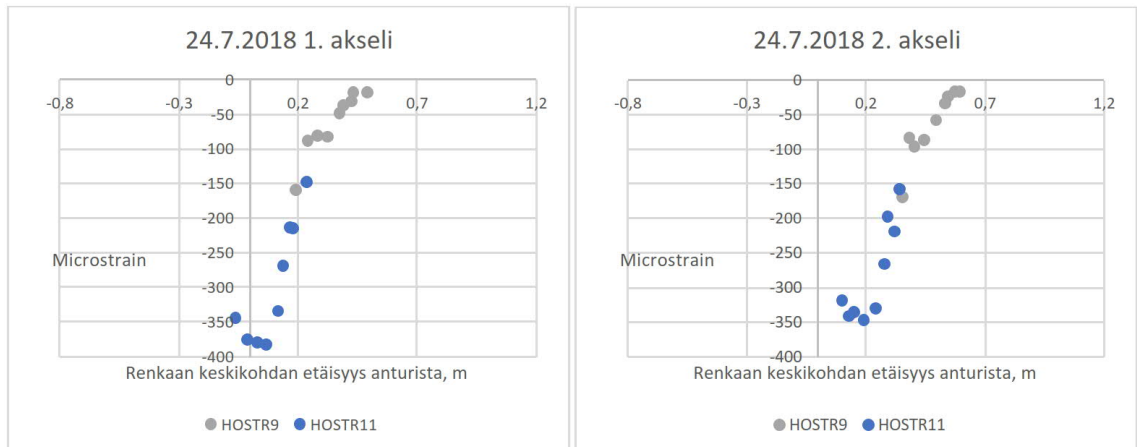




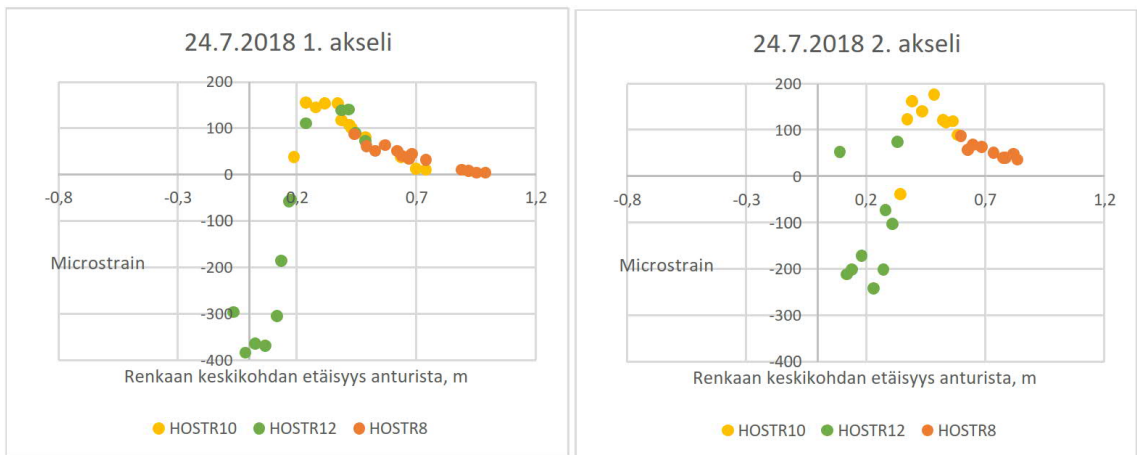
Tien pinnan pystysiirtymä siirtymäantureilla



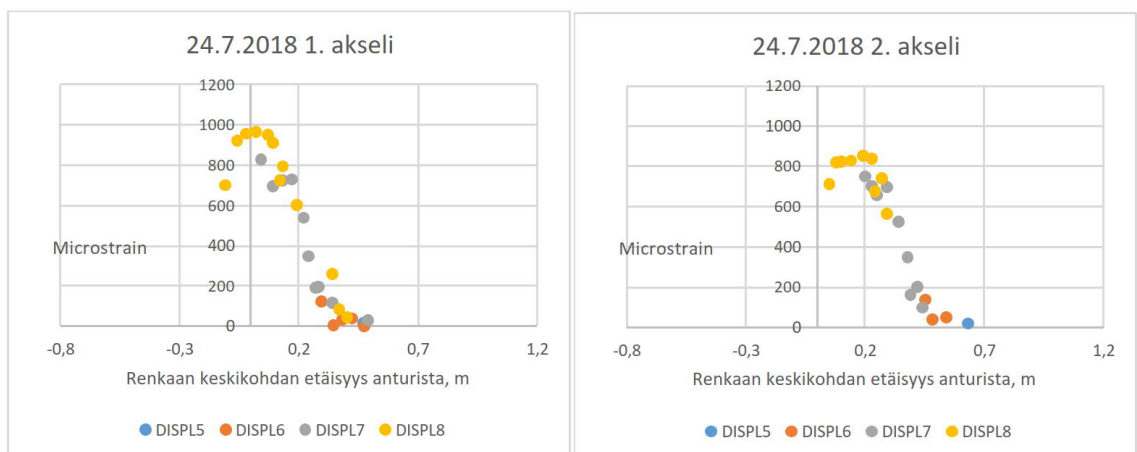
Asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa

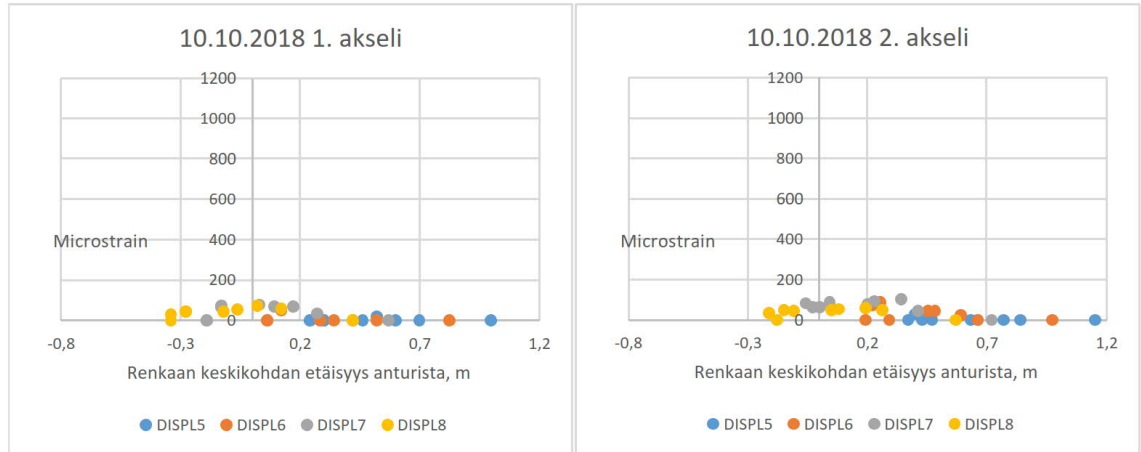


Asfaltin alapinnan venymä tien poikittaissuunnassa



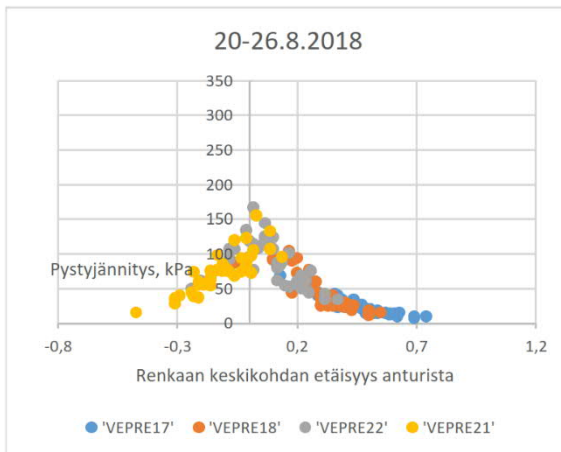
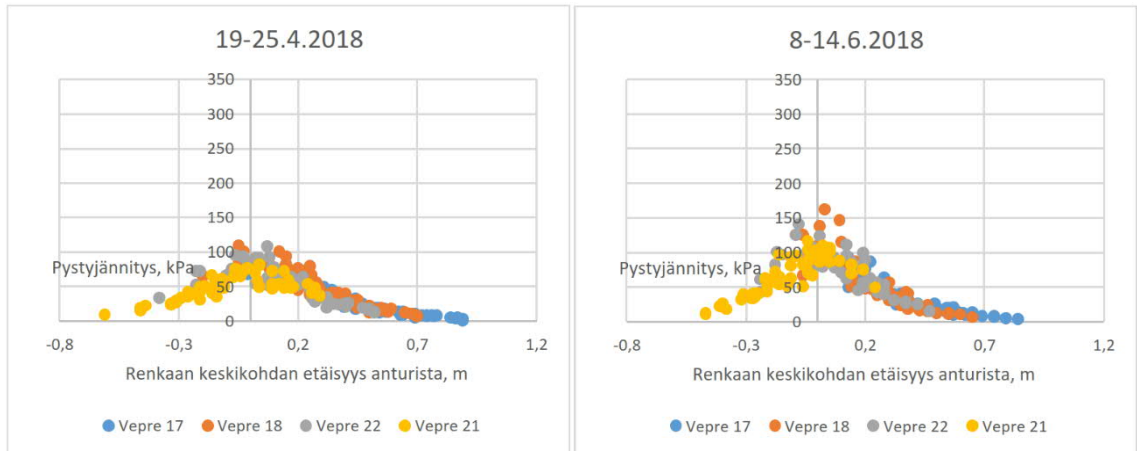
Kantavan kerroksen pystysuuntainen kokoonpuristuma



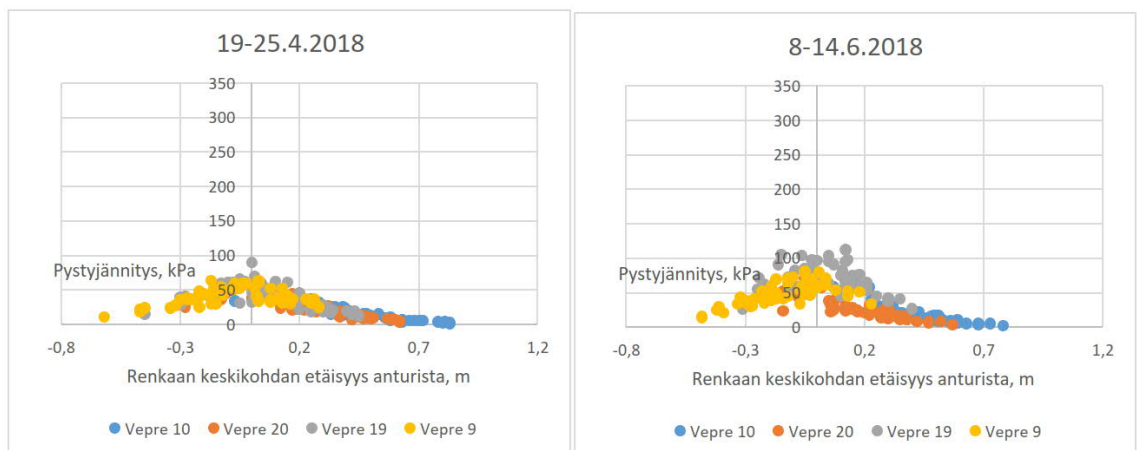


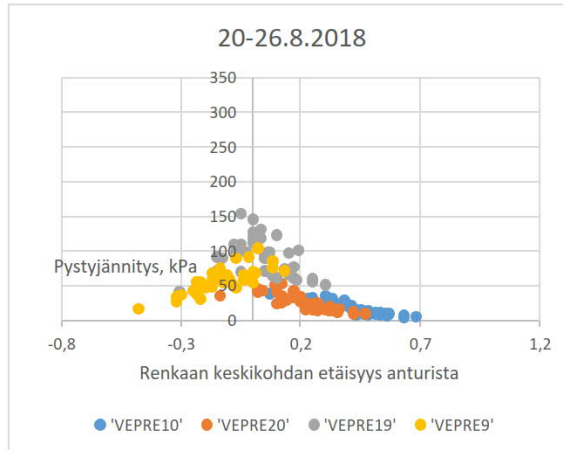
PL5700 / Aurora 1 / Jäykän alusrakenteen mittauskohde: Mittausviikot

Pystyjännitys 220 mm syvyydellä kantavassa kerroksessa

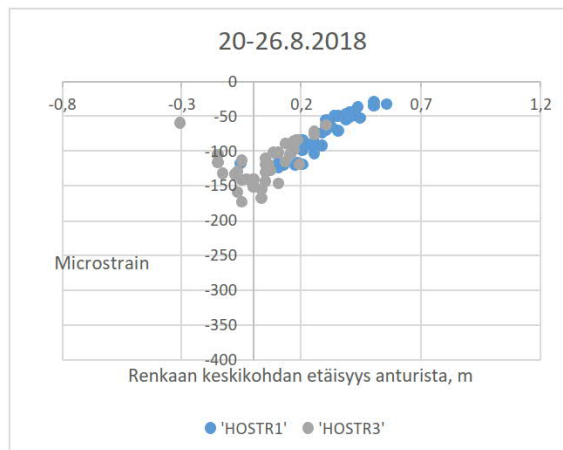
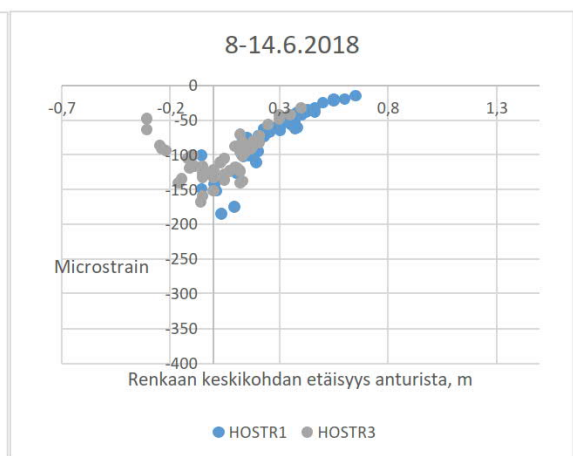
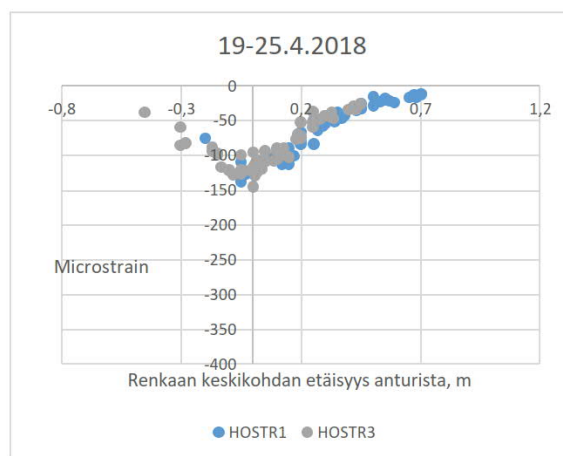


Pystyjännitys 315 mm syvyydellä kantavassa kerroksessa





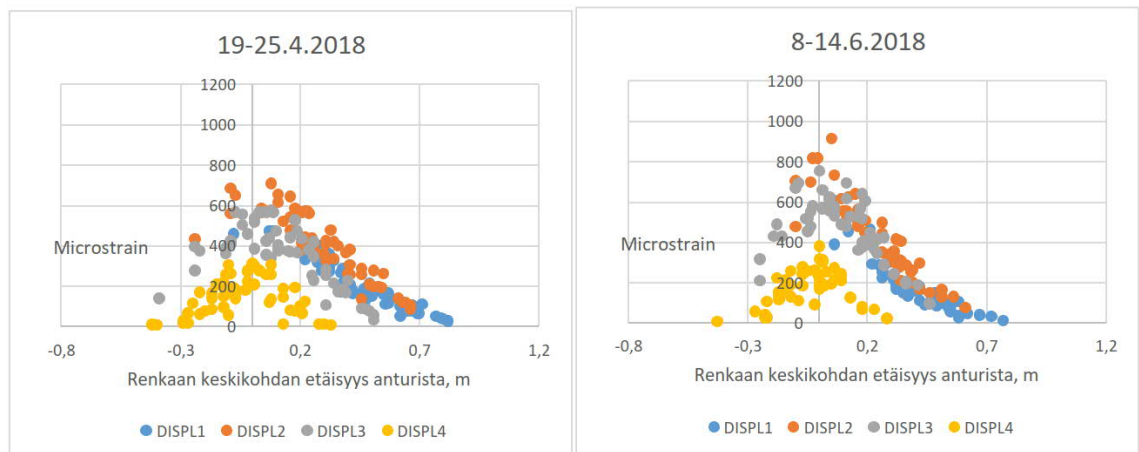
Asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa

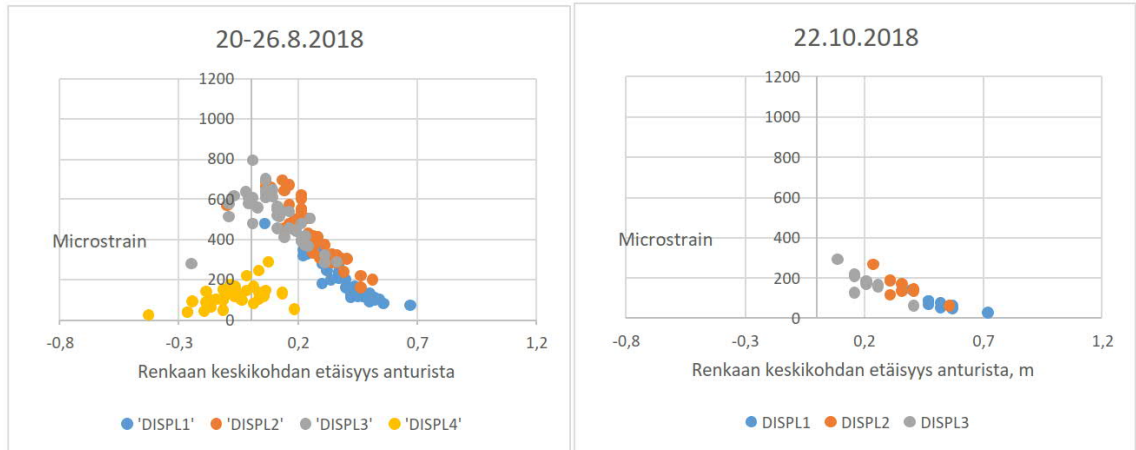


Asfaltin alapinnan venymä tien poikittaissuunnassa



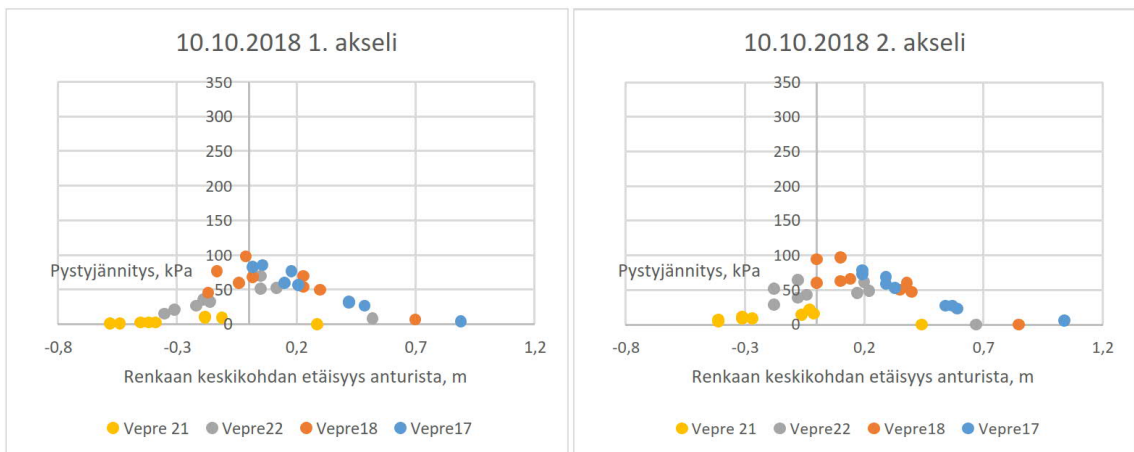
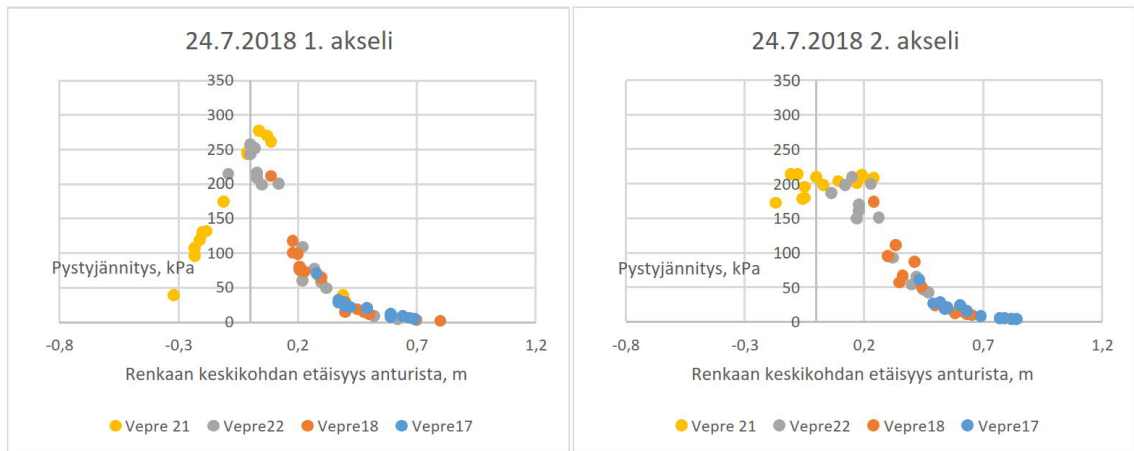
Kantavan kerroksen pystysuuntainen kokoonpuristuma



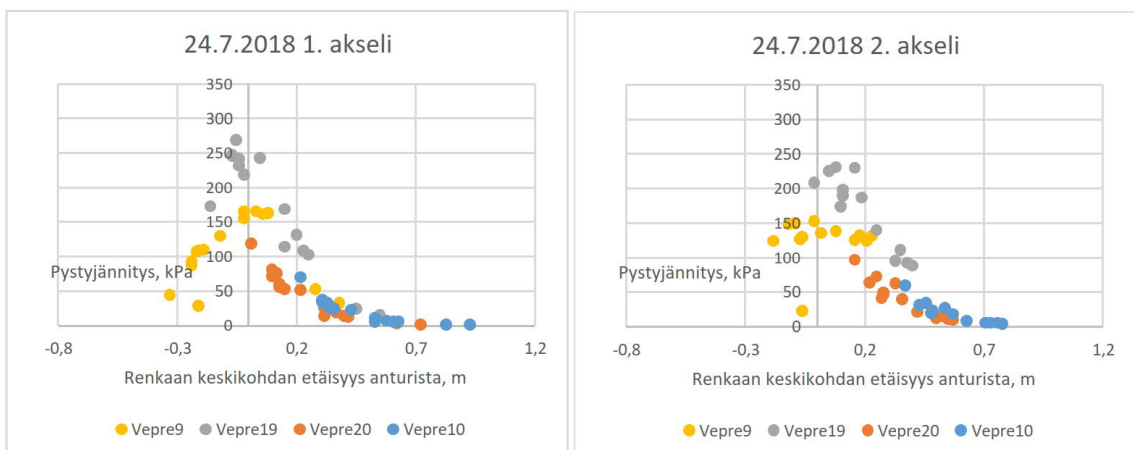


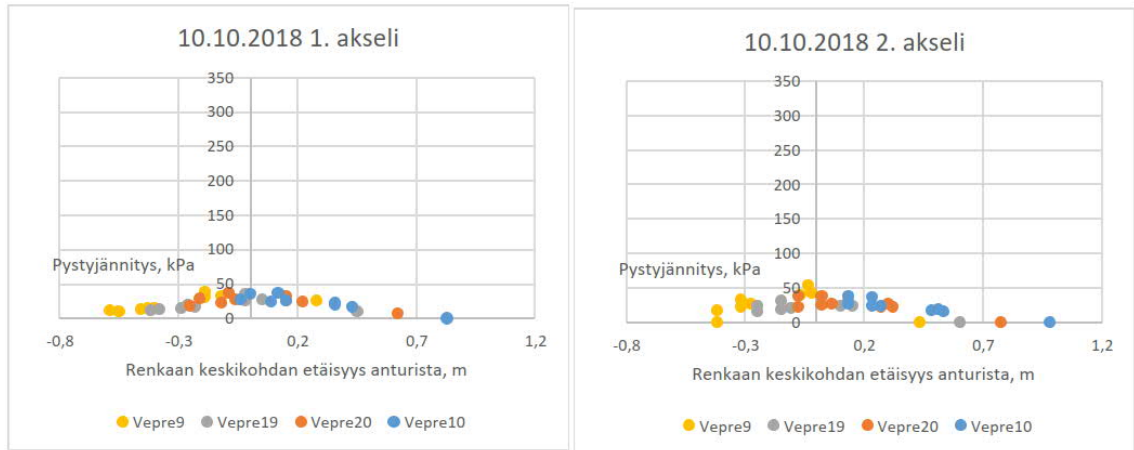
PL5700 / Aurora 1 / Jäykän alusrakenteen mittauskohde: Koekuormitukset

Pystyjännitys 220 mm syvyydellä kantavassa kerroksessa

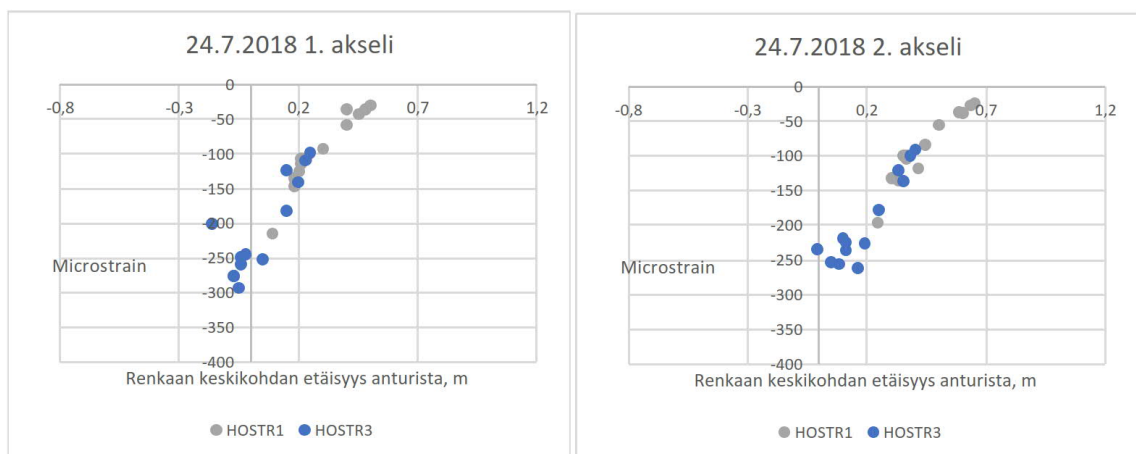


Pystyjännitys 315 mm syvyydellä kantavassa kerroksessa

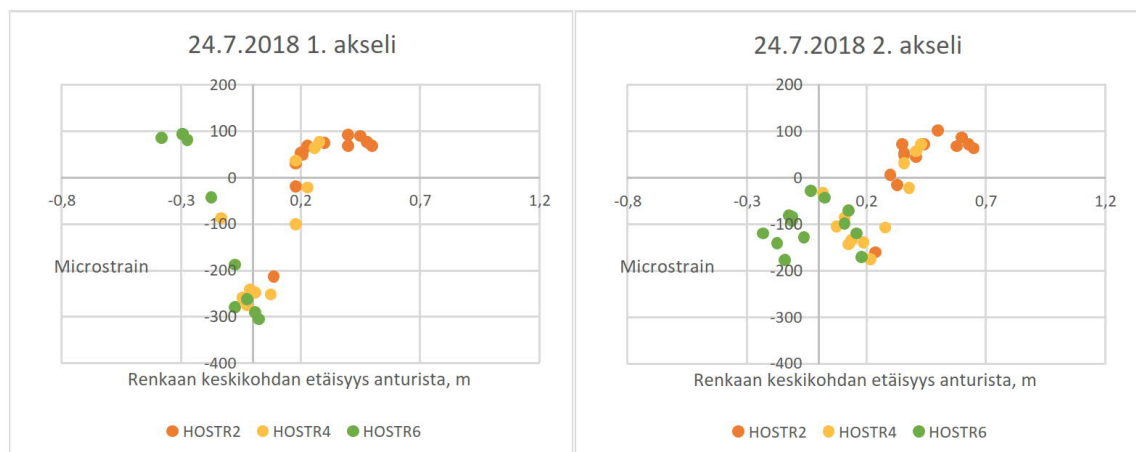




Asfaltin alapinnan venymä tien pituussuunnassa



Asfaltin alapinnan venymä tien poikittaissuunnassa



Kantavan kerroksen pystysuuntainen kokoonpuristuma

