

KUNNALLISTEKNIIKAN VAIKUTUS KATUVERKON KUNTOON

Timo Rytilahti

Opinnäytetyö
Tekniikan ja liikenteen ala
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Insinööri (AMK)

2016

Tekniikka ja liikenne
Rakennustekniikka

Tekijä	Timo Ryttilähti	Vuosi	2016
Ohjaaja	Janne Poikajärvi		
Toimeksiantaja	Roadscanners Oy		
Työn nimi	Kunnallistekniikan vaikutus katuverkon kuntoon		
Sivu- ja liitemäärä	78 + 1		

Tämän opinnäytetyön tavoite oli selvittää kunnallistekniikan vaikutusta katuverkon kuntoon. Opinnäytetyön tavoite oli kerätä tietoa siitä, missä suhteessa eri johtotyypit vaikuttavat kadun kuntoon ja kuinka paljon. Työssä kerrotaan myös kattavasti tierakenteen kuntoon vaikuttavista tekijöistä, vaurioitumismekanismeista ja nykyaikaisista mittausmenetelmistä.

Tutkimusaineistona työssä käytettiin Roadscanners Oy:n Street Doctor-katuanalyysimenetelmällä kerättyä aineistoa katujen rakenteellisesta ja toiminnallisesta kunnosta. Tutkimusmenetelminä käytettiin Rovaniemen kaupungilta saatujen johtokarttojen yhdistämistä edellä mainittuihin aineistoihin ja tsekkiläisen GeoVap s ro:n mobiililaserskannauksella saatuihin routanousuvideoihin. Lisäksi työssä käytettiin päällystevaurioinventointia ja johtojen yhdistämistä saatuihin kuviin.

Kunnallistekniikan vaikutus katuverkolle on tulosten perusteella ilmeinen. Tutkimuskohteina olevien 12:n kadun alitti johtokarttojen mukaan 363 putkea. Näistä 213:n voitiin käytettyjen tutkimusaineistojen perusteella osoittaa aiheuttavan erilaisia poikkeamia katurakenteelle. Eniten poikkeamia aiheuttivat kaukolämpöjohdot, 82 % johdoista, kun taas raaka-, sade-, ja jätevesijohdoista noin 55 % aiheutti aineistoissa näkyviä poikkeamia katurakenteille. On silti tärkeää mainita, että työn tuloksissa kunnallistekniikan rakenteet näkyvät poikkeamina myös niissä tapauksissa, jossa kunnallistekniikka on rakennettu hyvin, mutta katurakenteet ovat ohuet tai muuten huonossa kunnossa. Kunnallistekniikan aiheuttamat vauriot kadulle ovat päällystehalkeamien lisäksi urautuminen ja pituus- ja poikittaissuuntaiset epätasaisuudet. Tienkäyttäjille edellä mainitut vauriot aiheuttavat ajomukavuus- ja terveyshaittoja tärinän seurauksena sekä kasvaneita huolto- ja polttoainekustannuksia.

Asiasanat

tie- ja katurakenteen kunto, päällysteen vaurioituminen, kunnallistekniikka

Technology, Communication
and Transport
Degree Programme in Civil
Engineering

Author	Timo Ryttilähti	Year	2016
Supervisor	Janne Poikajärvi		
Commissioned by	Roadscanners Oy		
Subject of thesis	Impact of Municipal Utilities on the Condition of the Street Network		
Number of pages	78 + 1		

The aim of this thesis was to research the impact of municipal utilities on the condition of a street network. More specifically, the aim was to collect information about the effects of the different utility types on a road structure. The thesis also provides a comprehensive explanation of factors which have an effect on the condition of the road structure, the damage mechanisms and the modern surveying methods.

The data provided by Roadscanners Oy about the structural and functional condition of the roads was studied. The data was gathered using the Street Doctor street analysis method. One of the principal research methods was to compare utility maps provided by the city of Rovaniemi to the street data and to the frost heave videos collected with a mobile laser scanner owned by a Czech company called GeoVap s ro.. Another method was to examine the relationship between the utilities and the images showing pavement damage taken during the pavement damage inventory.

The influence of the municipal infrastructure on the street network is obvious. There were a total of 363 pipes under the 12 streets selected for this research. The research showed that 213 of them can be proved to have caused different types of anomalies in the road structures. Most anomalies were caused by the district heating pipes (82 %), while the clean water, rainwater and wastewater pipes covered about 55 % of them. Anomalies were created even if the utilities were well built but the street structures were thin or otherwise in poor condition. Pavement cracking, rutting and longitudinal and cross-direction roughness are examples of damages caused by the municipal utilities. These damages can cause driving comfort and health issues through increased shaking as well as increased repair and fuel consumption costs for the street users.

Key words condition of road and street structure, pavement damage mechanisms, municipal utilities

SISÄLLYS

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO.....	6
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET.....	8
1 JOHDANTO.....	9
2 ROADSCANNERS OY	10
3 TIE- JA KATURAKENTEN KUNTO.....	11
3.1 Tierakenne.....	11
3.2 Katurakenne ja sen toimivuusvaatimukset.....	13
3.3 Toiminnallinen ja rakenteellinen kunto	14
3.4 Liikennekuormitus.....	14
3.5 Ilmastokuormitus.....	16
3.6 Tien kunnon vaikutus tienkäyttäjälle	18
4 PÄÄLLYSTEEN VÄSYMINEN JA VAURIOITUMINEN	20
4.1 Lineaarielastinen väsyminen.....	20
4.2 Pysyvät muodonmuutokset.....	20
4.2.1 Poikkisuuntaiset epätasaisuudet	21
4.2.2 Pituussuuntaiset epätasaisuudet.....	24
4.3 Päällysteen vaurioituminen	24
4.4 Vauriotyypit	26
4.4.1 Halkeamat	26
4.4.2 Avoimet kohdat, purkaumat, reiät ja liimauksen pettäminen	27
5 KUNNALLISTEKNIikka KATUVERKOSSA.....	29
5.1 Vesi-, viemäri- ja sadevesijohdot	29
5.2 Kaukolämpöjohdot	31
6 RAKENTEELLISEN KUNNON MITTAUSMENETELMÄT	33
6.1 Maatutkamittaukset.....	33
6.2 Pudotuspainomittaus	34
7 TOIMINNALLISEN KUNNON MITTAUSMENETELMÄT	35
7.1 Laserprofilometri ja kiihtyvyysanturit	35
7.2 Laserskannaus	36
7.3 Visuaaliset menetelmät.....	37
8 TUTKIMUSMENETELMÄT	39
8.1 Street Doctor.....	39

8.2	Ohjelmistot ja aineisto.....	41
8.2.1	Road Doctor	41
8.2.2	Johtokartat ja ohjelmistot.....	41
8.3	Pintavaurioiden inventointi	43
8.4	Johtokarttojen yhdistäminen muuhun aineistoon	44
8.5	Routanousuvideot	47
9	TUTKIMUSKOHTEET	49
10	TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....	53
10.1	Alueellinen tarkastelu	53
10.1.1	Pohjoinen	53
10.1.2	Itä.....	56
10.1.3	Etelä.....	60
10.2	Tilastollinen tarkastelu	64
10.3	Kunnallistekniikka ja routanousu	69
10.4	Kevyen liikenteen väylät	71
11	JOHTOPÄÄTÖKSET	73
	LÄHTEET.....	76
	LIITE	79

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Tavanomaisen tierakenteen kerrokset	11
Kuvio 2. Asfalttityypit ja niiden käyttökohteet	12
Kuvio 3. Kahden peräkkäin ajavan ajoneuvoyhdistelmän vaikutus huokosveden paineen kasvuun tierakenteessa.....	16
Kuvio 4. Ilmastokuormitukset	17
Kuvio 5. Tien routimisen yleinen kulku	18
Kuvio 6. Kuorma-auton alusterän tai tiehöylän aiheuttamia naarmuja rengas- urien välissä urautuneella ja muista syistä halkeilleella tiellä	19
Kuvio 7. Tie- ja katurakenteiden urautumistyytit.....	23
Kuvio 8. Urien syvyyden mittausta.....	23
Kuvio 9. Halkeaman vaikutus tierakenteen vaurioitumiseen	25
Kuvio 10. Blokkihalkeamia Saksan Wertlingenissä	27
Kuvio 11. Liimauksen pettämisestä aiheutuneita vaurioita Yliopistonkadulla	28
Kuvio 12. Tukemattoman kaivannon vähimmäismitat	29
Kuvio 13. 2Mpuk- ja Mpuk-johtorakenteet ja niiden vaatimat suojatäytöt.....	32
Kuvio 14. IRI-arvot esitettynä eri mittaväleillä	35
Kuvio 15. Pistepilvimalli urakarttojen kanssa Road Doctorissa	36
Kuvio 16. Lämpökameran käyttöä päällystevaurioiden paikantamisessa	38
Kuvio 17. Road Doctor Survey Van	40
Kuvio 18. Pohjoisen alueen johtokartta AutoCAD:ssa	42
Kuvio 19. QGIS-näkymä Hillerintie-Sudentie-risteyksestä	43
Kuvio 20. Matkajängäntie plv 300-450m QGIS:ssä.....	45
Kuvio 21. Matkajängäntie plv 300-600m Road Doctorissa.....	45
Kuvio 22. Suopungin ja Matkajängäntien risteys.....	46
Kuvio 23. Maatutka-aineistoa Teollisuustieltä	47
Kuvio 24. Kuva routanousuvideosta Ruokasenkadulta	48
Kuvio 25. Tutkimuskohteet ja maalajit.....	49
Kuvio 26. Pohjoinen	50
Kuvio 27. Itä	51
Kuvio 28. Etelä.....	52
Kuvio 29. Esimerkki deformaatiosta kaukolämpöjohdon kohdalta Korkalovaaran tiellä	54

Kuvio 30. Hyväkuntoinen risteys, Hillerintie plv 200-250m.....	54
Kuvio 31. Vaaranlammentie plv 0-300m	55
Kuvio 32. Vaaranlammentie plv 70m	56
Kuvio 33. Suopunki plv 0-1550m	57
Kuvio 34. Painumia ja halkeamia Suopungin plv 975m kohdalta.....	57
Kuvio 35. Suopunki plv 100-400m	58
Kuvio 36. Suopunki plv 200m.....	58
Kuvio 37. Metsämuseontie plv 300-800m	59
Kuvio 38. Teollisuustie plv 300-600m	61
Kuvio 39. Teollisuustie plv 900-1200m	62
Kuvio 40. Poikkisuuntaisen kaukolämpöjohdon aiheuttama vaurio, Teollisuustie plv 975m	62
Kuvio 41. Pappilantie plv 900-1200m.....	63
Kuvio 42. Linja-auton aiheuttama painuma pysähtymislevikkeellä, Pappilantie plv 975m	64
Kuvio 43. Johtotyyppien vaikutus kadun kuntoon - Pohjoinen	65
Kuvio 44. Johtotyyppien vaikutus kadun kuntoon - Itä	66
Kuvio 45. Johtotyyppien vaikutus kadun kuntoon - Etelä	67
Kuvio 46. Kunnallistekniikan aiheuttamat poikkeamat (%).....	68
Kuvio 47. Routanousu, Valtakatu.....	69
Kuvio 48. Routanousu, Teollisuustie.....	70
Kuvio 49. Routanousu, Ruokasenkatu.....	71
Kuvio 50. Ounasrinteentien kevyen liikenteen väylä	72
 Taulukko 1. Poikkeamat johtotyypeittäin	 67

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

APAS	Päälysrakenteen mitoituksessa käytetty monikerros-laskentaohjelma (Tiehallinto 2005b, 11)
BCI	Base Curvature Index
GPR	Ground penetrating radar, maatulka
GPS	Global Positioning System, maailmanlaajuinen satelliit-tipaikannusjärjestelmä
InfraRYL	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset-julkaisu
IRI	International Roughness Index, kansainvälinen epätasaisuusindeksi (Saarenketo, Pyhähuhta & Munro 2001-2014c)
QGIS	Quantum GIS, vapaa paikkatieto-ohjelmisto
PEH-putki	Korkeatiheksinen polyeteeniputki
plv	Paaluväli
ppl	Pudotuspainolaite
PVC-putki	Polyvinyylikloridiputki
SCI	Surface Curvature Index
SG-valurautaputki	Pallografiittivalurautaputki
Vesijohto	Raakavesijohto

1 JOHDANTO

Roadscanners Oy on tutkinut Rovaniemen alueen pää- ja kokoojakatujen toiminnallista ja rakenteellista kuntoa yli 15 vuoden ajan. Tien normaalin väsymisen ja vaurioitumisen lisäksi on havaittu, että kunnallistekniikalla voi olla paikoin vaikutusta katujen toiminnalliseen kuntoon. Opinnäytetyön aihe valikoitui sillä, että kunnallistekniikan vaikutuksesta päällystetyn katuverkon kuntoon ei ole saatavilla tutkimustietoa. Tässä työssä käytettiin hyödyksi vain ainetta rikkomattomien tutkimusmenetelmien aineistoja.

Tämän opinnäytetyön tavoite oli selvittää kunnallistekniikan vaikutusta katuverkon kuntoon. Työssä pyrittiin selvittämään onko kunnallistekniikan rakentamisella ja ongelmilla yhteyttä katuverkon vaurioitumiseen. Työssä ei ollut tarkoitus ottaa kantaa jokaisen poikkeavuuden syihin ja seurauksiin, vaan esittää useamman eri alueen kadun alla olevat johtoverkostot ja niiden aiheuttamat poikkeamat tutkimuskohteina oleville kaduille. Lisäksi työssä oli tarkoitus selvittää eri johtotyyppien ja asennustapojen merkitystä katuverkon kunnolle. Kunnallistekniikka käsittää tässä työssä kaukolämpö-, sadevesi-, jätevesi- ja raakavesijohdot. Sähkö- ja telekaapelijohdot jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle.

Tutkimuskohteisiin kuului 12 katua, joiden yhteispituus on noin 20,5 kilometriä. Lisäksi työssä käsiteltiin suppeammin kahta kaupungin keskustassa olevaa katua. Tutkimuksen luotettavuuden takia kohteet valittiin siten, että ne sijaitsisivat mahdollisimman erilaisella maaperällä ja niissä olisi erityyppisiä tierakenteen ongelmia. Tutkimus tehtiin vain Rovaniemen katuverkon aineistosta, mutta on erittäin todennäköistä, että työssä esiin tulleet ongelmat vaivaavat katuverkkoa muuallakin Suomessa. Rovaniemen leveysasteilla tulee huomioida myös roudan vaikutus, joka on eteläistä maata suurempi.

2 ROADSCANNERS OY

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Roadscanners Oy. Se on helmikuussa 1998 Rovaniemellä toimintansa aloittanut konsulttitoimisto ja ohjelmistoalan yritys, joka harjoittaa myös mittausinstrumenttien valmistusta ja myyntiä. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Rovaniemellä, jonka lisäksi sillä on sivukonttorit Tampereella ja Helsingissä. Tämän lisäksi yrityksellä on tytäryritykset Ruotsissa, Tšekissä, Norjassa ja Yhdysvalloissa. (Halttu 2015.)

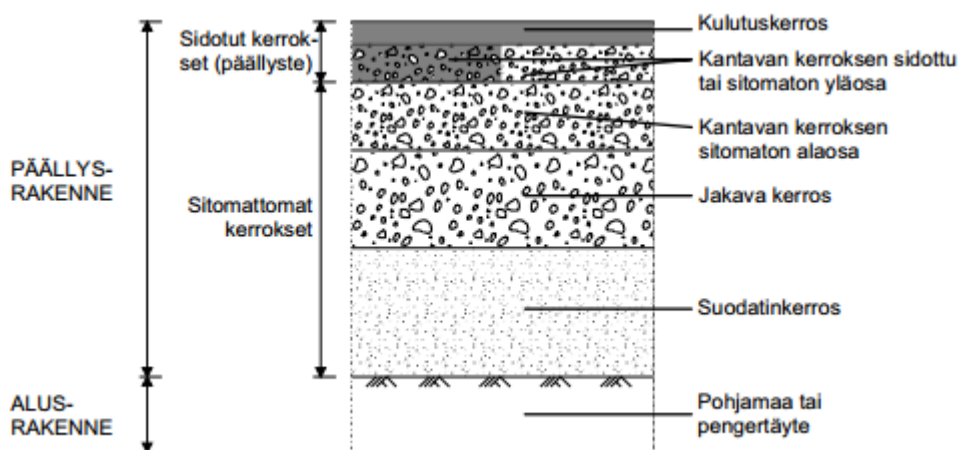
Yhtiö on globaali toimija liikenneinfrastruktuurin hallintaan ja ylläpitoon liittyvässä konsultoinnissa, ohjelmistoalalla ja tutkimus- ja mittauslaitemyynnissä. Roadscanners Oy:llä on ollut ulkomailla erilaisia mittaus-, tutkimus- ja koulutusprojekteja useimpien Euroopan maiden lisäksi mm. Yhdysvalloissa, Etelä-Afrikassa, Israelissa ja Azerbaidzanissa. Ohjelmistoja ja mittauskalustoja on toimitettu muun muassa Etelämantereesta lähtien kaikkiin maanosiin. (Halttu 2015.)

Yrityksen liiketoiminnassa on keskitytty liikenneinfrastruktuurin eli teiden, rautateiden, katujen, siltojen ja lentokenttien kunnon analyysiin, diagnostiikkaan, hoidon ohjauksen ja parantamisen suunnitteluun sekä laadunvalvontaan. Yrityksen erityisenä vahvuutena kansainvälisesti pidetään asiantuntemusta maatutkateknologiassa sekä tienrakennusmateriaalien sähköisten, mekaanisten ja kemiallisten ominaisuuksien tuntemuksessa. Uusina teknologioina on viime vuosien aikana tullut mukaan lämpökamerateknikka, laserkeilaintekniikka ja kiihtyvyyssanturit. Merkittävä osa yrityksen liiketoiminnasta suuntautuu Road Doctor® -ohjelmistoversioiden kehittämiseen, myyntiin, koulutukseen ja ohjelmistotukeen. (Halttu 2015.)

3 TIE- JA KATURAKENTEEEN KUNTO

3.1 Tierakenne

Tierakenne koostuu syvyysuunnassa alusrakenteesta ja päällysrakenteesta. Alusrakenteen tehtävä on muodostaa tasalaatuinen, kantava ja painumaton alusta päällysrakenteelle. Alusrakenne muodostuu pohjamaasta tai pengertäytteestä. Päällysrakenteen tehtävä on ottaa vastaan liikennekuormitukset ja jakaa ne alusrakenteelle mahdollisimman tasaisesti laajalle alueelle. Päällysrakenteen tulee myös rajoittaa ja pienentää routanousuja. Kuviossa 1 on esitetty tavanomainen tierakenne. (Belt, Lämsä, Savolainen & Ehrola 2002, 11.)



Kuvio 1. Tavanomaisen tierakenteen kerrokset (Belt ym. 2002, 11)

Suomessa yleisimmin käytetty päällysrakennetyyppi on niin sanottu joustava päällysrakenne. Se on kerroksellinen rakenne, jossa ylimpänä on bitumisella sideaineella sidottu joustava kerros eli päällyste. Sidottuja kerroksia yleisimmin rakenteessa ovat päällyste ja kantavan kerroksen yläosa. Sitomattomiin kerrokseen kuuluu kantava kerros, jakava kerros ja suodatinkerros. Jakavan ja suodatinkerroksen tarpeellisuus riippuu alusrakenteen laadusta. Suodatinkerros tarvitaan, kun alusrakenteen materiaali on routivaa. (Belt ym. 2002, 11.)

Kulutuskerroksella on kaksi päätehtävää; muodostaa pinta, joka on turvallinen, miellyttävä ja taloudellinen ajaa sekä minimoida veden pääsy tierakenteeseen. Lisäksi se lisää myös päällysrakenteen yläosan jäykkyyttä. Kantavan ja jakavan kerroksen tehtävä on muodostaa päällysteelle tarpeeksi jäykkä alusta, etteivät liikennekuormituksen aiheuttamat rasitukset päällysteessä kasva liian suuriksi. Lisäksi edellä mainitut kerrokset jakavat liikennekuormat siten, etteivät alusrakenteen rasitukset muodostu liian suuriksi. Jakava kerros myös kuivattaa kantavaa kerrosta. Suodatinkerros estää päällysrakenteen ja alusrakenteen sekoitumisen keskenään, katkaisee veden kapillaarisen nousun alusrakenteesta ylempiin kerroksiin sekä kasvattaa routimatonta päällysrakennepaksuutta, joka vähentää alusrakenteen routimisesta johtuvia routanousuja. (Belt ym. 2002, 11.)

Sidotut ja sitomattomat päällysrakennekerrokset eroavat siinä, että sidotut kerrokset voivat ottaa vastaan vetorasituksia. Sidotut kerrokset ovat jäykkiä, joka pienentää liikennekuormituksesta alla oleviin kerroksiin välittyviä pystysuoria jännityksiä ja jakavat jännitykset laajalle alueelle. Sidottujen kerrosten pääasiallinen sideaine on bitumi. Bitumilla sidottuja kerroksia sanotaan asfalteiksi. Kuvi-
ossa 2 on esitetty eri asfalttityypit ja niiden käyttökohteet. (Belt ym. 2002, 11.)

Asfalttityyppi	Lyhenne	Käyttökohte
Asfalttibetoni	AB	
- Kulutuskerroksen asfalttibetoni	AB	Liikennemäärältään eriluokkaiset tiet lukuunottamatta kaikkien suurimpia liikennemääriä
- Sidekerroksen asfalttibetoni	ABS	Tiet, missä on erittäin paljon raskasta liikennettä
- Kantavan kerroksen asfalttibetoni	ABK	Asfalttipäällysteiset tiet lukuunottamatta vähäliikenteisiä teitä
Kivimastiksiasfaltti	SMA	Kulutuskerros teillä, missä liikennemäärät ovat suuria
Pehmeä asfalttibetoni	PAB	Kulutuskerros alemman luokan teillä Kaksi alatyyppeä: PAB-B (entinen kevyt asfalttibetoni eli KAB) ja PAB-V (öljysoran kaltainen)
Bitumistabilointikerros	BST	Kantava kerros

Kuvio 2. Asfalttityypit ja niiden käyttökohteet (Belt ym. 2002, 13)

3.2 Katurakenne ja sen toimivuusvaatimukset

Kaduista puhuttaessa tarkoitetaan yleensä ajoratojen lisäksi jalkakäytäviä, erillisiä kevyen liikenteen väyliä, toreja ja aukioita. Tässä työssä katurakenteista kerrottaessa tarkoitetaan kuitenkin vain ajoratoja. Katurakenteeseen pätee samat asiat kuin tierakenteeseen sillä erotuksella, että katurakenne on myös kunnallisteknisten johtojen ja laitteiden sijoituspaikka. Kadun toimivuusvaatimukseen kuuluu, että katu on käyttäjälleen ja ympäristölleen turvallinen ja viihtyisä. Sen tulee tarjota liikennöinnille tasainen alusta kaikissa olosuhteissa. Kadun tulee olla riittävän kestävä liikenteelle koko rakenteen suunnitellun käyttöiän. Katurakenteeseen tulee voida sijoittaa vesihuollon, energiasiirron ja tietoliikenteen johdot, kaapelit ja muut laitteet siten, että rakenne on hoidettavissa ja ylläpidettävissä. Maapohjan ja rakenteiden on oltava riittävän kantavia sortumista, murtumista ja halkeilua vastaan. (Rakennustieto Oy 2015c, 1.)

Kadun tasaisuus muodostuu primäärisesti pituus- ja poikkisuuntaisesta tasaisuudesta. Katu tulee rakentaa siten, etteivät katurakenne ja sen alla olevan maapohjan painuminen, routiminen eivätkä käytetyt pohjarakennusratkaisut, eristerakenteet ja katuun sijoitettavat johtorakenteet aiheuta kadun pintaan haitallista pituussuuntaista epätasaisuutta. Kadun tulee kestää liikenteestä aiheutuvaa rasitusta ilman päällysteen haitallista poikkisuuntaista epätasaisuutta eli urautumista. Urautumista syntyy päällysteen kulumisesta sekä sen ja alapuolisten kerrosten ja alusrakenteen deformatumisesta. Urautumiseen voi vaikuttaa päällysteellä, kantavan ja jakavan kerroksen materiaaleilla, sisäluiskan muotoilulla ja päällysrakenteen lujiteratkaisuilla. Kadun pinnan tulee olla tasainen myös melun ja värinän minimoimiseksi. Kadun pinnan kulumisen ja vaurioituneisuus aiheuttavat renkaista aiheutuvaa meluisuutta sekä ympäristöön leviävää värinää. (Rakennustieto Oy 2015c, 6.)

Kadun tulee olla myös sivukalteva. Kadun sivukaltevuudella tarkoitetaan kadun pinnan poikittaista kaltevuutta. Suoralla osuudella kadun keskilinjaa tulee olla korkeammalla kuin pientareet ja kaarteissa ulkoreunan korkeammalla kuin sisäreunan. Tämän tarkoitus on saada vesi virtaamaan pois kadun pinnalta, jotta

kadun kuivatusjärjestelmä toimisi niin kuin pitää. Jos kadun sivukaltevuus on puutteellinen ja vesi jää makaamaan tielle, aiheuttaa se liikenneturvallisuuden heikkenemistä ja urautumisen nopeutumista. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)

3.3 Toiminnallinen ja rakenteellinen kunto

Tie- ja katuverkon kuntoa seurataan niiden toiminnallisen ja rakenteellisen kunnan avulla. Katuverkolla toiminnallisella kunnolla kuvataan sitä palvelutasoa, jota kaupunki tarjoaa asukkailleen. Sitä voidaan mitata ja sen kehitystä seurata muun muassa tasaisuuden, urautumisen ja päällystevaurioiden määrällä. (Saarenketo & Middleton 2012a, 4.)

Rakenteellinen kunto puolestaan kuvaa katuverkon omaisuusarvoa eli sitä, missä kunnossa katurakenteet ovat. Toiminnallinen ja rakenteellinen kunto ei välttämättä korreloi keskenään. Katuverkon toiminnallinen kunto voi olla hyvä, vaikka rakenteellinen kunto olisi heikko. Heikko rakenteellinen kunto laskee katuverkon kestoikää ja näin ollen nostaa kunnossapitokustannuksia ja katupäällysteiden vuosikustannuksia. (Saarenketo & Middleton 2012a, 4.)

3.4 Liikennekuormitus

Liikenne on keskeisin tietä rasittava tekijä. Liikennekuormitus voidaan jakaa ajoneuvojen painosta aiheutuviin staattisiin kuormituksiin ja ajoneuvojen liikkeistä aiheutuviin dynaamisiin lisäkuormituksiin. Liikennekuormitus synnyttää tierakenteeseen puristus-, leikkaus- ja vetojännityksiä. Tierakenteen toiminnan kannalta vaakasuora vetojännitys sidottujen kerrosten alapinnassa ja pystysuora puristusjännitys pohjamaan yläpinnassa ovat kriittisimpiä. Kasvaneiden liikennemäärien johdosta nämä jännitykset toistuvat yhä useammin aiheuttaen tierakenteen vaurioitumista. Liikennekuormituksen suuruuden kannalta merkittävin vaikutus on ajoneuvon massalla ja sen jakautumisella tierakenteeseen. Tästä johtuen liikennekuormituksen laskennallisessa käsittelyssä keskitytään yleensä vain raskaisiin ajoneuvoihin. Henkilöautojen aiheuttama rasite tiestölle on lähinnä nastarenkaiden aiheuttamaa päällysteen kulumista. (Riikonen 2014, 13.)

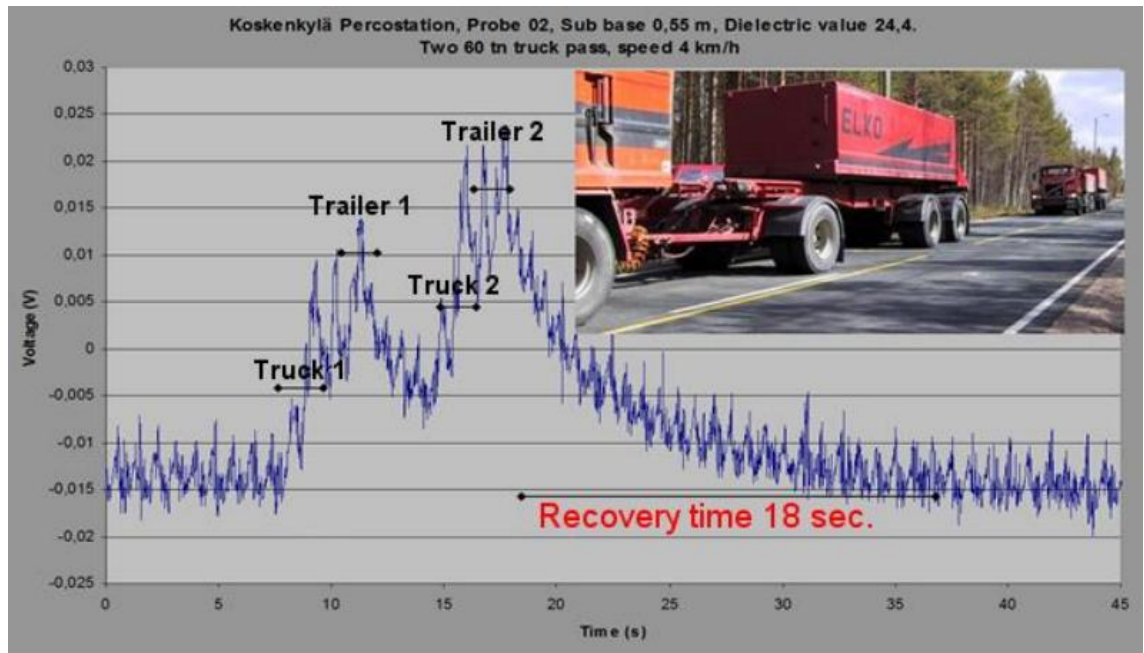
Valtioneuvoston asetus lokakuussa 2013 on mahdollistanut entistä suurempien ajoneuvojen käytön liikenteessä. Kuorma-autojen enimmäismassat nousivat noin 4-akselisena 35 tonniin ja 5-akselisena 42 tonniin. Kasvua entiseen tapahtui noin 20 prosenttia. Ajoneuvoyhdistelmien suurimmat sallitut massat nousivat 8-akselisena paripyöräperävaunun kanssa 68 tonniin ja 9-akselisena paripyöräperävaunun kanssa 76 tonniin. Jälkimmäisen suurimman sallitun massan kasvu oli jopa 46 prosenttia. Asetuksen mukaan akselille kohdistuva massa ei saa ylittää 11,5 tonnia ja telille kohdistuva massa 27 tonnia. (A 6.6.2013/407.)

Usein on sanottu, että kasvava raskaiden ajoneuvojen enimmäismassa ei aiheuta tielle vaurioita, jos akseleiden määrää lisätään painon noustessa. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa. Kolme tekijää vähentää päällysteen elinikää, jos akselien määrää lisätään:

1. Lisätty akselimäärä ajoneuvossa voi aiheuttaa paineen kasvua tierakenteen vesihuokosissa. Tämä vähentää jäykkyyttä tien sitomattoman kerroksen materiaaleissa ja voi aiheuttaa jo muutaman peräkkäisen raskaan ajoneuvon ylityskerran jälkeen deformaatiota, urautumisnopeuden kasvua ja pahimmillaan tien nopean vaurioitumisen. Kriittisin aika on kevät, kun routa alkaa sulaa ja tierakenteessa on enemmän vapaata vettä.
2. Toiseksi heikot pohjamaat eivät käyttäydy yhtä elastisesti kuin tierakenne, jolloin pohjamaa ei ehdi palautumaan pitkien ajoneuvoyhdistelmien ja lukuisten akseleiden ylityksestä. Peräkkäiset kuormitukset samalle kohdalle kasvattavat painetta pohjamaan vesihuokosissa ja näin heikentävät sitä. Tämä taas johtaa muodonmuutoksiin ja uraisuuden kasvuun.
3. Kolmanneksi kasvanut akselimäärä ajoneuvossa aiheuttaa yhä useamman rengaskuormituksen täysin samoille urille, joka johtaa urautumisnopeuden kasvuun.

(Varin & Saarenketo 2014, 14–15.)

Kuviossa 3 on esimerkki siitä, kuinka kauan tiellä voi kestää palautua ajoneuvoyhdistelmän aiheuttamasta rasituksesta. Kuviossa pystyakseli kuvaa vesihuokosten painetta ja vaakakseli aikaa.



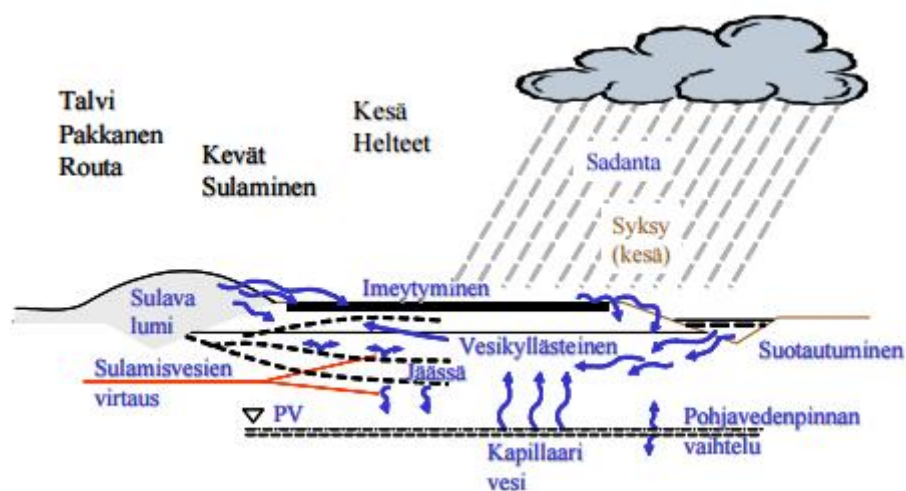
Kuvio 3. Kahden peräkkäin ajavan ajoneuvoyhdistelmän vaikutus huokosveden paineen kasvuun tierakenteessa (Varin & Saarenketo 2014, 14)

Vielä enimmäismassan kasvua enemmän tierakenteen ja päällysteen kunnon heikkenemiseen aiheuttaa raskaan liikenteen yli 350 mm leveiden yksittäispyörien käytön yleistymisen. Yksittäispyörien aiheuttama rasitus päällysteelle on paljon suurempi kuin tavallisten paripyörien aiheuttama rasitus pienemmän tien kohdistuvan kosketuspinta-alan takia. Mitä ohuempi päällyste on, sitä suurempi merkitys tällä on päällysteen urautumiseen. Urautuminen voi olla jopa 8-18 kertaa suurempaa yksittäispyörillä kuin paripyörillä. (Varin & Saarenketo 2014, 2.)

3.5 Ilmastokuormitus

Suomessa ilmastokuormituksen päätekijät ovat vuodenaikojen kiertokulkua noudattelevat lämpötila, vesi ja routa. Lämpötila vaikuttaa lähinnä sidottuihin rakennekerrokseen kun taas vesi pääasiassa sitomattomiin kerrokseen. Sidottu

kerros estää veden pääsyä tierakenteeseen, mutta pienetkin halkeamat, urat ja huono sivukaltevuus päästävät vettä tierakenteeseen. Hienorakeisissa materiaaleissa vesi voi myös nousta tierakenteeseen kapillaari-ilmiön vaikutuksesta. Roudan vaikutukset tierakenteeseen syntyvät alusrakenteen ja sitomattomien rakennekerrosten välityksellä. Kuviossa 4 on havainnollistettu lämpötilan, veden ja roudan vaikutusta tierakenteeseen. (Belt ym. 2002, 20; Dawson & Kolisoja, 2004, 20.)



Kuvio 4. Ilmastokuormitukset (Belt ym. 2002, 20)

Routaan liittyy kaksi tien toimintaan vaikuttavaa ilmiötä: routaantuminen ja routiminen. Routaantumisella tarkoitetaan tierakenteen jääymistä ja jääymisen etenemistä tierakenteessa, kun taas routimisella tarkoitetaan sellaista maan jääymistä eli routaantumista, jonka yhteydessä maan tilavuus kasvaa ja tilavuuden kasvun seurauksena tapahtuu maarakenteen pinnassa niin sanottua routanousua. Routanousua alkaa muodostua tiessä siinä vaiheessa, kun routiva alusrakenne alkaa jäätyä ja routanousu palautuu, kun alusrakenne sulaa. Maan tilavuuden kasvu ja routanousu aiheutuvat routivaan maahan alapuolisista maakerroksista ja pohjavedestä imeytyvän ja rakenteessa olevan veden jääymisestä. Routanousun saavat aikaan jäätyvän veden routivaan maahan muodostavat jäälinsit. Kuviossa 5 on esitetty routimisen yleinen kulku tierakenteessa. (Belt ym. 2002, 20–21.)

saada kunnolla pois. Tiehöylät ja alusterät sen sijaan voivat rikkoa päällystettä, kuten kuviossa 6 on esitetty. Lisäksi esimerkiksi huono sivukaltevuus mutkissa, heitot ja reunadeformaation aiheuttama tien romahtaminen sekä talvella jäätyneet urat voi aiheuttaa tieltä suistumisia. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)



Kuvio 6. Kuorma-auton alusterän tai tiehöylän aiheuttamia naarmuja rengasurien välissä urautuneella ja muista syistä halkeilleella tiellä (Saarenketo ym. 2001 – 2014c)

4 PÄÄLLYSTEEN VÄSYMINEN JA VAURIOITUMINEN

4.1 Lineaarielastinen väsyminen

Tarkasteltaessa lineaarielastista väsymistä, täytyy ensin ymmärtää termit venymä ja jännitys. Venymällä tarkoitetaan materiaalin pituuden muutosta suhteessa alkuperäiseen pituuteen. Elastisessa materiaalissa venymä kasvaa lineaarisesti jännityksen kasvaessa. Jos materiaali olisi täysin elastista, jännityksen pienentyessä venymä palautuisi täysin samaan alkupisteeseen kuin ennen jännitystä. Tienrakennusmateriaalit eivät kuitenkaan koskaan ole täysin elastisia. Tästä johtuen jokaisen kuormituksen tuloksena niissä syntyy jonkin verran pysyviä muodonmuutoksia. Venymä määritellään tietyssä pisteessä, kun taas muodonmuutos muutoksena itsessään. Ohimenevän ajoneuvon aiheuttama vaikutus päällysteelle on pystysuuntaista siirtymää eli taipumaa. Pinnan taipuma on kaikkien vertikaalisten venymien summa jokaisessa pisteessä pinnan alla. Nämä voivat olla puristus-, veto-, leikkaus-, taivutus- tai vääntövoimista johtuvia. Lineaarielastinen väsyminen eli palautuva muodonmuutos tarkoittaa siis sitä, että vaikka kuormitus ei ylittäisikään rakenteen rikkoutumisen aiheuttavaa jännitystason rajaa, tarpeeksi monta kertaa toistuva kuormitus aiheuttaa lopulta myös pysyvää muodonmuutosta. (Saarenketo, Pyhähuhta & Munro 2001 – 2014a.)

Mitä ohuempi päällyste, enemmän ylityskertoja ja raskaampi kuorma, sitä nopeammin päällyste väsyä ja vaurioita syntyy. Uudella päällystetyllä tiellä väsyminen voi tarvita miljoonia ylityskertoja, jonka vuoksi tätä vaurioitumismallia tapahtuu vain vilkkaasti liikennöidyillä teillä. Yleisimmät päällysteen väsymisen aiheuttamat vauriotyypit ovat urautuminen, halkeamat urien kohdalla, verkko-halkeamat ja top down cracking. (Saarenketo, Matintupa & Kourim 2012.)

4.2 Pysyvät muodonmuutokset

Kun päällyste ei palaudu enää ennalleen siihen kohdistuvan jännityksen poistuttua, puhutaan pysyvästä muodonmuutoksesta. Kuten edellisessä luvussa ker-

rottiin, pysyvää muodonmuutosta tapahtuu pienessä määrin kuormitussykliä ollessa vaurioita aiheuttavan jännitystason alapuolella. Suurin osa pysyvistä muodonmuutoksista kuitenkin tapahtuu, kun vaurioita aiheuttava jännitystaso ylitetään. Jos kuormituksen aiheuttama jännitystaso ylittää 80 %, syntyy pysyviä muodonmuutoksia ja jos alle 80 %, päällyste palautuu lähes täysin alkuperäiseen tilaansa (Dawson & Kolisoja, 2004). Tärkeimmät pysyvien muodonmuutosten kertymisnopeuteen vaikuttavat tekijät ovat rakeisuusjakauma, tiivistysaste, materiaalin sisältämä vapaan veden määrä ja jännitysolosuhteet, joille materiaali altistuu. Pysyvät muodonmuutokset eivät ole riippuvaisia ylityskerroista, vaan jo muutama raskaan liikenteen kulkuneuvon ylitys voi aiheuttaa pysyvän muodonmuutoksen. Suurin osa näistä tapahtuu keväisin roudan sulamisen aikana. (Saarenketo ym. 2001 – 2014a; Saarenketo ym. 2012.)

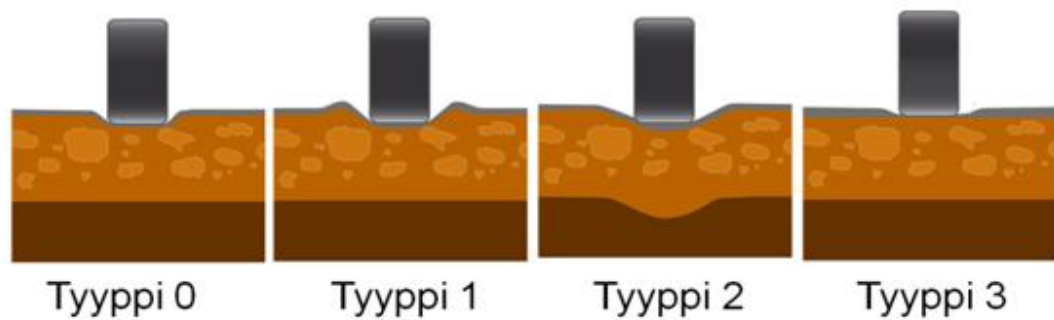
4.2.1 Poikkisuuntaiset epätasaisuudet

Tien epätasaisuudet voidaan jakaa kahteen luokkaan: poikkisuuntaiseen epätasaisuuteen ja pituussuuntaiseen epätasaisuuteen. Poikkisuuntaisella epätasaisuudella eli urautumisella tarkoitetaan päällysteen kulumista sekä päällysteen, sitomattomien päällysrakennekerrosten ja alusrakenteen pysyviä muodonmuutoksia. Urautumista esiintyy tiellä pyörien kulku-urien kohdilla. Urautuminen voidaan jakaa vielä päällysteen kulumiseen ja pysyviin muodonmuutoksiin. Päällysteen kuluminen johtuu lähinnä nastarenkaiden käytöstä talviolosuhteissa ja runkokiviaineksen ominaisuuksista. Pysyvät muodonmuutokset ovat lähes täysin raskaan liikenteen aiheuttamaa. Liikennekuormitus aiheuttaa leikkausjännityksen tien pintaan, joka synnyttää plastista deformaatiota. Sille on tunnusomaista materiaalin siirtyminen sivusuunnassa. Toinen pysyvien muodonmuutoksien syntytapana on tiivistyminen, joka johtuu raskaan liikenteen aiheuttamasta jälkitiivistymisestä. Plastista deformatumista päällysteissä esiintyy eniten kohteissa, jossa raskaan liikenteen nopeus on alhainen kuten esimerkiksi linja-autopysäkeillä ja liittymissä. (Belt ym. 2002, 21–22.)

Poikkisuuntainen epätasaisuus eli urautuminen on yhdessä pystysuuntaisen epätasaisuuden kanssa tärkeimpinä pidettyjä muuttujia, jotka vaikuttavat tien

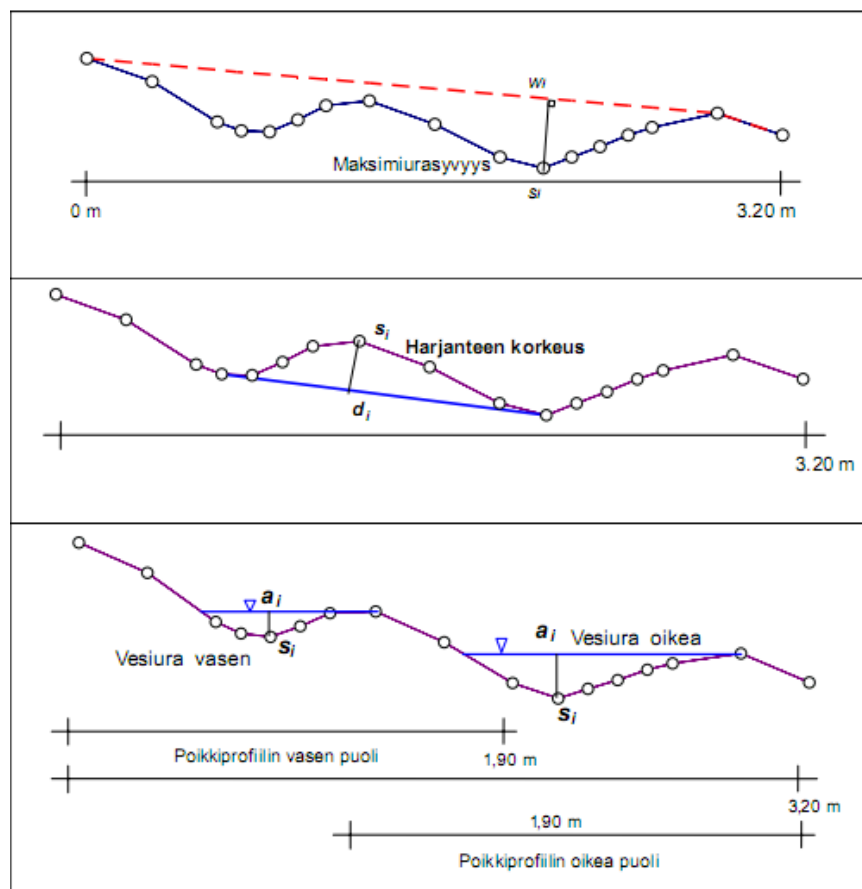
toiminnalliseen kuntoon ja palvelutasoon. Urautuminen johtuu päällysteen ja päällysrakenteen poikkisuuntaisista epätasaisista painumista. Urat voivat aiheuttaa liikenneturvallisuusongelmia sadekelillä, kun urat täyttyvät vedellä aiheuttaen vesiliirtoriskin. Urat myös kuluttavat autojen renkaita epätasaisesti ja tekee ajosta epämukavampaa. Tien urautuminen voidaan jakaa neljään tyyppiin (Kuvio 7), jotka ovat:

- Tyyppe 0: Urautuminen johtuu vedellä kyllästymättömien materiaalien tiivistymisestä, jonka syynä on katurakenteen tai päällysteen puutteellinen tiivistäminen. Tämä urautumistyyppi voi olla myös hyödyllinen. Ylityskerrat eri kohdista aiheuttavat materiaalien tiivistymistä ja näin ollen jakavat kuormaa tierakenteelle paremmin. Tämä taas johtaa pienempään rasitukseen pohjamaassa.
- Tyyppe 1: Urautuminen johtuu katurakenteen yläosassa tapahtuvista muodonmuutoksista, jotka voivat johtua muun muassa liian ohuesta tai huonolaatuisesta päällysteestä suhteessa raskaan liikenteen määrään tai huonolaatuisesta kantavan kerroksen materiaalista. Tässä tyypissä pohjamaan pinnalla ei tapahdu deformaatiota. Tämän tyypin urautuminen on yleistä pohjoisilla alueilla keväisin, kun routa alkaa sulaa. Tätä voidaan ennaltaehkäistä ja korjata esimerkiksi käyttämällä parempia kantavan kerroksen materiaaleja, tiivistämällä oikein ja parantamalla kuivatusta.
- Tyyppe 2: Urautuminen johtuu katurakenteen ja pohjamaan rajapinnassa tapahtuvista muodonmuutoksista. Nämä ongelmat liittyvät usein huonosti kantaviin ja routiviin pohjamaihin kuten silttiin ja silttiseen moreeniin. Tämän tyypin urautumista tapahtuu muutaman viikon ajan keväisin sulamisen aiheuttaman ylimääräisen kosteuden seurauksena.
- Tyyppe 3: Urautuminen johtuu päällysteen kulumisesta. Pohjoisessa tämä johtuu yksinomaan nastarenkaiden aiheuttamasta kulumisesta. (Dawson & Kolisoja, 2004,13 – 16; Saarenketo, Pyhähuhta & Munro 2001 – 2014b.)



Kuvio 7. Tie- ja katurakenteiden urautumistyytit (Saarenketo ym. 2001 – 2014b)

Urautumista kuvaavat indeksit eli uraisuusparametrit ovat tärkeitä pysyvien muodonmuutosten indikaattoreita. Kuviossa 8 on esitetty kolme yleistä tapaa mitata ja esittää urien syvyys. Nykyisin uraisuutta voidaan mitata ja esittää myös lasertekniikan avulla.



Kuvio 8. Urien syvyyden mittaus. Ylimpänä lanka-malli, keskimmäisenä harjaneuralaskentamenetelmä ja alimmaisena vesiuramalli (Mukaillen Tiehallinto 2007, 30,32,34)

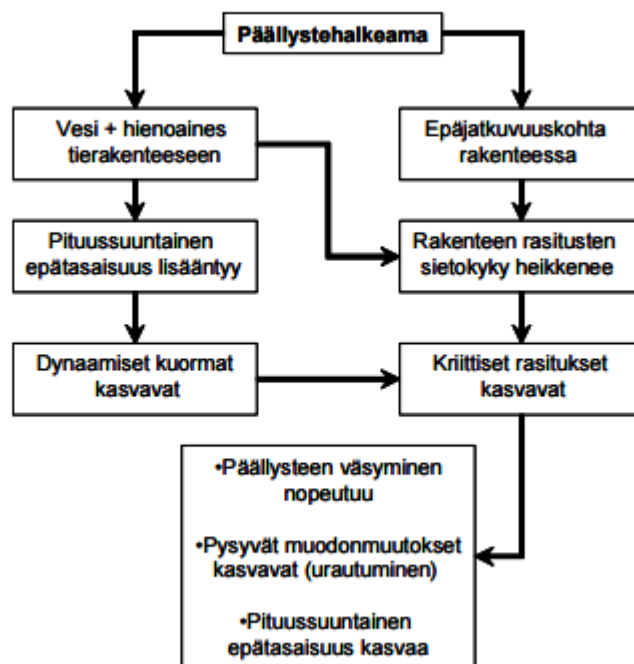
4.2.2 Pituussuuntaiset epätasaisuudet

Pituussuuntainen epätasaisuus on routanousujen ja tierakenteen oman painon aiheuttamia painumia, halkeamia ja reikiä. Sitä kuvataan IRI-arvona (International Roughness Index, kansainvälinen epätasaisuusindeksi) (Saarenketo, Pyhähuhta, Munro 2001-2014c). Painumat johtuvat pohjamaan kokoonpuristumisesta ja sitä esiintyy pääasiassa heikoilla pohjamailla kuten savella ja turpeella. Liikennekuormitus lisää pituussuuntaisen epätasaisuuden kehittymistä dynaamisten rasitusten kautta varsinkin silloin, kun jo esiintyy muista syistä johtuvaa pituussuuntaista epätasaisuutta. Myös pohjamaamateriaalien ja olosuhteiden vaihtelu, päällysteen deformaatio, tierakenteen epäjatkuvuuskohdat kuten rummut ja päällysrakenteen epähomogeenisuus eli rakennepaksuuksien erot, materiaalien vaihtelut sekä puutteellinen ja epätasainen tiivistys aiheuttaa pituussuuntaista epätasaisuutta. Suomessa pääsyy pituussuuntaisille epätasaisuuksille on routiminen. Epätasaisuudet ilmenevät yleensä aaltomaisina painumina, lyhyinä routa- ym. kohoumina ja jyrkkinä porrastuksina vanhaan päällysteeseen tai muuhun rakenteeseen liityttäessä. (Belt ym. 2002, 49–50; Tiehallinto 2009, 14.)

4.3 Päällysteen vaurioituminen

Päällystevaurioilla tarkoitetaan tien rakenteen muodonmuutoksia, rikkoutumia ja muita liikennettä häiritseviä, vaarantavia tai tien rakennetta vaarantavia tien pintavikoja, epätasaisuuksia ja pintakuivatusongelmia aiheuttavia päällysteen tai aiemman paikkauksen aiheuttamia kaltevuusvirheitä. Vaurioita päällysteelle aiheuttaa muun muassa säätekijät, routiminen, heikko kantavuus, liikennesäätökset, materiaali- ja työvirheet, karkeutuksen puuttuminen sekä materiaalien kemiallinen vanheneminen. Monien vaurioiden syntyä voidaan hidastaa tien hoidolla. Suurin päällysteen vaurioitumista nopeuttava tekijä on tien märkyys. Päällysteen pintakuivatusta voidaan parantaa muun muassa poistamalla tien reunapalteet sekä työntämällä kevättalvella päällystettä märkänä pitävät au-rauslumivallit luiskaan ja tekemällä paikkaukset niin, ettei lammikoita pääse paikkauskohtiin syntymään. (Tiehallinto 2009, 12.)

Kunnossa oleva tierakenne toimii yhtenä kokonaisuutena. Näin ollen muutos missä tahansa kerroksessa vaikuttaa koko rakenteen toimintaan. Yksittäinen vaurio nopeuttaa yleensä myös toisten tyyppisten vaurioiden syntymistä. Esimerkiksi halkeama tasaisellakin tiellä muodostaa tiehen epäjatkuvuuskohdan, missä liikenteen aiheuttama rasitus on suurempi kuin muualla. Tämä nopeuttaa päällysteen väsymistä, urautumista ja pituussuuntaisen epätasaisuuden kasvua. Rasitusta lisää myös halkeaminen tavanomainen ulottuminen syvälle tierakenteeseen. Tällöin liikenteen aiheuttamat kriittiset rasitukset tierakenteelle kasvavat. Tämän lisäksi halkeamien kautta tierakenteeseen pääsevä kosteus ja hienoaines kasvattavat kriittisiä rasituksia edelleen. Tämä prosessi on esitetty kuviossa 9. (Belt ym. 2002, 65.)



Kuvio 9. Halkeaman vaikutus tierakenteen vaurioitumiseen (Belt ym. 2002, 65)

Kuivatusongelmat ovat yleisin syy päällysteen pysyviin muodonmuutoksiin. Vuotavat kunnallistekniikan johdot ja salaojaputket ovat yksi merkittävä tekijä katualueilla päällystevaurioihin. Lisäksi suunnittelu- ja rakennusvirheet kuten liian ohuet kerrokset, huonot materiaalit, huonosti rakennetut rummut ja siirtymäkiilat ja huono tiivistys aiheuttavat vaurioita päällysteille. (Saarenketo ym. 2012.)

4.4 Vauriotyypit

4.4.1 Halkeamat

Halkeamat voidaan jakaa pituus-, poikki-, sauma- ja verkkohalkeamiin. Halkeamiset johtuvat routimisesta, painumisesta, lämpötilamuutoksiin liittyvistä jännityksistä ja raskaan liikenteen aiheuttamista rasituksista. Pituushalkeamat aiheutuvat ajoradan keskiosan reunoja suuremmasta routanoususta tai muuten epätasaisesta routimisesta ja painumisesta sekä tien reunoilla myös liian jyrkästä luiskasta, kun taas poikittaishalkeamien syynä on lähinnä päällysteen tai päällysrakenteen kutistuminen pakkasella. Saumahalkeamia syntyy päällystelaattojen saumakohtiin lähinnä tien keskilinjalle ja reunoille routanousun takia. Verkkohalkeamia esiintyy erityisesti yksikerroksisissa päällysteissä. Ne ovat monikulmaisia repeämiä, joiden syynä on tavallisesti puutteellinen kantavuus tai päällysteen alla olevan sitomattoman kantavan kerroksen liian suuri hienoainespitoisuus. Verkkohalkeamia syntyy lähinnä päällysteen väsymisen johdosta, kun tien liian suuri liikennekuormitus aiheuttaa rakenteellisen kestoiän ylityksen. (Belt ym. 2002, 39–40; Tiehallinto 2009, 14–15.)

Pituussuuntaiset routahalkeamat voivat keskilinjan lisäksi syntyä päällysteen reunoille. Tällöin puhutaan reunadeformaatiosta. Syntymismekanismi on sama molemmissa. Edellä mainittujen halkeamistyyppien lisäksi halkeamatyyppejä ovat myös ”top down cracking”, blokkihalkeama ja heijastushalkeama. Top down cracking on yksittäispyörillä varustettujen rekkojen aiheuttama uriin tuleva halkeama, joka johtuu liian suurista jännityksistä. Vastoin aiempaa käsitystä, päällyste ei aina halkea alareunastaan ja nouse sieltä päällysteen pintaan, vaan top down crackingissä prosessi alkaa päällysteen sisäلتä. Tästä halkeama nousee päällysteen pintaan ja vasta sitten päällysteen alareunaan. Blokkihalkeamat (kuvio 10) ovat päällysteen halkeamia, jotka johtuvat muun muassa jäykästä sementillä sidotusta kantavasta kerroksesta, joka ei kestä liikenteen kuormitusta tai pohjamaan muodonmuutoksia tai päällysteeseen asennetuista teräsverkoista routivan pohjamaan päällä. Heijastushalkeamat ovat tien väärin suoritettun

leventämisen ja siitä johtuvan routakäyttötymisen tai painuman aikaansaamia halkeamia. (Saarenketo 2014.)



Kuvio 10. Blokkihalkeamia Saksan Wertlingenissä (Saarenketo 2014)

4.4.2 Avoimet kohdat, purkaumat, reiät ja liimauksen pettäminen

Avoimia kohtia päällysteen pintaan aiheuttavat massan lajittuminen päällystämisen aikana sekä hienoaineksen ja bitumin muodostaman mastiksin kulumisen päällysteen pinnasta. Purkautumisella tarkoitetaan kiviaineksen irtoamista päällysteestä. Purkaumat muodostavat vähitellen kuopan, joka voi olla laaja ja loivareunainen tai pieni ja jyrkkäreunainen. Purkaumat laajenevat yleensä nopeasti, aiheuttaen kasvavan liikennehaitan. Pitkälle kehittyneitä jyrkkäreunaisia purkaumia kutsutaan rei'iksi. Niitä esiintyy yleensä useita lähekkäin. Purkautumiset voivat johtua esimerkiksi päällystemassan lajittumisesta, liian pienestä sideainepitoisuudesta, puutteellisesta liimauksesta, liian pienestä kerrospaksuudesta maksimiraekokoon verrattuna, massan puutteellisesta jäätymis- sulamiskestävyydestä, saumojen puutteellisesta tiivistämisestä, huonoista rakentamisolosuhteista, puutteellisesta kuivatuksesta tai päällysteen alustavirheistä. (Tiehallinto 2009, 14.)

Liimauksen pettämisellä päällysteen vauriotyyppinä tarkoitetaan sitä, että vanhan päällysteen päälle liimattu uusi päällyste ei kestä siihen kohdistuneita rasituksia. Tämä on puhtaasti raskaan liikenteen aiheuttamaa, ja sitä ilmenee erityisesti teiden ylämäissä, notkojen pohjilla ja mutkien sisäkaarteissa raskaan liikenteen kiihdyttäessä ja jarruttaessa aina samoissa kohdissa. Päällysteen liimaus voi pettää esimerkiksi silloin, kun uusi päällyste on liimattu vanhan päälle sateen aikana. (Saarenketo 2014.)

Kuviossa 11 on esimerkki liimauksen pettämisestä aiheutuneesta päällystevauriosta. Kuva on tässä työssä tutkimuskohteena olevalta Yliopistonkadulta, Rovaniemellä. Vauriota on paikattu kaivonkannen ympäriltä.

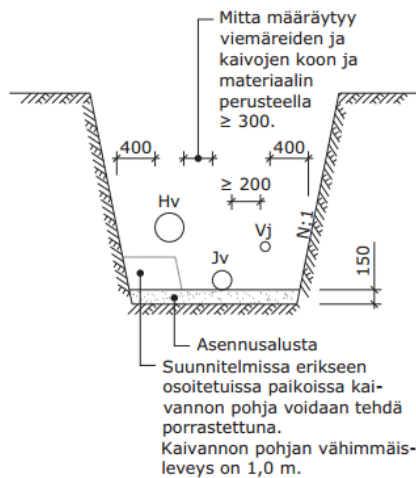


Kuvio 11. Liimauksen pettämisestä aiheutuneita vaurioita Yliopistonkadulla (Rytilahti 2015)

5 KUNNALLISTEKNIikka KATUVERKOSSA

5.1 Vesi-, viemäri- ja sadevesijohdot

Vesi-, viemäri- ja sadevesijohdot asennetaan samojen maanrakennusohjeiden mukaisesti. Kaivantojen leveys määräytyy putkien ulkohalkaisijan, putkien välisen keskinäisen etäisyyden ja putkien ulkoreunan ja kaivannon seinämän välisen etäisyyden perusteella kuvion 12 mukaisesti. Painumisominaisuuksiltaan erilaisten maakerrosten ja kokoonpuristuvan maakerroksen rajakohdassa kaivu tulee ulottaa siirtymäkiilan rakentamiseksi vähintään 0,5 metriä normaalin kaivutason alapuolelle. Kaivannon pohja tulee tiivistää alusrakennetta vastaavaksi kaivuepätasaisuuudet tasattava kadun suodatinkerroksen hiekalla. (Rakennustieto Oy 2015d, 5–6.)



Kuvio 12. Tukemattoman kaivannon vähimmäismitat (Rakennustieto Oy 2015a, 9)

Asennusalustan materiaali valitaan siten, että se täyttää kaikki eri putkien vaatimukset. Asennusalustan materiaali on hiekkaa, soraa tai mursketta riippuen putkityypistä. Betoniputkille suurin sallittu raekoko on 32 mm (tierakenteissa 63 mm), kun taas muovi- ja teräsputkille 10 % putken nimellismittasta siten, että DN <200 putkille suurin sallittu raekoko on 20 mm ja DN >600 putkille 63 mm. Putkikaivannon täyttömateriaalin tulee olla sellaista, ettei se vahingoita putkia tai liitosmateriaaleja. Alkutäyttömateriaalin tulee olla liikennealueella routimatonta

kuten hiekkaa, soraa tai mursketta, jonka vuoksi savea, liejua tai turvetta ei tule käyttää. Tiivistys tulee tehdä kerroksittain. Kerrospaksuus riippuu putken koosta, materiaalista ja käytettävästä tiivistyskoneesta. Tiivistystä jatketaan, kunnes täyttö ulottuu 300 mm putken laen yläpuolelle. Lopputäyttömateriaalin tulee vastata routimisominaisuuksiltaan kaivannosta poistettua materiaalia. Liikennöitävällä alueella lopputäyttöön käytetään yleisesti kaivumaita. Kaivanto tulee täyttää siten, että täyttö asettuu myöhemmin tiivistyessään ympäröivän maanpinnan korkeuteen. (Rakennustieto Oy 2015b, 1, 4, 18.)

Rovaniemellä on käytetty 1950-luvulta lähtien betonia ja valurautaa putkimateriaaleina. Runkolinjoissa käytetään vielä tänäkin päivänä SG-valurautaputkia. Muutoin muovi on syrjäyttänyt muut materiaalit. Muovin käyttö alkoi yleistyä 1970-luvulta lähtien. Ensiksi käytettiin PVC-putkia, joista siirryttiin 1990-luvulla PEH-putkiin. Vesijohdot asennetaan routarajan alapuolelle, yleensä noin 2,7 metriin. Viemäri- ja sadevesijohdot asennetaan vesijohtojen yläpuolelle. Vesijohdoissa kulkeva raakavesi on noin 6 °C lämpöistä, kun taas jätevesi on huomattavasti lämpimämpää. (Kontsas 2015.)

Napapiirin Energia ja Vesi Oy tekee Rovaniemellä noin puolet uusien johtojen asennuksesta ja vanhojen peruskorjauksesta itse ja urakoitsijat toisen puolen. Urakoitsijan työtä valvotaan kaupungin toimesta. Kunnallistekniikan työntekijät ovat jo suunnitteluvaiheessa mukana uusia katuja suunniteltaessa. Kaikki asennus- ja korjaustyöt tehdään InfraRYL:n ja putkivalmistajien asennusohjeiden mukaisesti. Vuotovesimäärä Rovaniemen vesijohtoverkossa vuonna 2015 oli noin 20 %. Tämä voitiin todeta laskemalla pumpatun vesimäärän suhde myytyyn vesimäärään. Valurautajohdoissa vuotojen aiheuttaja on yleisesti syöpyminen, kun taas muoviputkissa materiaalin osuus vuotoihin on mitätön. Muoviputkista tehdyissä johdoissa vuotoja aiheuttavat putkien saumakohdat. Napapiirin Energia ja Vesi tekee jokaisesta uudesta saumasta laadunvarmistuskokeen ja siitä raportin. Lisäksi paineellisille johdoille tehdään painekokeet. Vuotopaikoissa Napapiirin Energia ja Vesi itse paikkaa kadun alkuperäiseen kuntoon, käyttäen täyttömaana mahdollisimman paljon samaa maata, joka kaivettiin putken

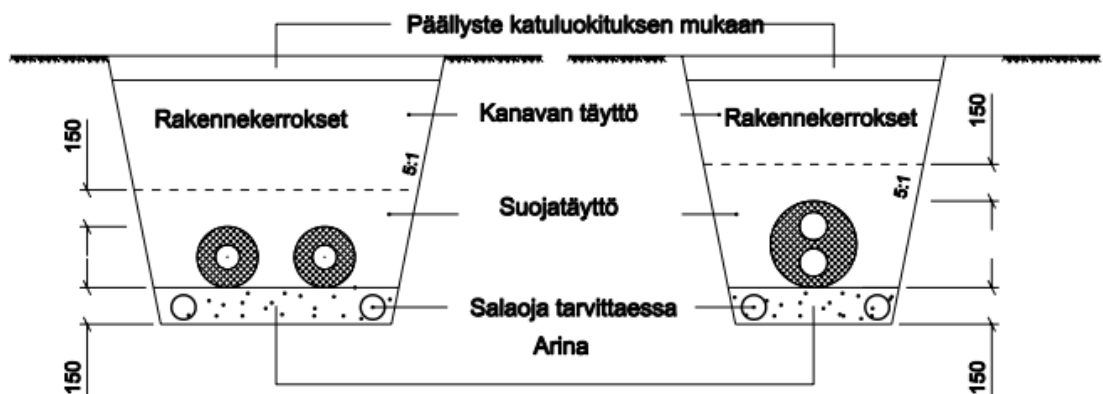
ympäriä pois. Tämän tarkoitus on pitää maaperä mahdollisimman homogeenisenä, ettei korjauskohtaan muodostuisi jatkossa ongelmia. (Kontsas 2015.)

5.2 Kaukolämpöjohdot

Kaukolämpöjohdot jaotellaan niiden käyttötarkoituksensa mukaan siirto- eli pääjohtoihin, jakelu- eli korttelijohtoihin ja liittymis- eli tonttijohtoihin. Pääjohdot siirtävät kaukolämmön lämmöntuotantolaitokselta kulutusalueelle. Korttelijohdot haarautuvat siirtojohdoista ja siirtävät kaukolämmön yksittäisten kuluttajien lähetyville. Tonttijohdot taas haaroitetaan kulutusalueen jakeluverkosta yksittäisille kuluttajille lämmönjakohuoneisiin. Putkien koot vaihtelevat pääjohtojen DN 100 – DN 800:sta korttelijohtojen DN 40 – DN 300:aan ja tonttijohtojen DN 20 – DN 100:aan. (Tiehallinto ja Energiateollisuus ry 2005, 12.)

Kaukolämpöjohtorakenteet voidaan jakaa kiinnivaahdotettuihin johtoihin (Mpuk, 2Mpuk), betonielementtikanaaviin (E) asennettaviin johtoihin sekä vapaasti suojaputkessa liikkuviin johtoihin (Mpul). Kiinnivaahdotetut johdot ovat olleet 1980-luvun alun jälkeen käytännössä ainoa käytetty rakennetyyppi. Tässä rakenteessa on polyuretaanieristeellä liitetty kiinteästi yhteen virtausputki ja polyeteenisuojakuori. Mpuk-rakenteessa sekä meno- että paluuputki ovat yhden suojakuoren sisällä, kun taas 2Mpuk-rakenteessa sekä meno- että paluuputkille on oma johtonsa. Betonielementtikanaavissa on kaksi teräksistä virtausputkea, joiden pinnassa on vuorivillaeriste. Tätä rakennetta on käytetty 1980-luvulle asti lähinnä pääjohdoille. Mpul-rakenteessa on Mpuk- ja 2Mpuk-johtojen tapaan polyteeninen suojakuori, polyuretaanieriste sekä teräksinen virtausputki. Rakente eroaa kiinnivaahdotetusta rakenteesta sillä, että putket liikkuvat vapaasti eristyksen sisällä. E- ja Mpul-rakenteiden osuus on nykyisin noin 10 % maassa olevista rakenteista. (Tiehallinto ja Energiateollisuus ry 2005, 12–13.)

Kaukolämpöjohdot asennetaan rikkoutumisten välttämiseksi kaivantoihin kuvion 13 mukaisesti siten, että kaivannon pohjalle tulee 150 mm kerros 0–16 mm hiekkaa, johdon ympärille vähintään 150 mm suojaputken yläpinnan yläpuolelle suojatäyttöksi 0–16 mm hiekkaa ja kanavan täyttöksi kohteesta kaivettua maainesta siksi, että kadun rakennekerrokset pysyisivät homogeenisinä. Suojatäyttö ja kanavan täyttö on aina tiivistettävä tärylevyllä. (Energiateollisuus ry 2013, 24–25.)



Kuvio 13. 2Mpuk- ja Mpuk-johtorakenteet ja niiden vaatimat suojatäytöt (Tiehallinto ja Energiateollisuus ry 2005, 39)

6 RAKENTEELLISEN KUNNON MITTAUSMENETELMÄT

6.1 Maatutkamittaukset

GPR- eli maatutkamittaukset ovat rakennetta rikkomaton tutkimusmenetelmä, jolla voidaan tutkia muun muassa teitä, rautateitä, siltoja, lentokenttiä ja ympäristökohteita. Maatutkamittaus perustuu tutka-antennilla lähetettävään lyhyeen sähkömagneettiseen pulssiin, joka tunkeutuu materiaaliin. Sähkömagneettisen aallon kohdatessa erilaisen dielektrisyyden omaavien aineiden rajapinnan, osa aallosta heijastuu takaisin pintaan ja antenni vastaanottaa sen takaisin. Loppu aaltoenergiasta jatkaa syvemmillä oleviin kerroksiin ja lisäksi aalto voi sirota eri suuntiin. Materiaalin dielektriset ominaisuudet saadaan heijastuneiden pulssien amplitudista, kulkuaikaerosta ja taajuudesta. Menetelmässä tallentuu tutkan heijastussignaali, josta saadaan tieto heijastukseen käytetystä ajasta ja heijasteen amplitudista. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)

Maatutkamittauksissa käytetään ilmastevaste- ja maavasteantenneja. Ilmastevasteantenni asennetaan normaalisti noin 40–50 senttimetrin korkeudelle päällysteen pinnasta. Tällöin antennin ominaisuudet eivät muutu, vaikka päällysteen ominaisuudet muuttuisivatkin. Tämä tekee mittauksista toistettavia ja vertailukelpoisia. Maavasteantenni asennetaan mahdollisimman lähelle päällysteen pintaa, jotta suurin osa lähetetystä energiasta saadaan suunnattua tierakenteen sisään. Tällöin saavutetaan suurempi tunkeutuvuus. Maatutkamittauksissa käytetään eri aallonpituuksia ja antennitaajuuksia sen mukaan, mitä kerroksia halutaan tutkia. Päällystettä ja ylimpiä kerroksia tutkittaessa käytetään korkeataajuuksisia antennia, joissa on lyhyt aallonpituus, koska niillä voidaan erottaa ohuita kerroksia. Näiden 1,0–2,5 GHz antennien tunkeutumisvyvyys on noin 0,5–1,2 metriä. Matalataajuisilla 400–500 MHz antennilla tunkeutumisvyvyys taas on 1,5–4,0 metriä. Niitä käytetään koko tierakenteen tutkimiseen. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)

Maatutkamittauksella saatavasta aineistosta voidaan laskea esimerkiksi päällysteen ja tierakenteen paksuus, kerrosten rajapinnat ja paikallistaa tien ongel-

makohtia, kuten jäälinsit routa-aikaan ja routaraja. Lisäksi siitä voidaan tehdä arvioita pohjamaan laadusta sekä paikallistaa turvealueiden, kallioiden, rumpujen ja putkien sijainnit. Menetelmän etuna on mittauksen tuloksena saatava jatkuva profiili tierakenteesta ja pohjamaasta sekä se, että se ei aiheuta haittaa muulle liikenteelle. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)

6.2 Pudotuspainomittaus

Pudotuspainomittauksella mitataan tien pinnan taipumia ja saaduista tuloksista voidaan laskea tien kantavuus. Pudotuspainolaite eli ppl koostuu painosta, joka pudotetaan ennaltamääritetyltä korkeudelta tietyn halkaisijan omaavalle kumivaimentimilla varustetulle kuormituslevylle. Paino on suunniteltu simuloimaan ohittavan raskaan ajoneuvon aiheuttamaa rengaskuormitusta. Yleisimmin käytetty kuormitus on 50 kN 300 mm halkaisijaltaan olevalla levyllä. Taipuma mitataan geofoneista, joita on sijoitettu eri etäisyyksille kuormituslevyn keskeltä luki-en. Ppl-aineistosta voidaan laskea SCI- (Surface Curvature Index) ja BCI-arvoja (Base Curvature Index), jotka ovat hyviä parametreja määriteltäessä tyyppin 1 ja 2 urautumista. SCI-arvo lasketaan vähentämällä taipuma-arvo D200 taipuma-arvo D0:sta. Tällöin saadaan tieto päällysteen ja sitomattoman kantavan kerroksen yläosan jäykkyydestä. BCI-arvo taas lasketaan vähentämällä taipuma-arvo D1200 taipuma-arvo D900:sta. Tämä on hyvä indikaattori kertomaan, miten tierakenne jakaa pyöräkuormitusta heikolla pohjamaalla ja vähentää pysytysuoria jännityksiä tierakenteen ja pohjamaan rajapinnassa. Korkea SCI-arvo kertoo urautumistyyppi 1:n riskistä, kun taas korkea BCI-arvo korkeasta urautumistyyppi 2:n riskistä. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)

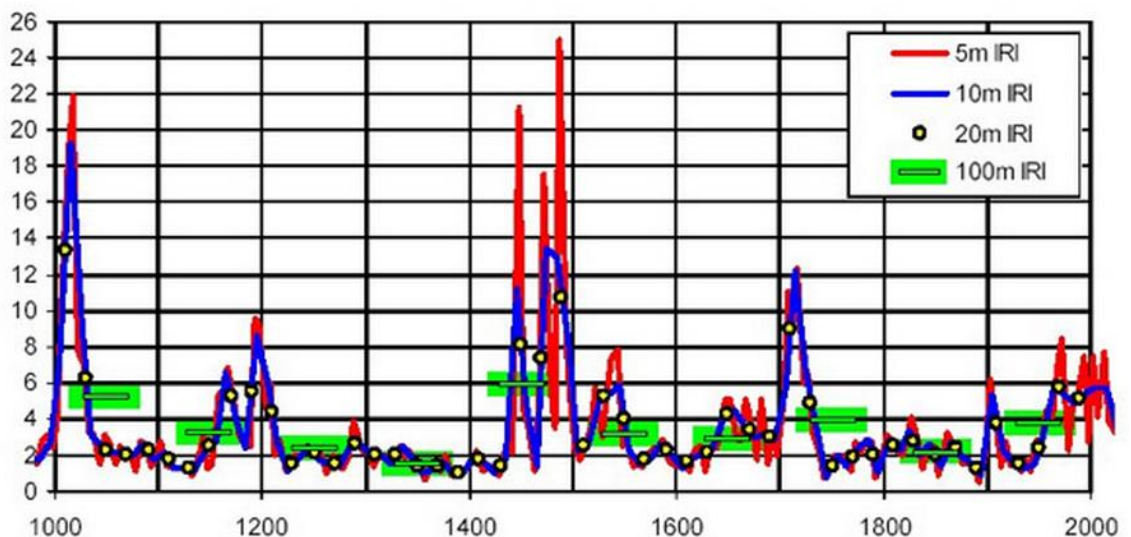
Ppl-menetelmällä voidaan tutkia päällystettyjen teiden lisäksi myös sora- ja metsäautoteitä. Kantavuusmittauksien lisäksi laitetta voidaan käyttää myös esimerkiksi määrittämään tarvetta teräsverkkojen käyttöön, tien heikoimpien kohtien paikantamiseen sekä määrittämään vahvistamistoimenpiteitä vaativien kohteiden tärkeysjärjestystä sekä rakentamisen aikana varmistamaan rakenteiden tiiviyyttä. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)

7 TOIMINNALLISEN KUNNON MITTAUSMENETELMÄT

7.1 Laserprofilometri ja kiihtyvyyssanturit

Teiden epätasaisuutta, uraisuutta mitataan yleisesti laserprofilometripalkilla varustetulla palvelutasomittausautolla. Lisäksi sillä voidaan mitata myös tien sivukaltevuutta. Vaihtoehtona lasersensoreihin perustuvalla mittausjärjestelmällä on käytetty myös halvempaa, ultraäänisensoreihin perustuvaa mittausjärjestelmää sekä kiihtyvyyssantureita. Kiihtyvyyssanturi on mittausauton taka-akseliin kiinnitettävä anturi, joka mittaa tien epätasaisuuksista johtuvia liikkeitä ja tärinöitä, jotka kohdistuvat akseliin. Halvan hintansa vuoksi niitä voidaan käyttää tien kunnon monitorointiin myös tavallisissa henkilöautoissa, vaikka jatkuvasti. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)

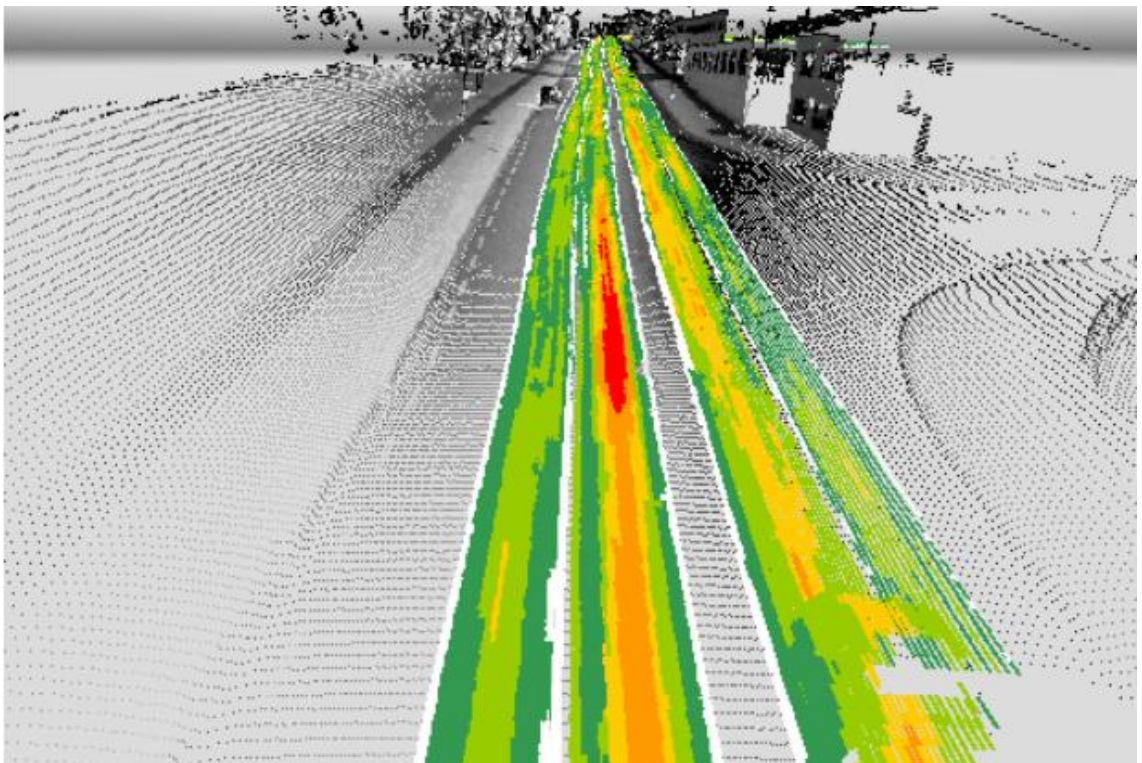
Epätasaisuus- ja uraisuustutkimuksissa on tärkeää kerätä mittausaineistoa tarpeeksi lyhyeltä väliltä (5-10 metriä), jotta paikalliset ongelmakohdat löydetään. Rakenteen ja pohjamaan kunto sekä kuivatuksen tila voivat vaihdella lyhyelläkin välillä merkittävästi, jolloin pidemmältä väliltä kerätyistä arvoista näitä ongelmakohtia ei pystytä erottamaan (Kuvio 14). (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)



Kuvio 14. IRI-arvot esitettynä eri mittaväleillä (Saarenketo ym. 2001 – 2014c)

7.2 Laserskannaus

Laserskannauksesta on viime vuosien aikana tullut rutiinityökalu erilaisiin teiden kunnon hallintaan liittyviin tutkimuksiin. Sen avulla voidaan mitata tien poikki-leikkausta, jolloin tuloksena saadaan tietoa tien urautumisesta ja mahdollisista reunapalsteista, jotka estävät veden virtaamisen pois päällysteen päältä. Laserskannauksen etu verrattuna laserprofilometriin on se, että mittaustulokset eivät ole riippuvaisia mittaajaneuvon kulkemasta reitistä (Saarenketo, Matintupa, Kourim 2012, 4). Laserskannauksessa kohteen etäisyys saadaan selville siitä, kuinka kauan lasersäteen matka kestää laserskannerista kohteeseen ja takaisin. Laserskannauksella on mahdollista tehdä tiestä ja sen ympäristöstä 3D-pintamalli sekä pistepilvimalli (Kuvio 15), kun lasersäteen lähtökulma tiedetään ja lasersädekeila lähetetään liikkuvasta autosta, jonka sijainti tiedetään. Pistepilvimalli sisältää miljoonia pisteitä, joista jokaiselle pisteelle tallennetaan tarkkojen x-, y- ja z-koordinaattien lisäksi sen heijastusominaisuudet. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)



Kuvio 15. Pistepilvimalli urakarttojen kanssa Road Doctorissa

Laserskannerin toiminta perustuu kolmeen osaan: lasertykkiin, keilaimeen ja ilmaisinosaan. Lasertykin tehtävä on tuottaa lasersäde, keilainosan levittää säde ja ilmaisinosan mitata takaisin heijastuneen säteen signaali ja määrittää etäisyys kohteeseen. Etäisyyden määrittäminen perustuu valonnopeuteen, vaihesiirtymään tai näiden yhdistelmään. Liikkuva laserskannerijärjestelmä voidaan luokitella mobiililaserkeilausjärjestelmään sekä yksinkertaiseen linjaskannausjärjestelmään. Mobiililaserkeilausjärjestelmä on tarkempi, mutta huomattavasti kalliimpi menetelmä kuin linjaskannausjärjestelmä. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)

Roadscanners Oy on käyttänyt linjaskannausjärjestelmää vuodesta 2012 asti. Muilla toimijoilla ei vielä ole vastaavaa menetelmää käytössä Suomessa. Lisäksi Rovaniemellä on käytetty vuosina 2011 ja 2012 Roadscanners Oy:n toimeksiannosta tsekkiläisen GeoVap s r.o:n tarkempaa, millimetrien tarkkuuteen pääsevää mobiililaserkeilausta. Saaduista pistepilvistä on tehty routanousuvideoita, joissa näkyy pienetkin routanousut. (Herronen 2016.)

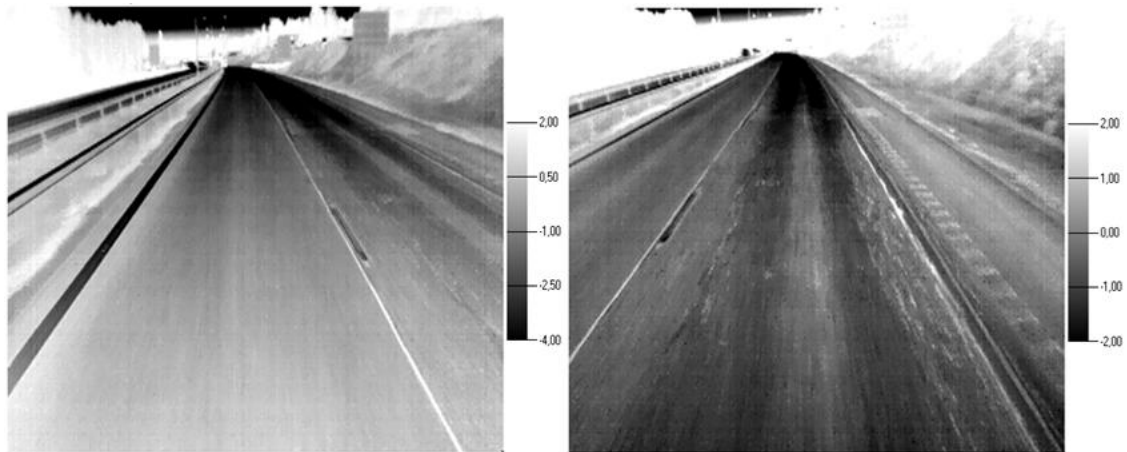
7.3 Visuaaliset menetelmät

Visuaalisiin menetelmiin voidaan lukea silmämääräiset tarkastelut, videot, valokuvat ja lämpökameran käyttö. Käyminen kohteella ja siellä tehdyt havainnot auttavat ongelmien paikallistamisessa ja alueen maastomuotojen luokittelussa. Esimerkiksi tukkeutuneiden rumpujen visuaalinen toteaminen on ensiarvoisen tärkeää tien kunnon kannalta. Kameroiden, kovalevyjen ja tietokoneiden kehityksessä digitaalinen dokumentointi on lisääntynyt, ja siitä on tullut yksi käyttökelpoisimmista tutkimusmenetelmistä. Digitaalinen dokumentointijärjestelmä auttaa ulkopuolisia asiantuntijoita perehtymään kohteeseen ja sen ongelmiin ilman, että heidän täytyy käydä itse paikalla. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)

Video- ja valokuvaus ovat hyviä tekniikoita kartoittaa esimerkiksi tien pinnan kunto, päällysteen vauriot, tiemerkinnot ja liikennemerkkit. Tien ja ojien kuvaaminen suullisella kommentoinnilla niiden kunnosta on helppo tapa kerätä perustietoa kuivatusanalyysiä varten. Kuvaamista voidaan käyttää myös kunnossapito-

toimien onnistumiseen sekä lisätöiden ja niiden onnistumisen tarkkailemiseen ottamalla kuvat ennen ja jälkeen urakan. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)

Lämpökameroiden käyttö on uusi ja lupaava tutkimusmenetelmä. Se on osoittautunut käyttökelpoiseksi erityisesti kuivatusanalyysissä ja pysyvien muodonmuutosten tutkimisprojekteissa. Lämpökameraa voidaan myös käyttää päällystevaurioiden analysoinnissa ja sillä voidaan havaita myös sellaisia halkeamia, joita ei näe paljaalla silmällä tien pinnalta (Kuvio 16). Keväisin lämpökameratutkimuksilla voidaan etsiä alueita, joissa tien alla on vielä routaa. (Saarenketo ym. 2001 – 2014c.)



Kuvio 16. Lämpökameran käyttöä päällystevaurioiden paikantamisessa. Vasemmassa kuvassa päällyste on virheetön, oikeassa on havaittavissa mikrohalkeamia ja alkavaa verkkohalkeamaa (Mukaiillen Saarenketo 2014)

Lämpökameratekniikka on osoittautunut myös varteenotettavaksi työvälineeksi kaukolämpövuotojen paikantamisessa. Sillä voidaan varmistaa yksittäisiä vuotoepäilyjä tai kartoittaa kokonaisia verkostoja. Rovaniemellä on käytetty vuotojen kartoittamiseen helikopterista suoritettavaa lämpökamerakuvausta, jolla on saatu kartoitettua verkoston suurimmat vuodot sekä eristämättömyydestä johtuvat lämpövuodot. Tällä tekniikalla on mahdollista saada yleiskuva verkoston kunnosta nopeasti. (Rytilahti 2012, 36-37.)

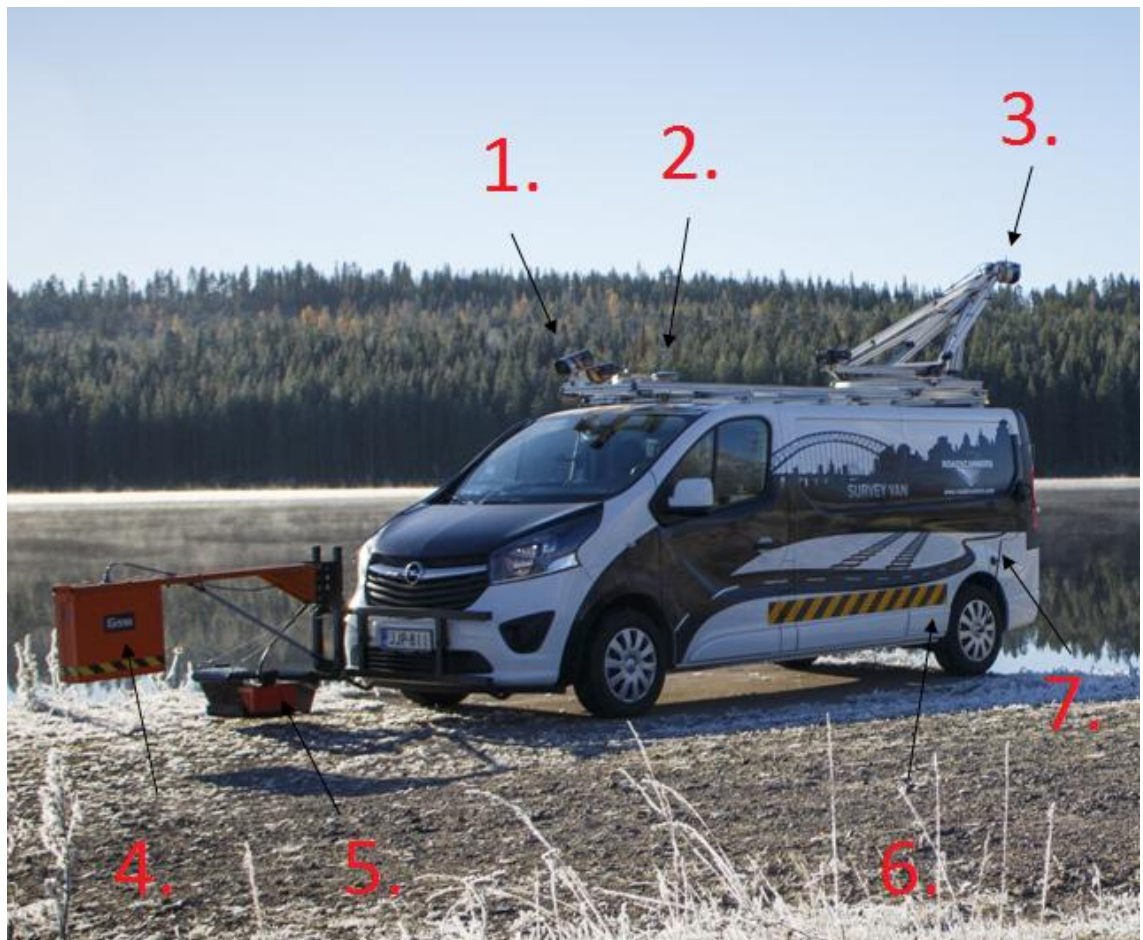
8 TUTKIMUSMENETELMÄT

8.1 Street Doctor

Roadscanners Oy aloitti vuoden 2000 syksyllä yhdessä Rovaniemen kaupungin kanssa Rovaniemen kaupungin pää- ja kokoojakatujen kuntokartoitus-projektin. Sen tavoitteena oli kaupungin tärkeimpien katujen toiminnallisen ja rakenteellisen kunnon vuoden 2000 tason analysointi. Roadscanners Oy kehitti yhdessä Rovaniemen kaupungin virkamiesten kanssa Street Doctor-tekniikan, jota on vuosien kuluessa kehitetty edelleen vastaamaan yhä paremmin kaupungin vaatimuksia. (Saarenketo & Middleton 2012b, 4.)

Vuoden 2000 jälkeen katujen toiminnallista kuntoa on seurattu joka toinen vuosi. Rakenteellinen kunto ei vaadi yhtä tiheää seurantaan, joten vuoden 2000 jälkeen seuraava kuntotutkimus tehtiin vuonna 2010. Mittaustulokset on linkitetty Road Doctor-projektiin, jossa on kaikki Rovaniemen kaupungin katuverkolta vuosien aikana kerätty mitta- ja analyysiaineisto. Tähän kuuluu muun muassa 50 metrin pistevälillä tehdyt pudotuspainomittaukset GPS-kalustoa hyödyntäen tehdyin paikannuksineen, vuosina 2000–2010 joka toinen vuosi kerätty urasyvyys ja IRI-tieto, maatutkamittaustulokset vuosilta 2000–2010 sekä digitaalinen videoaineisto koko katuverkolta vuosilta 2000, 2006 ja 2010. (Saarenketo & Middleton 2012b, 6.)

Vuonna 2012 ja 2014 mittauksissa on käytetty laserskanneri- ja 3D-kiihtyvyyssanturitekniikkaa. Uramittauksissa Roadscanners on käyttänyt kehittämänsä Road Doctor Laser Scanner -järjestelmää. Laserskanneri mittaa kolmen metrin korkeudelta tiealuetta 0,25 asteen välein 50 Hz:n taajuudella. Suuresta pistemäärästä saatavat tulokset keskiarvoistetaan käyttäen eri laskualgoritmeja, jolloin urasyvyys saadaan mitattua millimetrin tarkkuudella. Road Doctor-ohjelma laskee urasyvyys käyttäen lankamittausmenetelmää 10 metrin liukuvalla keskiarvolla. (Saarenketo & Middleton 2014, 4.)



Kuvio 17. Road Doctor Survey Van (Ryttilahti 2015)

Kuviossa 17 on esitetty Roadscanners Oy:n mittausauto Road Doctor Survey Van, johon kuuluu:

1. kaksi videokameraa, joista toinen kuvaa tietä ja toinen ojaa (The Imaging Source)
2. GPS (Novatel)
3. laserskanneri (SICK)
4. 2D-maatutkan 2 GHz ilmapasteantenni (GSSI)
5. 2D-Maatutkan 400 MHz maavasteantenni (GSSI)
6. taka-akselissa oleva 3D-kiihtyvyyssanturi (Xsens)
7. pulssianturi, joka mittaa pyörän pyörimisliikkeestä kuljettua matkaa (Scancon).

8.2 Ohjelmistot ja aineisto

8.2.1 Road Doctor

Road Doctor© on teiden, junaratojen, siltojen, lentokenttien ja geologisten mitausaineistojen käsittely- ja analysointiohjelma, jonka kehitystyö alkoi vuonna 1994. Road Doctorin kehitys jatkuu edelleen. Tässä työssä käytetty versio on Road Doctor 3. Ohjelmalla on mahdollista esittää ja analysoida useasta eri lähteistä yhdistettyjä aineistoja samanaikaisesti ja synkronoidusti. (Roadscanners Oy 2016.)

Road Doctoria voidaan täydentää seitsemällä eri moduulilla, jotka ovat suunnittelu-, diagnoosi-, pinta-analyysi-, ratageometria-, kallio, betoni- ja GPR-moduulit. Näissä moduuleissa on yli 50 työkalua aineistojen käsittelyyn, analysointiin, laskentaan, suunnitteluun ja niin edelleen. Kaduilla Road Doctoria voi käyttää esimerkiksi päällystevaurioinventointiin, rakennekerrosten tulkintaan, rakenteen parantamisen suunnitteluun ja tiejakson heikoimpien ja vahvimpien kohtien identifiointiin. (Roadscanners Oy 2016.)

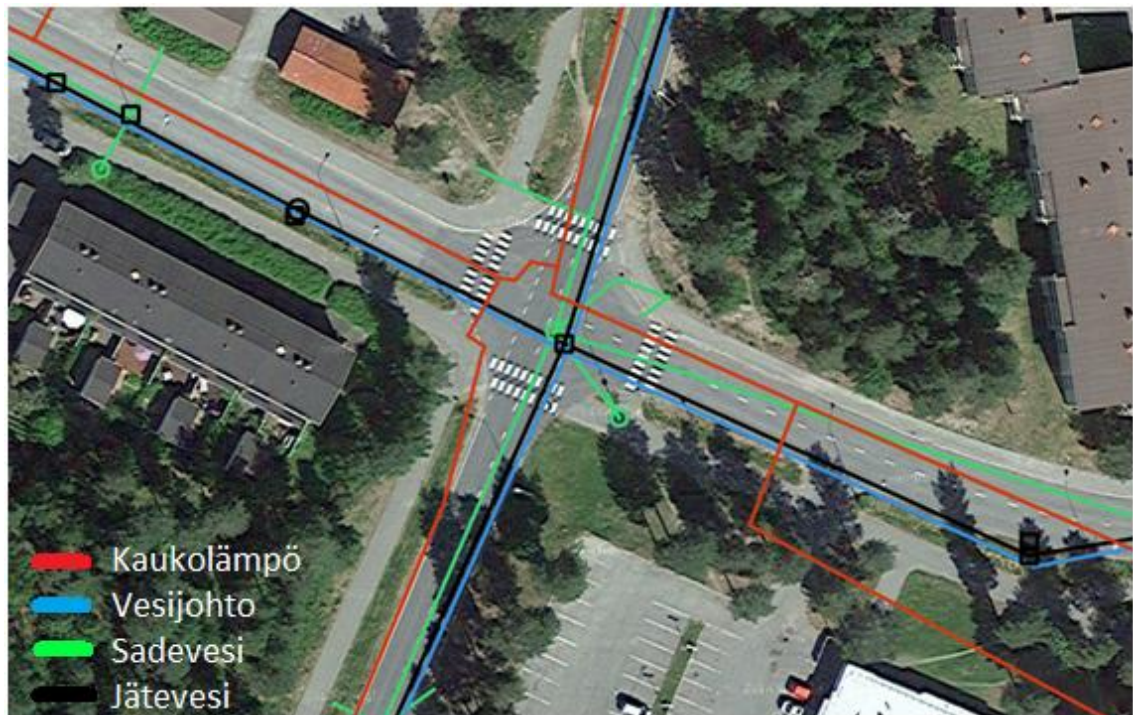
8.2.2 Johtokartat ja ohjelmistot

Tässä työssä on käytetty hyödyksi Rovaniemen kaupungilta saatuja dwg-tiedostoformaatin johtoaineistoja. Kun uusia johtoja rakennetaan, johtojen sijainnit tallennetaan paikkatietojärjestelmään. Näin johtokartat voidaan pitää reaaliajassa. Karttojen tallennuksessa on käytetty koordinaattijärjestelmää ETRS-GK26. Kuviossa 18 on esitetty esimerkkinä pohjoisen alueen johtokartta AutoCAD-ohjelmassa.



Kuvio 18. Pohjoisen alueen johtokartta AutoCAD:ssa

AutoCAD:sta johtokartat on siirretty QGIS-ohjelmaan, jossa johdot on saatu helpommin tarkasteltavaan muotoon. Pohjana QGIS:ssä on käytetty sekä Googlen satelliittikuvia, että Rovaniemen kaupungin karttapalvelun pohjakarttoja ja ilmakuvia. Tässä työssä eri johtotyyppit on esitetty eri värein: punainen väri kuvaa kaukolämpöjohtoja, sininen raakavesijohtoja, vihreä sadevesijohtoja ja musta jätevesijohtoja. Kuviossa 19 on esitetty esimerkkinä yksi pohjoisen alueen risteys QGIS-ohjelmassa.



Kuvio 19. QGIS-näkymä Hillerintie-Sudentie-risteyksestä

8.3 Pintavaurioiden inventointi

Tämän opinnäytetyön tutkimusvaihe alkoi valittuihin kohteisiin tutustumisella. Kohteet on esitetty luvussa 9. Kadut käytiin läpi useassa eri vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tehtiin alustavia havaintoja pintavaurioista ja painumista. Toisessa vaiheessa keskityttiin pintavaurioiden valokuvaamiseen ja katujen ja katuojien yleiskunnon tarkasteluun. Vasta kolmannessa vaiheessa kadut käytiin läpi yhdessä johtokarttojen kanssa.

Jo inventointien aikana kävi ilmi, että kunnallistekniikalla on huomattavia vaikutuksia katuverkon kuntoon. Monessa tilanteessa päällysteen alla kulkevan johdon pystyi paikallistamaan ilman johtokarttoja johdonsuuntaisista halkeamista. Myös Street Doctor-mittausten videoita käytettiin pintavaurioiden inventointiin muutamissa tapauksissa.

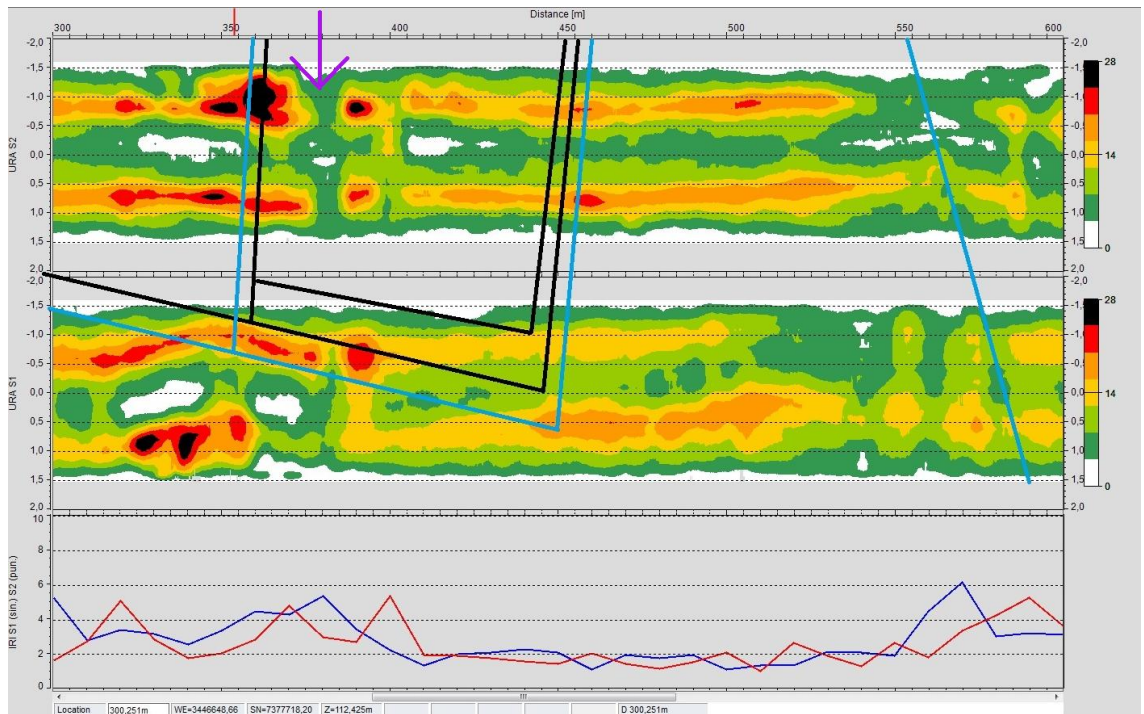
8.4 Johtokarttojen yhdistäminen muuhun aineistoon

Visuaalisten menetelmien lisäksi kunnallistekniikan vaikutusta katuverkon kuntoon tutkitaan tässä opinnäytetyössä Street Doctor-projektissa kerätyn aineiston avulla. Näitä ovat laserskannauksella saadut uraisuusaineistot, kiihtyvyyssanturilla saadut IRI-arvot ja maatutka-aineistot. Maatutkan maavasteantennilla voidaan paikallistaa tarkka johdon sijainti. Ilmavasteantennilla taas voidaan paikallistaa heittoa tiestä laskemalla antenniheiluntaa. Antenniheilunta tarkoittaa käytännössä ilmavasteantennin etäisyyttä maanpintaan; jos tiessä on heitto, antenni käy lähempänä tienpintaa, joka aiheuttaa käyrään poikkeaman. Ilmavasteantennin aineistosta voidaan laskea myös päällysteen dielektrisyttä. Tästä voidaan päätellä päällysteen halkeamia ja muita poikkeamia. Street Doctor-aineiston lisäksi työssä käytetään GeoVap s r.o.:n mobiililaserkeilauksella tehtyjä routanousuvideoita. Liitteessä 1 on esitetty suurempana Road Doctor-näkymä yleisimmistä työssä käytetyistä menetelmistä. Näkymään on lisätty myös kunnallistekniikan johdot, joiden sijainnit on saatu johtokartoista.

Kuviossa 20 on esitetty johdot QGIS:ssä Matkajängäntien paaluvälin 300-450m osuudelta. Nämä johdot on yhdistetty kuviossa 21 olevaan Road Doctor-ohjelman näkymään samalta kohdalta. Kuviossa ylin ikkuna kuvaa suunnan kaksi laserskannauksella saatua uraisuutta 0-28 millimetrin skaalalla, keskimäinen samaa suunnan yksi osalta ja alin ikkuna IRI-arvoa skaalalla 0-10, missä suunnan yksi käyrä on sininen ja suunnan kaksi punainen. Yleisesti voidaan sanoa, että IRI-arvon ylittäessä kadulla arvon kuusi, puhutaan jo liikenteenkäyttäjää häiritsevästä ja haittaavasta epätasaisuudesta. Tässä esimerkissä on sekä jäte-, että raakavesijohtoja. Johtojen kohdalla voidaan havaita poikkeamia niin uraisuudessa, kuin IRI-arvoissakin. Paaluvälillä 500-575m oleva raakavesijohto on myös aiheuttanut johdon suuntaisen halkeaman, kuten kuviossa 22 ilmenee.



Kuvio 20. Matkajängäntie plv 300-450m QGIS:ssä



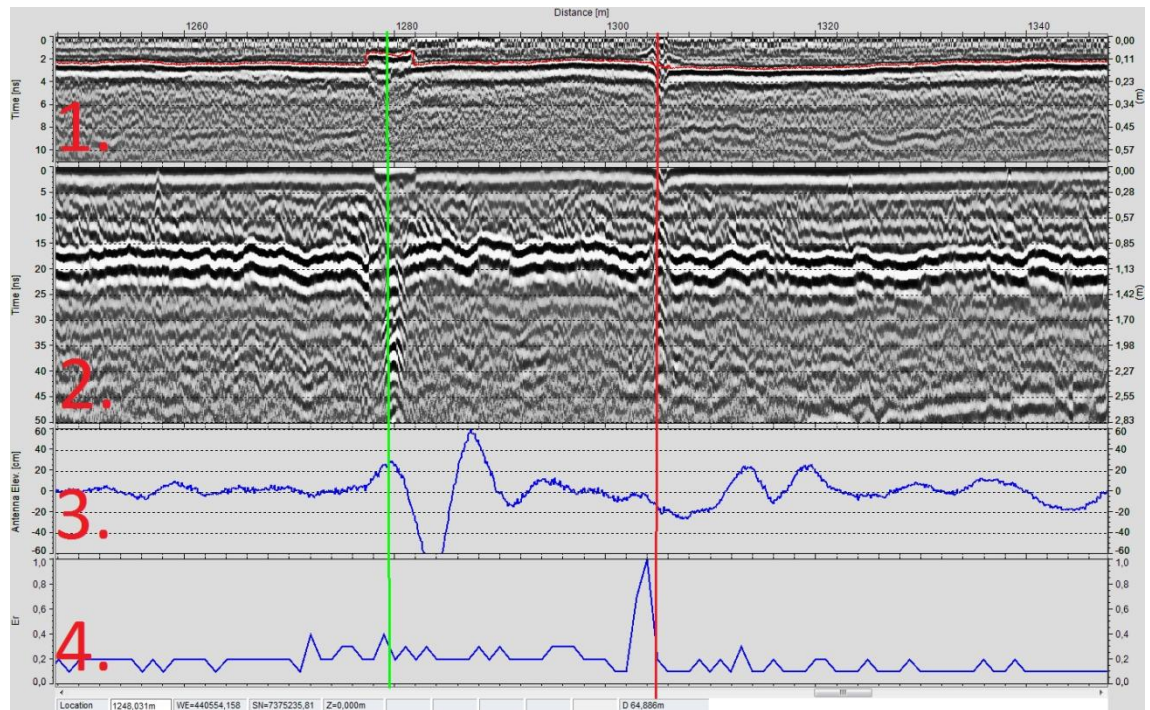
Kuvio 21. Matkajängäntie plv 300-600m Road Doctorissa. Ylin ikkuna kuvaa suunnan 2 ja keskimäinen suunnan 1 uraisuutta. Alimmassa ikkunassa sininen käyrä kuvaa suunnan 1 ja punainen käyrä suunnan 2 IRI-arvoa. Violetin nuolen kohdalla ei ole urautumista, koska tällä kohdalla on päällystepaikkaus



Kuvio 22. Suopungin ja Matkajängäntien risteys. Sama vesijohto näkyy kuvion 21 näkymässä plv 550m kohdalla (Ryttilahti 2015)

Kuviossa 23 on esitetty maatutka-aineistoa Teollisuustieltä. Numeroidut ikkunat tarkoittavat seuraavaa:

1. Ilmavasteantennin aineisto. Punainen vaakaviiva kuvaa päällysteen pintaa. Asteikko on 0-0,57 metriä.
2. Maavasteantennin aineisto. Vihreä ja punainen pystyviiva kuvaavat sadevesi- ja kaukolämpöjohtoja. Johdot ovat havaittavissa maatutkan sähkömagneettisten pulssien heijasteista. Asteikko on 0-2,83 metriä.
3. Ilmavasteantennin antenniheilunta-aineisto. Auton akselit joustavat heittojen kohdalla, jonka seurauksena sadevesijohdon kohdalla antenni on käynyt lähempänä maanpintaa, ja sen jälkeen noussut nopeasti ylös. Tämä kertoo johdon kohdalla olevasta painumasta. Kaukolämpöjohdon kohdalla on nopea heitto, mihin antenni reagoi viiveellä.
4. Ilmavasteantennin dielektrisyiden hajonta-aineisto. Kaukolämpöjohdon kohdalla havaittava piikki kertoo päällysteen halkeamasta.



Kuvio 23. Maatutka-aineistoa Teollisuustieltä. Vihreä ja punainen pystyviiva kuvaavat kunnallistekniikan putkien sijaintia

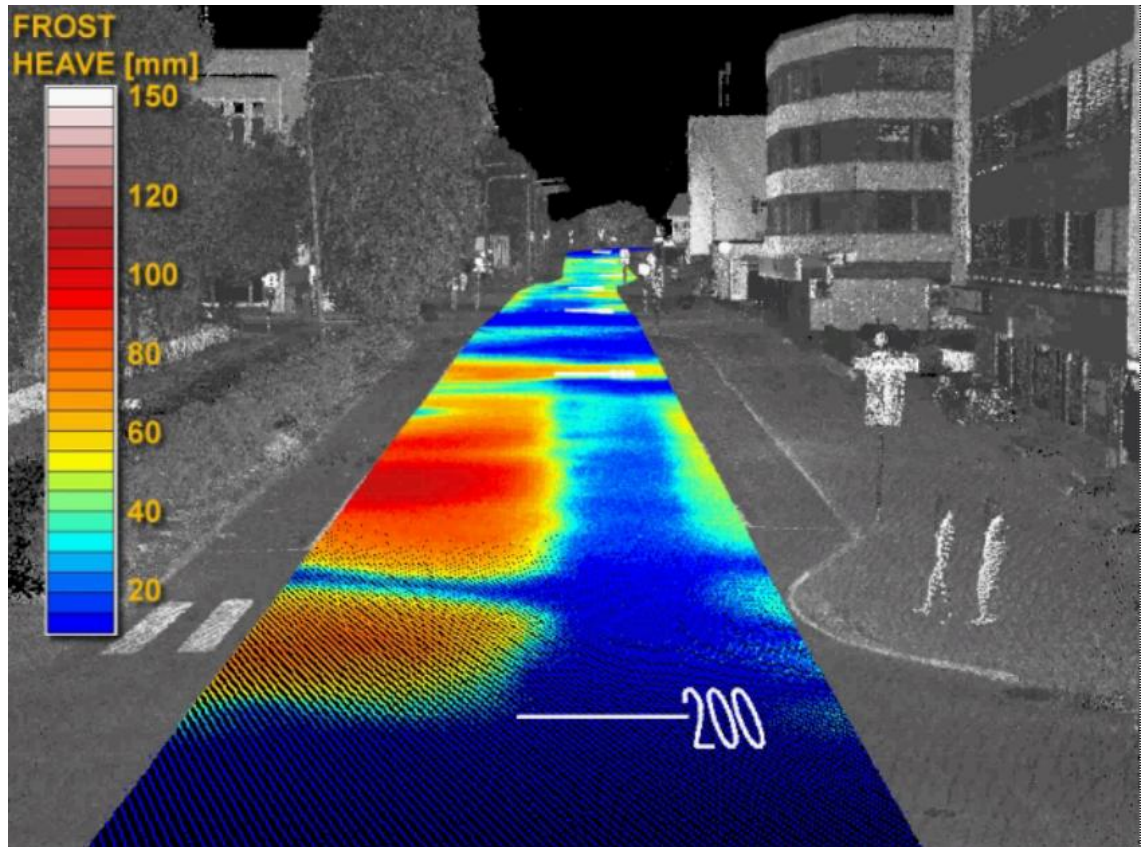
8.5 Routanousuvideot

Tsekkiläinen Geovap s r.o. on tutkinut Roadscanners Oy:n toimeksiannosta tiettyjä Rovaniemen katuja Quantum 3D-mobiililaserskannaustekniikalla. Lasersäteiden korkean tiheyden, nopeuden ja laadun takia spatiaalinen tarkkuus piste-pilvimalleissa tällä tekniikalla mitattuna on parasta mitä nykypäivänä voi saada. Tällä tekniikalla pystyy routanousun lisäksi mittaamaan tarkasti muun muassa oijen pohjia, tienreunoja, tierakenteen painumia, maaperän liikkumisia, uraisuuden kehittymistä, muodonmuutoksia ja jopa veden virtauksia tierakenteessa ja sen ympärillä. (Herronen, Saarenketo & Varin 2013, 5–6)

Quantum 3D-mobiililaserskannaustekniikan tiedonkeruu perustuu kanadalaisen Optech Inc:n kehittämään Lynx Mobile Mapper-tekniikkaan, jossa käytetään kahta tarkkaa 45 asteen kulmassa toisiinsa olevaa Lynx Lidar v200-skanneria. Mittausten navigointi suoritetaan tarkkaa GPS- ja gyroskooppitekniikkaa käyttäen. Myös kiinteitä tukiasemia ja erikseen mitattuja referenssipisteitä hyödynne-

tään. Routanousumittauksissa mittaustarkkuus on luokkaa 20–40 mm. (Saarenketo & Middleton 2012b, 4)

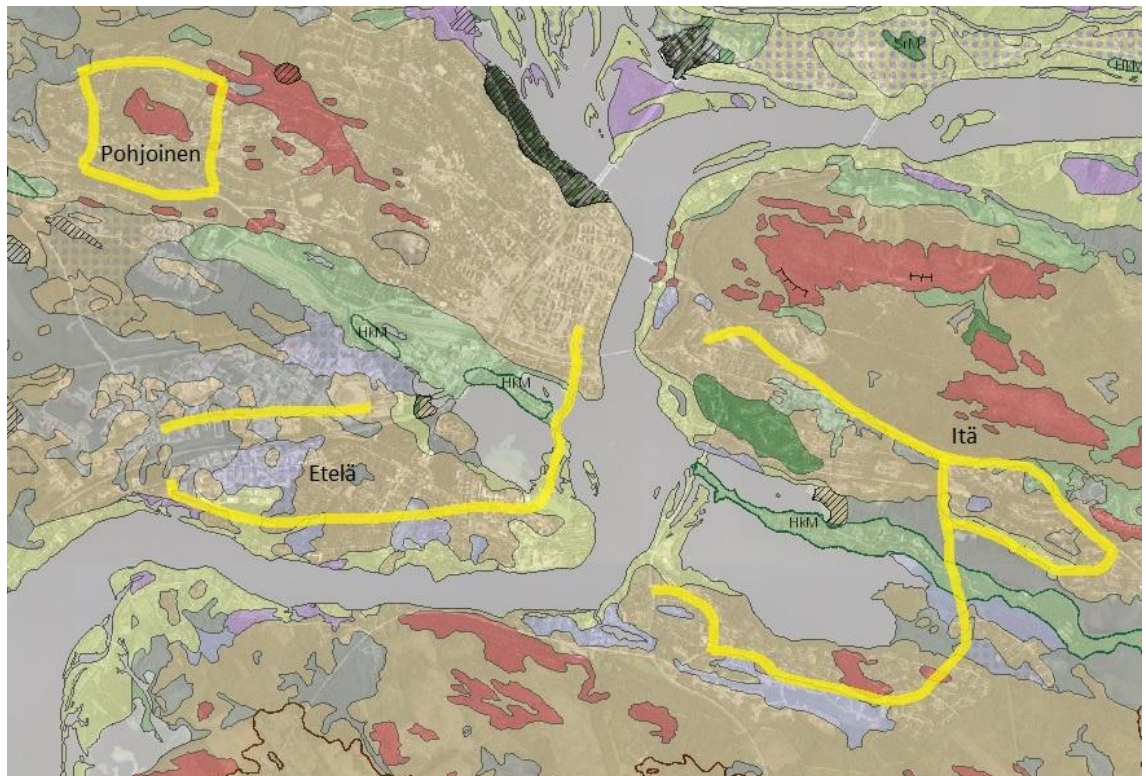
Rovaniemellä mobiililaserskannausmittaukset tehtiin vuoden 2011 keväällä pahimpaan routa-aikaan ja kesällä, kun routa oli sulanut (Herronen 2016). Näistä mittauksista laskettiin erotus, joista pistepilvimalli muodostettiin. Pistepilvimalleista tehtiin routanousuvideot, joista on helppo paikallistaa kunnallistekniikan johtojen sijainti. Johdot näkyvät videoissa hyvin, koska niiden perustamissyvyys poikkeaa katurakenteesta. Kuviossa 24 on esimerkki Ruokasenkadulta paaluväliltä 200-300m.



Kuvio 24. Kuva routanousuvideosta Ruokasenkadulta (GeoVap s r.o. 2011)

9 TUTKIMUSKOHTEET

Tutkimuskohteiksi tässä opinnäytetyössä valittiin kolme eri puolella Rovaniemen kaupunkia olevaa aluetta (Kuvio 25). Yhteensä nämä kohteet käsittävät 12 ka-tua, joiden yhteispituus on noin 21 kilometriä. Kohteet valittiin siten, että ne edustavat erilaisia olosuhteita. Valinnassa otettiin huomioon myös se, että koh-teissa olisi erilaista maaperää ja erilaisia kuntoon liittyviä ongelmia. Näiden koh-teiden lisäksi Rovaniemen keskustassa olevat Valtakatu ja Ruokasenkatu ovat mukana työssä suppeammassa tarkastelussa.



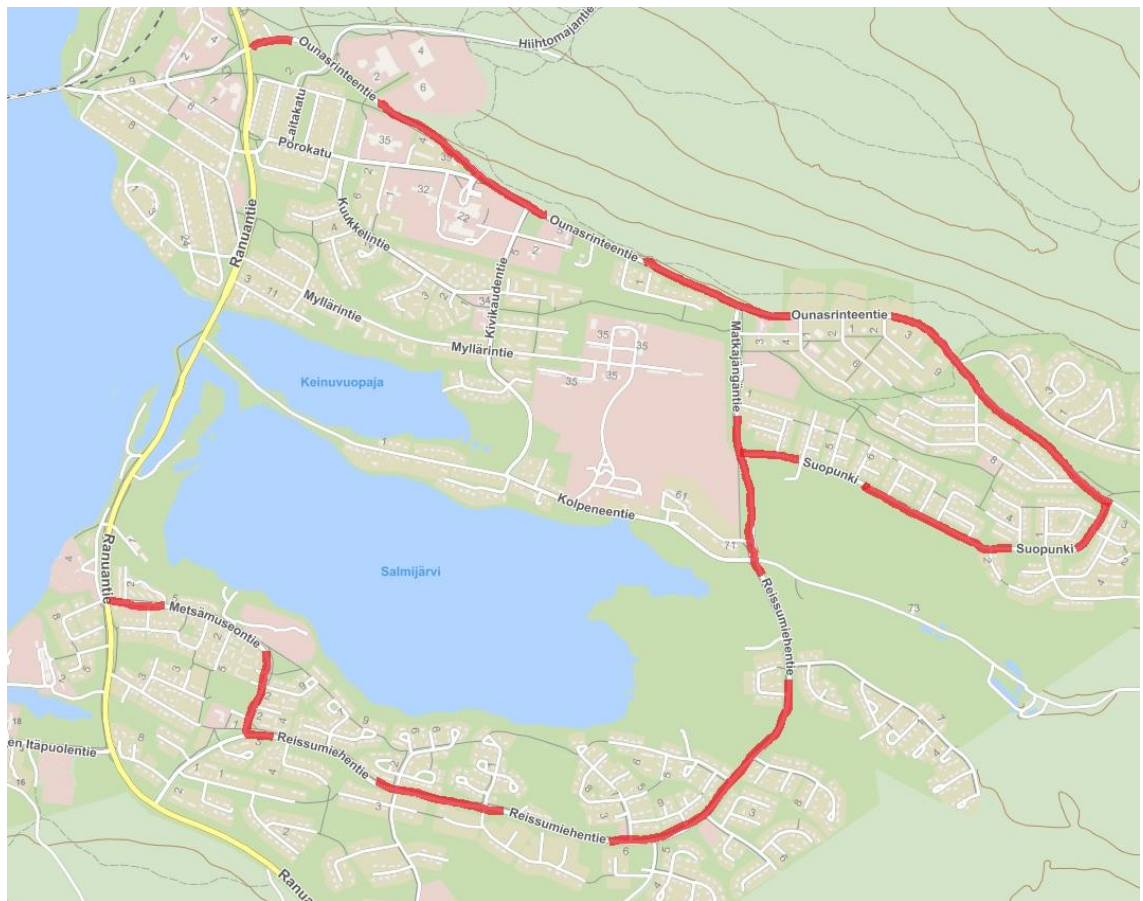
Kuvio 25. Tutkimuskohteet ja maalajit (Mukaillen Geologian tutkimuskeskus, 2015)

Pohjoinen alue sijaitsee Korkalovaaran kaupunginosassa. Siihen kuuluu neljä katua: Korkalovaarantie Vaaranlammentien risteyksestä lähtien, Hillerintie, Kiveliöntie ja Vaaranlammentie (Kuvio 26). Näiden yhteenlaskettu pituus on 5,6 kilometriä. Maaperä alueella on pääosin hiekkamoreenia, lukuun ottamatta Vaaranlammentien pohjoispäätä, jossa on kalliota. Pohjoisen alueen kadut ovat kokoojakatuja, joiden raskasliikenne rajoittuu linja-autoihin ja jakeluautoihin. Alue on lähinnä asutusaluetta.



Kuvio 26. Pohjoinen

Idän alueeseen kuuluu viisi katu (Kuvio 27). Ounasrinteentie kulkee Ounasvaaran kupeessa Pullinpuolen kaupunginosasta Ounasrinteelle Suopungin tien risteykseen asti. Maaperä on suurelta osin hiekkamoreenia. Vain kadun loppupäässä on alue, jonka pintamaalaji on silttiä ja pohjamaalaji hiekkaa. Suopunki ja Matkajängäntie koostuvat hiekkamoreenista, karkeasta hiedasta ja siltistä. Reissumiehentie päättyy Kolpeneen hiekkaharjuun, jonka ympärillä on myös hiesua ja silttiä. Muutoin maaperä on moreenia. Raskasliikenne Idän alueella on lähinnä linja-autoliikennettä.



Kuvio 27. Itä

Etelän alue on tämän työn tutkimuskohteista maaperältään ongelmaisin. Alue sijaitsee alavammalla maalla kuin muut alueet. Teollisuustie on lähes yksinomaan maaperältään silttiä, kun taas Pappilantie ja Yliopistonkatu on maaperältään tutkimuskohteista monipuolisimmat. Pappilantien maaperässä on hiekkamoreenia, silttiä ja hienoa sekä karkeaa hietaa. Tie on uudelleen päällystetty vuonna 2014, minkä vuoksi analyyseissä käytettiin 2012 vuoden aineistoa, jotta tutkimustulokset olisivat mahdollisimman oikeita. Niin Pappilantie kuin Teollisuustiekkin on tiedetty routiviksi. Yliopistonkatu alkaa Viirinkankaalta ja loppuu keskustaan. Sen maaperä vaihtelee hiekkamoreenista hiesuun ja karkeasta hiedasta Kirkonjyrhämän hiekkaan. Kuviossa 28 on esitetty alueen tiet kartalla. Kaikilla edellä mainituilla kaduilla kulkee raskasta liikennettä. Teollisuustiellä raskasliikenne koostuu kuorma-autoista ja jakeluautoista, Pappilantiellä ja Yliopistonkadulla linja-autoista.



Kuvio 28. Etelä

10 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Tässä kappaleessa esitetään aluekohtaisesti aineistoista esille tulleita havaintoja kunnallistekniikan vaikutuksesta tutkimuskohteina olleille kaduille. Esimerkkeinä tarkoitetaan näyttämään erityyppisiä ongelmia, joita kunnallistekniikka kaduille aiheuttaa. Myös hyvin toimivia kohtia on esitetty. Osa tarkastelussa löydettyistä poikkeamista on jo nyt aiheuttanut sekä näkyviä, että piileviä vaurioita kaduille ja osa on pienempiä poikkeamia, jotka pystytään tutkitun aineiston avulla todentamaan kunnallistekniikan aiheuttamiksi. On myös tärkeää tuoda ilmi se, että kaikki poikkeamat eivät automaattisesti tarkoita sitä, että kunnallistekniikka olisi rakennettu virheellisesti. Jos kadulla on alun perinkin ollut ongelmia tai katurakenteet ovat liian ohuet, oikein tehty kunnallistekniikka voi poiketa muusta katurakenteesta aiheuttaen näin ollen poikkeamia aineistoon.

10.1 Alueellinen tarkastelu

10.1.1 Pohjoinen

Pohjoisen alueen neljällä kadulla oli yhteensä 79 ajoradan alittavaa putkea. Näistä yhteensä 45:n voitiin mittausten perusteella todeta aiheuttavan poikkeamia kaduille. Eniten poikkeamia löytyi Vaaranlammentieltä ja Hillerintieltä, kun taas Korkalovaarantien alla kulkee vain yksi kaukolämpöjohto, joka oli aiheuttanut heiton ja halkeamia päällysteeseen (Kuvio 29). Kiveliöntie oli tämän alueen ongelmattomin tie, sillä vain 10 % johdoista aiheutti poikkeamia. Toinen huomionarvoinen paikka on kuviossa 30 näkyvä Hillerintien ja Sudentien risteys, jonka alla on todella paljon johtoja, mutta ongelmia ei silti ole. Johtojen määrä on nähtävissä aiemman luvun kuviossa 19.

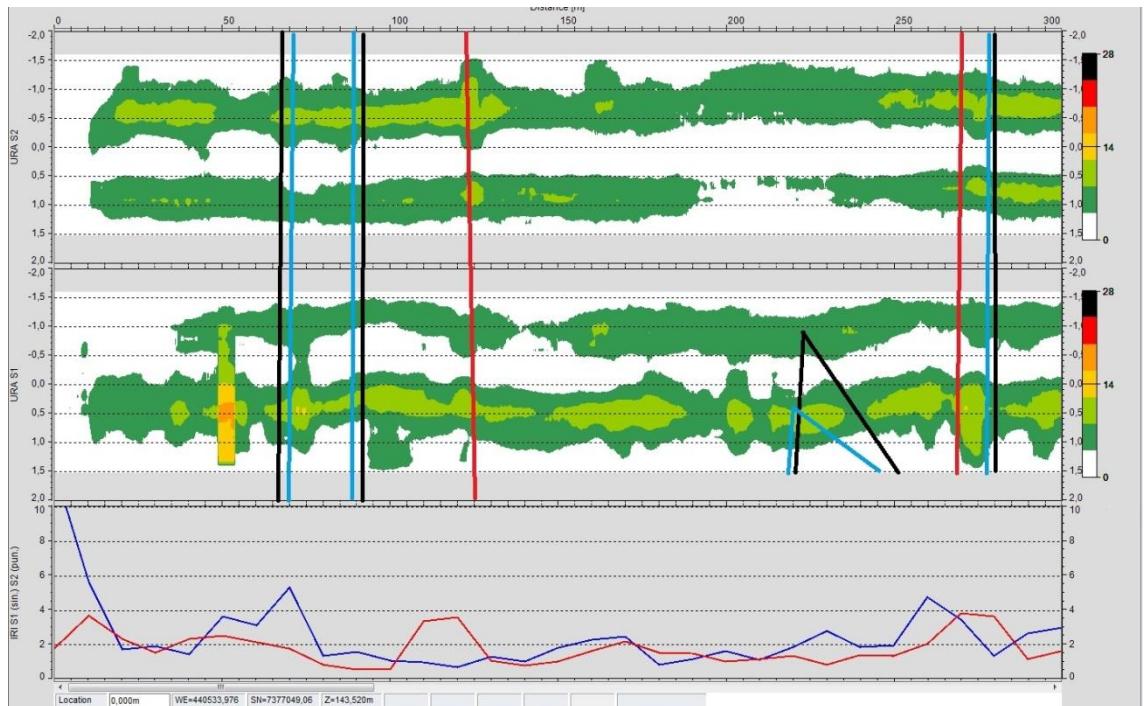


Kuvio 29. Esimerkki deformaatiosta kaukolämpöjohdon kohdalta Korkalovaaran tiellä (Rytilahti 2015)

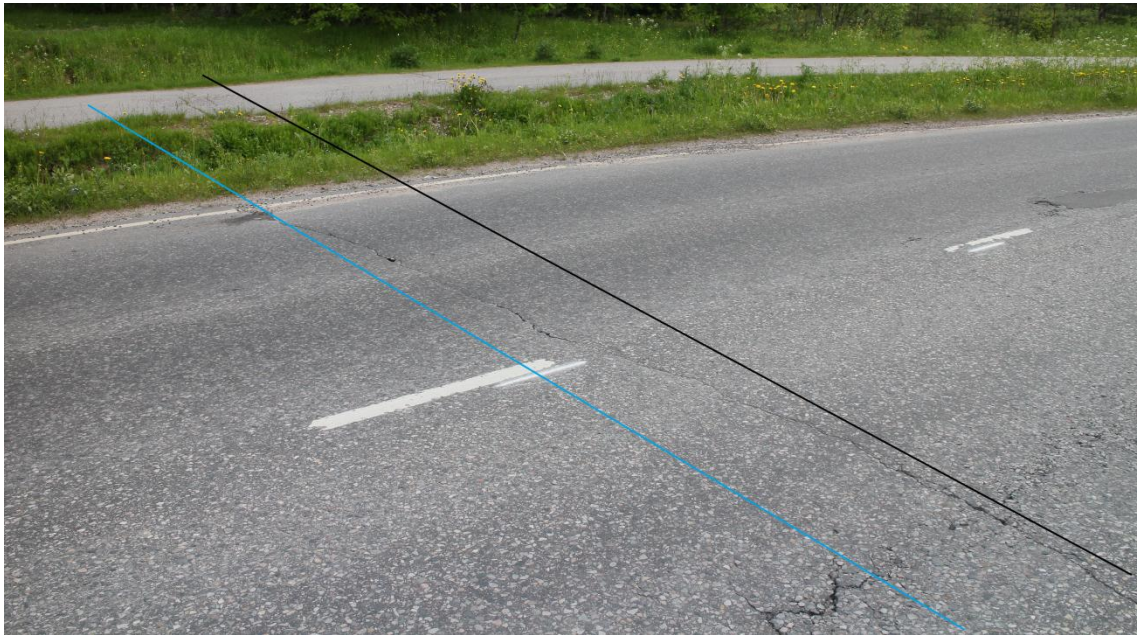


Kuvio 30. Hyväkuntoinen risteys, Hillerintie plv 200-250m (Rytilahti 2015)

Kuviossa 31 on esimerkki Vaaranlammentien 0-300m paaluväliltä. Kuviossa 32 on havainnollistettu noin 70 metrin kohdalla olevien raaka- ja jätevesijohtojen vaikutus kadun päällysteeseen. Huomioitavaa on myös se, että kuvan takalalla näkyvä kevyen liikenteen väylä on johdon alituksen kohdalta vaurioitunut, joka tukee entisestään johtojen vaikutusta halkeamiin.



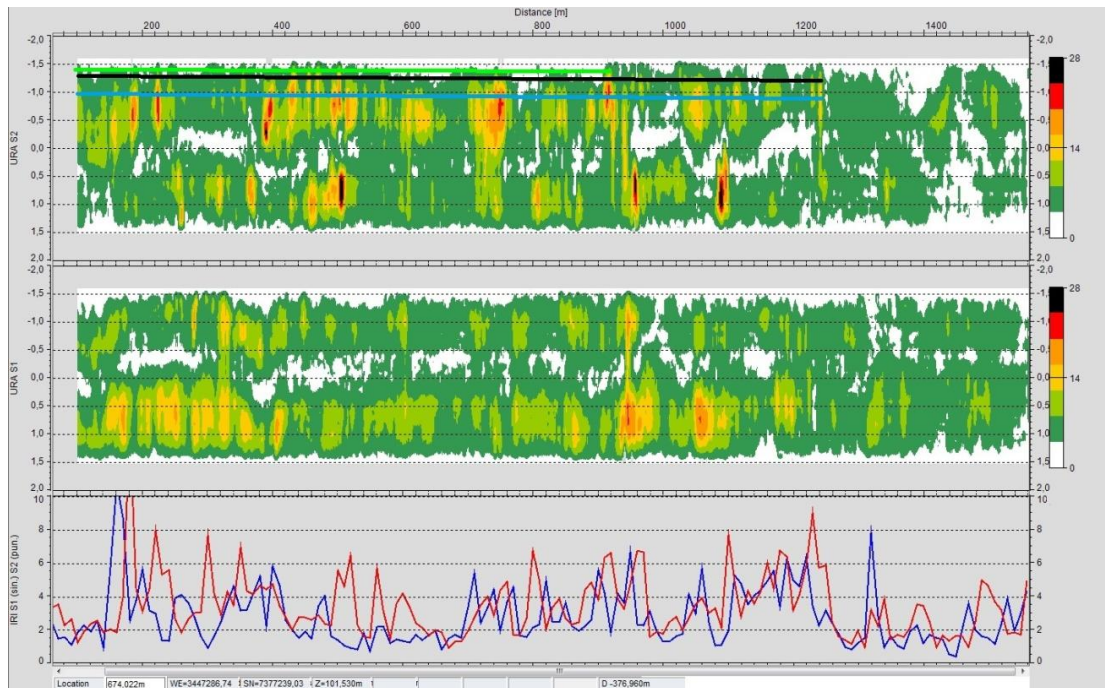
Kuvio 31. Vaaranlammentie plv 0-300m. Ylin ikkuna kuvaa suunnan 2 ja keskimäinen suunnan 1 uraisuutta. Alimmassa ikkunassa sininen käyrä kuvaa suunnan 1 ja punainen käyrä suunnan 2 IRI-arvoa



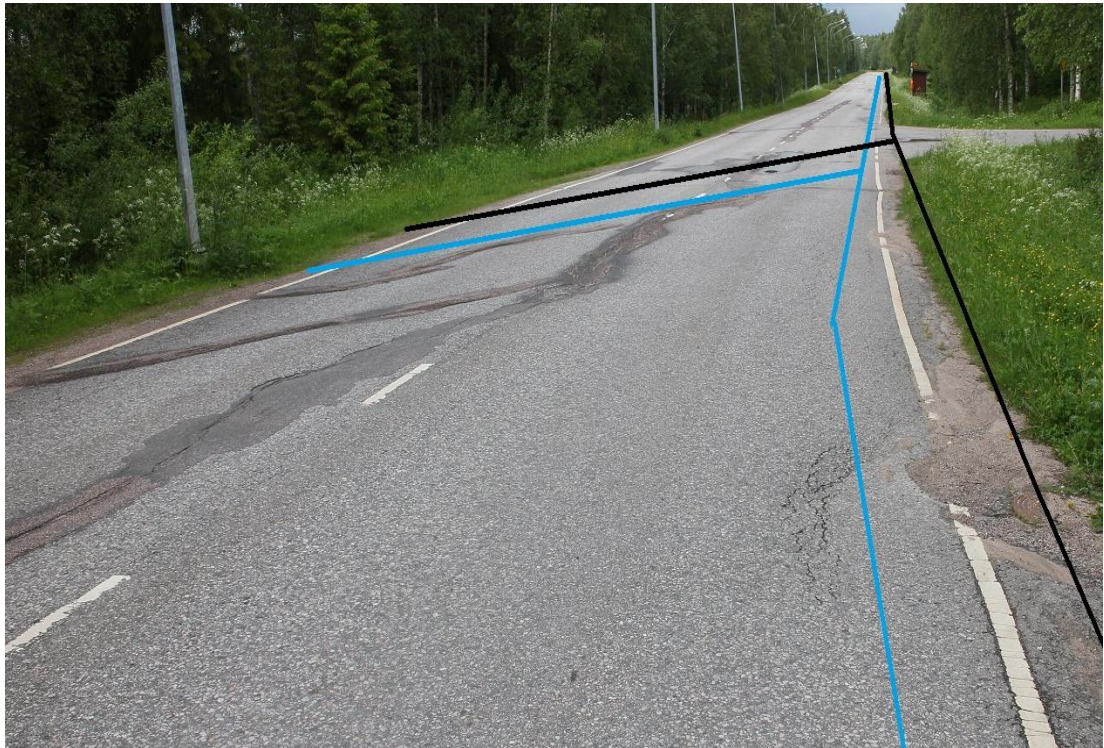
Kuvio 32. Vaaranlammentie plv 70m. Johtojen aiheuttamia halkeamia ajoradalla ja kevyenliikenteen väylällä (Rytilahti 2015)

10.1.2 Itä

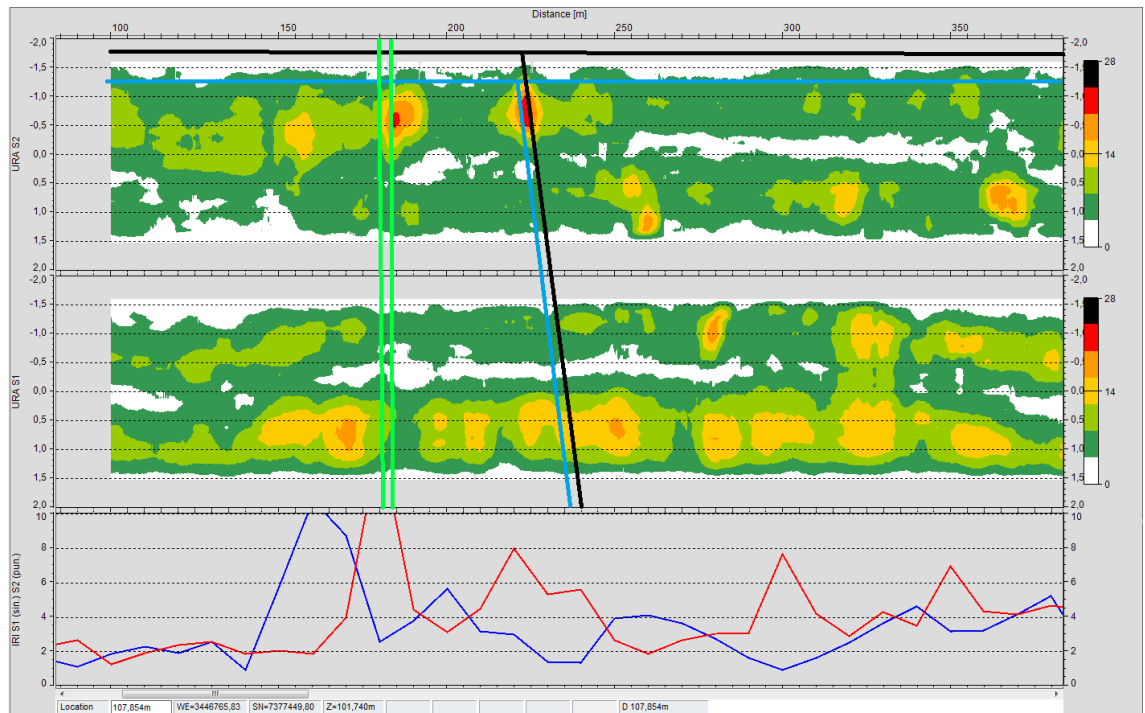
Idän viidellä kadulla ajoradan alittavia putkia on 89 kappaletta. Näistä jopa 50:n voitiin osoittaa aiheuttavan ongelmia katuverkon kunnolle. Ongelmallisimpana katuna esiin nousi Suopunki, joka sijaitsee lähes koko pituudeltaan vaaran rinteessä. On yleisesti tiedossa, että ajoradan vaaran puoleiselle kaistalle syntyy herkästi ongelmia, mikäli kuivatus ei ylärinteen puolella toimi. Suopungin tapauksessa ylärinteen puolella ojassa ja osittain suunnan kaksi kaistan alla kulkee lähes koko matkalta vesi-, sadevesi- ja jätevesijohtoja. Tällä osuudella ongelmat ovat kadun kannalta suurimpia. Kadun viimeisellä 400 metrin matkalla edellä mainittuja johtoja ei ole, ja tie onkin tällä osuudella huomattavasti paremmassa kunnossa (Kuvio 33). Rinteen puolella olevien johtojen vaikutus katuihin on myös esitetty kuvioissa 34 ja 35. Kuvion 36 mukaisesti myös kadun poikkisuunnassa alittavat johdot aiheuttavat ongelmia Suopungissa.



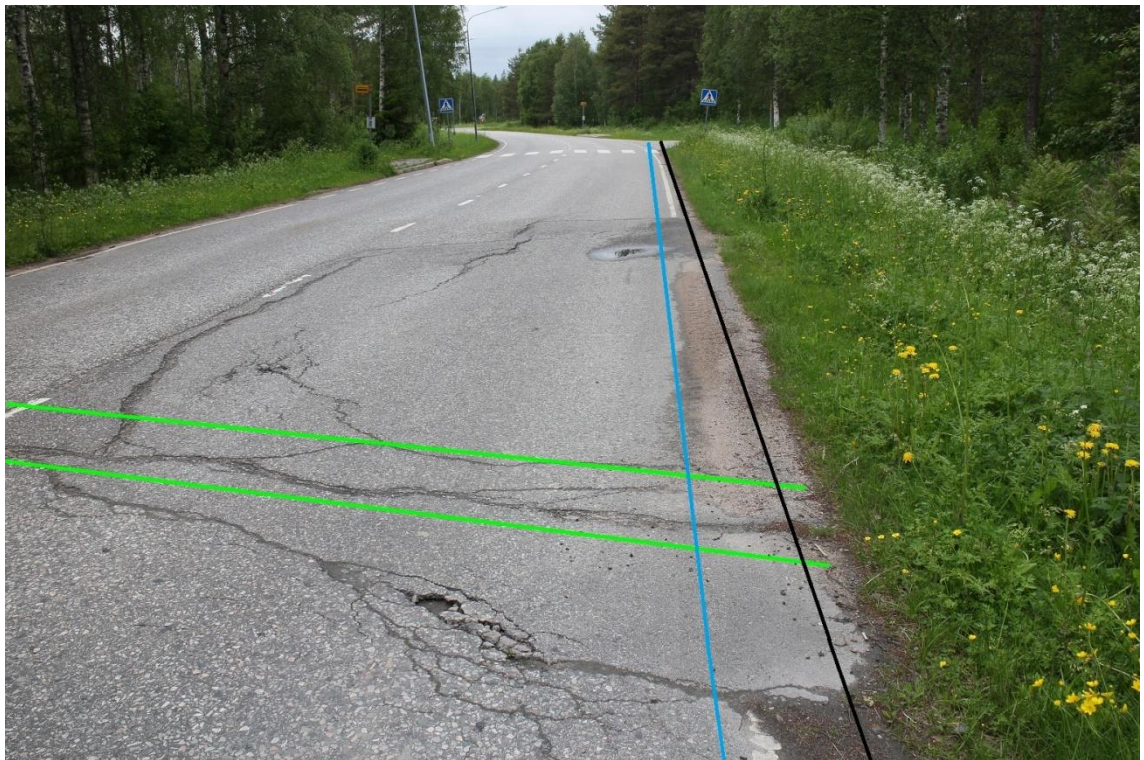
Kuvio 33. Suopunki plv 0-1550m. Kuviossa on esitetty vain tekstissä mainitut tien suuntaisesti kulkevat johdot. Ylin ikkuna kuvaa suunnan 2 ja keskimmäinen suunnan 1 uraisuutta. Alimmassa ikkunassa sininen käyrä kuvaa suunnan 1 ja punainen käyrä suunnan 2 IRI-arvoa



Kuvio 34. Painumia ja halkeamia Suopungin plv 975m kohdalta (Rytilahti 2015)

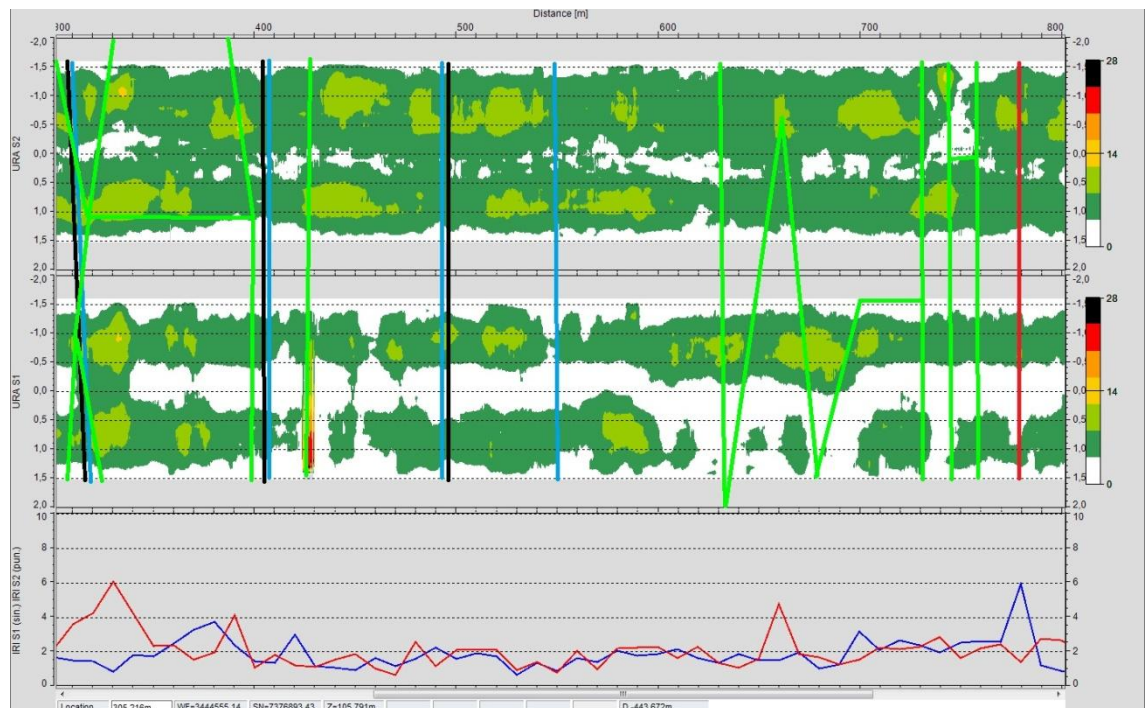


Kuvio 35. Suopunki plv 100-400m. Ylin ikkuna kuvaa suunnan 2 ja keskimääräinen suunnan 1 uraisuutta. Alimmassa ikkunassa sininen käyrä kuvaa suunnan 1 ja punainen käyrä suunnan 2 IRI-arvoa



Kuvio 36. Suopunki plv 200m (Rytilahti 2015)

Ounasrinteentieltä, Matkajängäntieltä ja Reissumiehentieltä löytyy paljon kunnallistekniikan aiheuttamia ongelmia (44 johtoa, 31 ongelmakohtaa), mutta erityishuomio tutkimuksen kannalta kuuluu Metsämuseontielle. Metsämuseontien 28:sta ajoradan alla olevasta johdosta vain viiden voitiin katsoa aiheuttavan ongelmia katurakenteelle. Kuten kuviosta 37 näkee, johtoja on tarkasteluvälillä tiuhassa, mutta silti vain yhden plv 425 metrin kohdalla olevan sadevesijohdon voitiin katsoa aiheuttavan poikkeaman kadulle.



Kuvio 37. Metsämuseontie plv 300-800m. Ylin ikkuna kuvaa suunnan 2 ja keskimäinen suunnan 1 uraisuutta. Alimmassa ikkunassa sininen käyrä kuvaa suunnan 1 ja punainen käyrä suunnan 2 IRI-arvoa

Metsämuseontielle on tehty vuonna 2003 päällysrakenteen parantaminen ja sadevesiviemäriverkoston täydentäminen. Ennen toimenpidettä katu oli pahoin vaurioitunut routimisen ja painumien seurauksena. Kadun rakenne tutkittiin ennen parannushanketta maatutkalla Roadscanners Oy:n toimesta. Roadscanners myös mitoitti kadun rakennuskerrokset APAS-mitoitusohjelmalla. Rakennusvaiheessa vesihuoltokaivojen maamassoja yhdenmukaistettiin kadun pohja- ja päällysrakennemateriaalien kanssa routahaittojen poistamiseksi ja siirtymäkii- loja rakennettiin routanousujen tasoittamiseksi. Kantava kerros tehtiin kokonai-

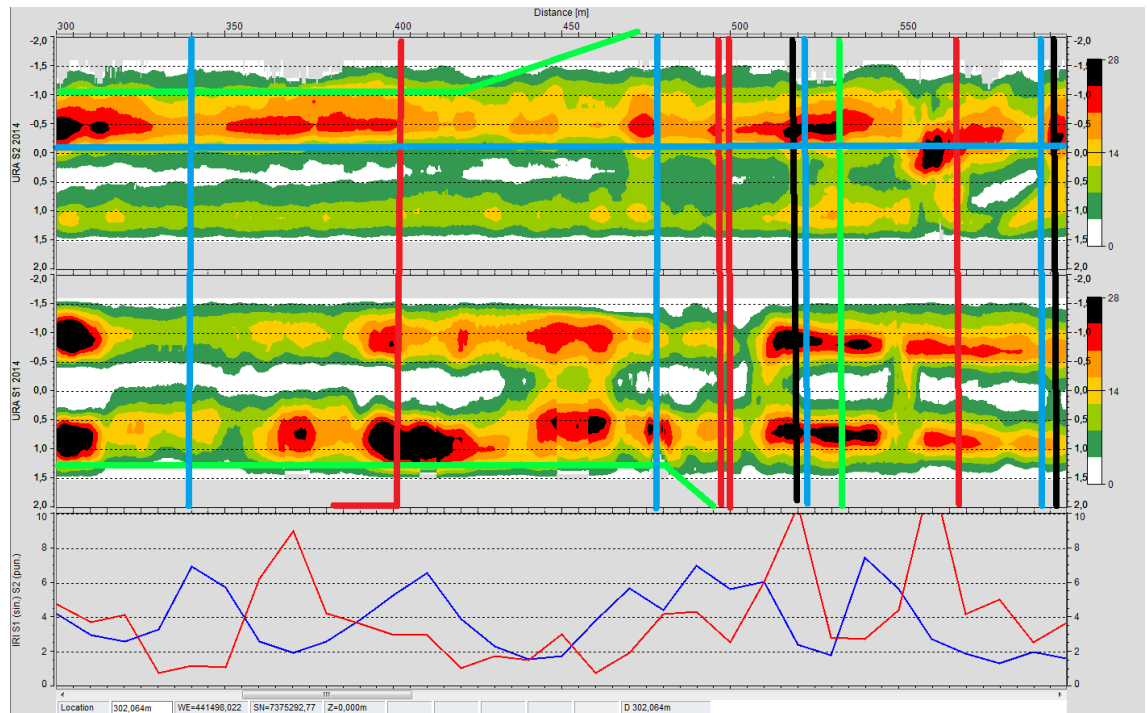
suudessa karkeasta 0...64 mm murskeesta. Lisäksi pintavesien kuivatuksen vaatimat ojien muotoilut tarkastettiin ja esiin tulleet salaojaputket liitettiin sadevesiviemäriin. (Riihiniemi 2016.)

Tämä osoittaa, että kunnallistekniikan läsnäolo katurakenteessa ei automaattisesti tarkoita sitä, että kyseisellä kadulla tulee olemaan ongelmia. Jos mitoitus, materiaalit, tiivistys ja kuivatus ovat kunnossa, ongelmia ei välttämättä esiinny lainkaan. Myös oikein tehdyt työvaiheet ovat edellytys toimivaan katurakenteeseen.

10.1.3 Etelä

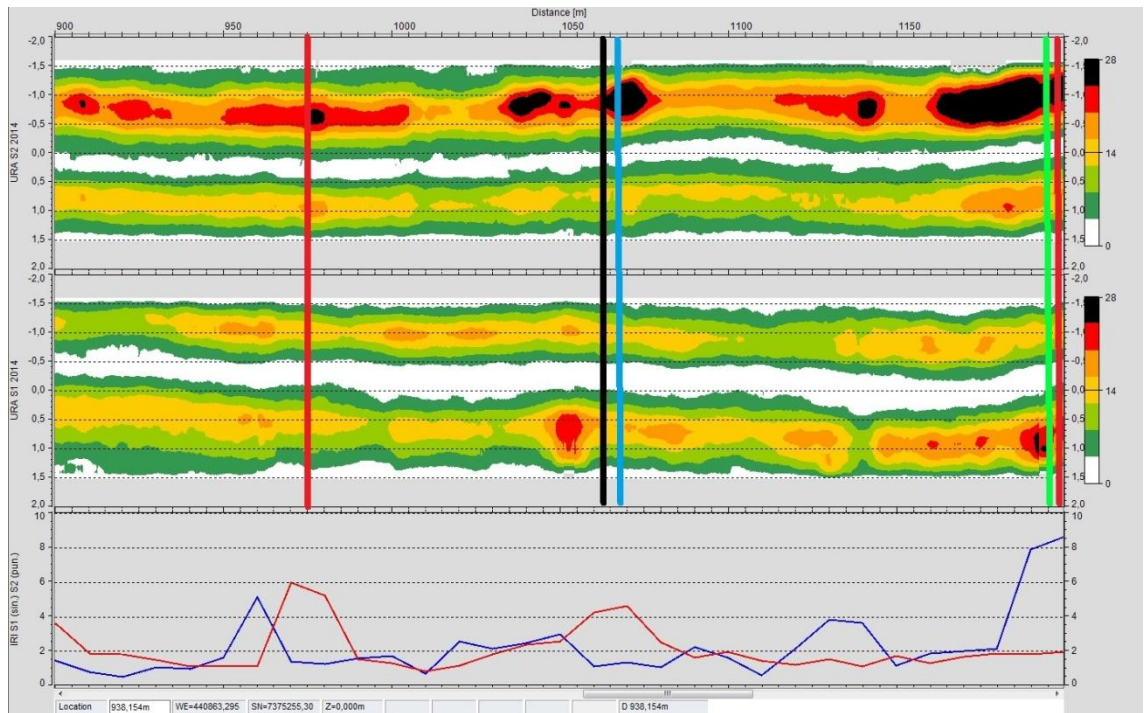
Etelän alueen kolmella kadulla oli kohdealueista kaikista eniten johtorakenteita – ja myös ongelmia. Huonokuntoisimmaksi kunnallistekniikan osalta nousi Teollisuustie, jonka 45:stä johdosta jopa 36 aiheutti ongelmia katurakenteelle. Tämä voidaan osaksi selittää huonolla maaperällä ja suuremmalla raskaan liikenteen määrällä suhteessa muihin kohteisiin. Pappilantien ja Yliopistonkadun tutkimisessa käytettiin vuoden 2012 mittaustuloksia, sillä molempiin katuihin on tehty 2012 jälkeen mittavia päällystekorjaustöitä, jonka vuoksi mahdolliset kunnallistekniikan aiheuttamat ongelmat eivät ole vielä uuteen päällysteeseen syntyneet. Näillä kahdella kadulla oli yhteensä 151 ajoradan alla olevaa johtoa, joista 82 aiheutti poikkeamia kadulle.

Kuviossa 38 on mittausaineistoa paaluväliltä 300-600m. Sekä IRI-, että laseraineistossa on selvästi nähtävillä kuinka johtorakenteiden sijainti korreloi aineistossa näkyvien poikkeamien kanssa. Putkien runsaus aiheuttaa epätasaista routanousua kuten routanousuvideon kuvassa (kuvio 48) näkyy. Tämä taas aiheuttaa heittoja, halkeamia ja muita ongelmia ajan kuluessa enemmän ja enemmän.



Kuvio 38. Teollisuustie plv 300-600m. Ylin ikkuna kuvaa suunnan 2 ja keskimäinen suunnan 1 uraisuutta. Alimmassa ikkunassa sininen käyrä kuvaa suunnan 1 ja punainen käyrä suunnan 2 IRI-arvoa

Kunnallistekniikan vaikutusta kadun huonoon kuntoon todistaa myös kuvio 39 saman kadun paaluväliltä 900-1200m. Kun kadun poikkisuunnassa alittavia johtoja on vain viisi kappaletta, IRI- ja laserdatoissa näkyvä poikkeavuus on paljon vähäisempää. Huomionarvoista on myös se, että aineistossa näkyvät poikkeamat ovat juuri johtojen kohdalla. 975 metrin kohdalla näkyvä kaukolämpöjohto on aiheuttanut kuviossa 40 näkyvän ongelman. Kuvassa näkyy myös rajua tyypin 2 urautumista.

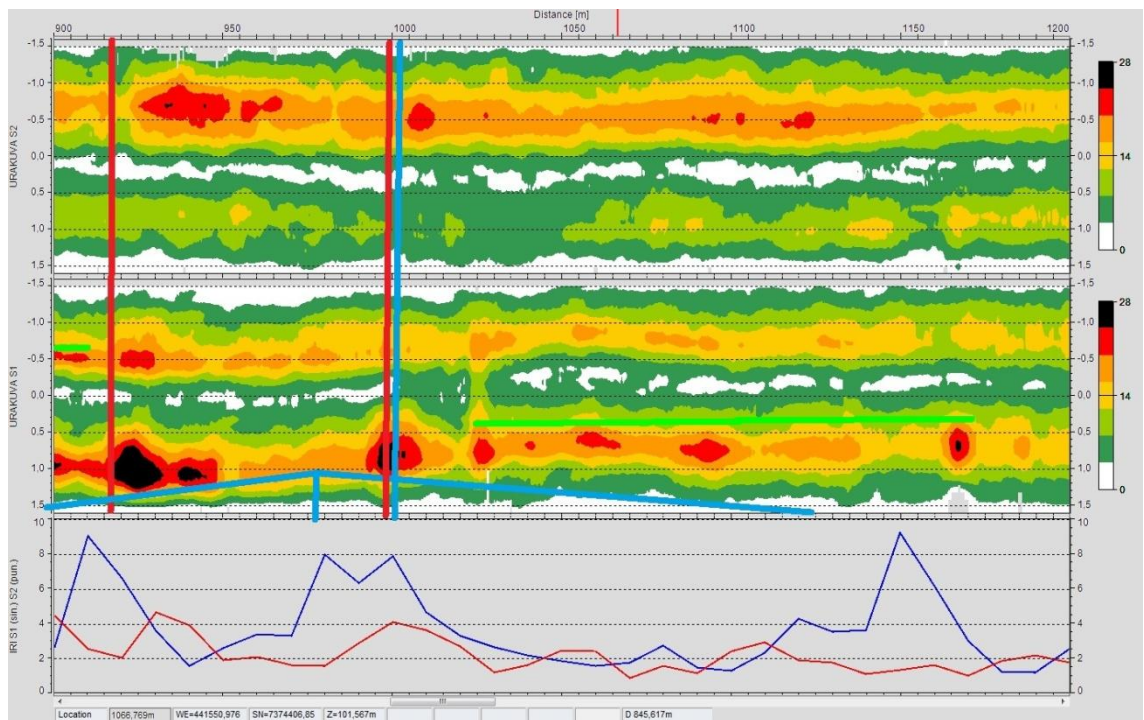


Kuvio 39. Teollisuustie plv 900-1200m. Ylin ikkuna kuvaa suunnan 2 ja keskimäinen suunnan 1 uraisuutta. Alimmassa ikkunassa sininen käyrä kuvaa suunnan 1 ja punainen käyrä suunnan 2 IRI-arvoa

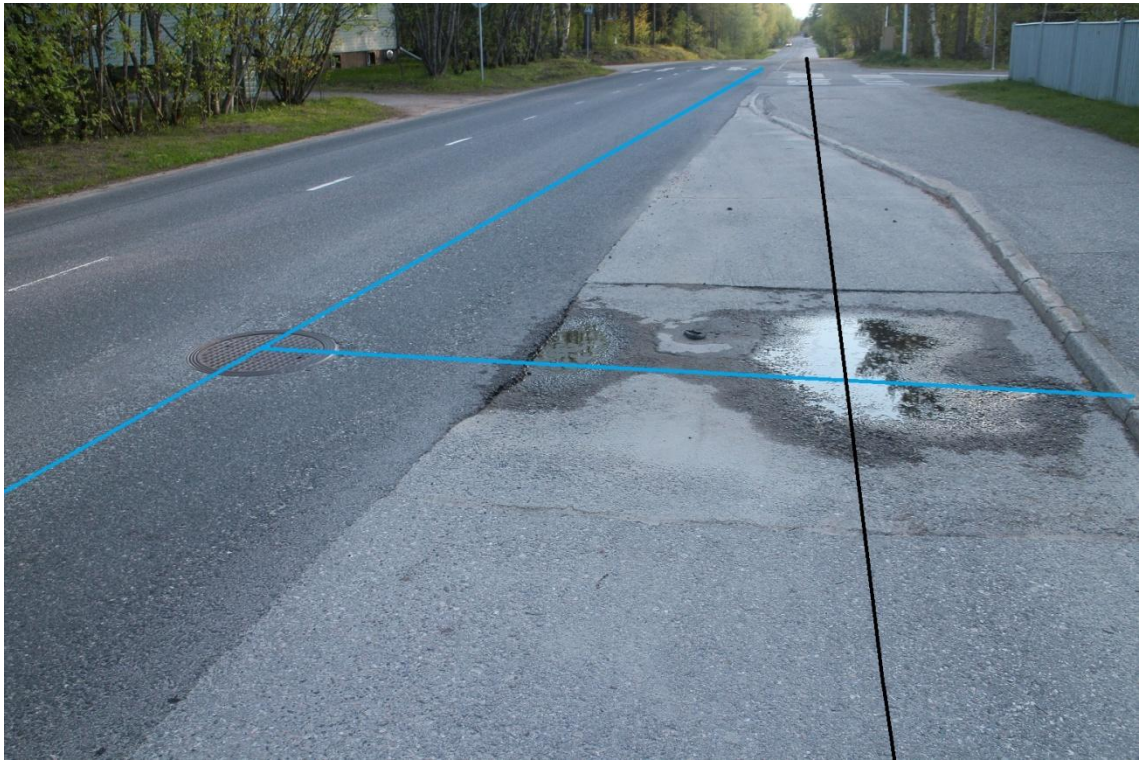


Kuvio 40. Poikkisuuntaisen kaukolämpöjohdon aiheuttama vaurio, Teollisuustie plv 975m (Rytilahti 2015)

Pappilantien alku paaluvälillä 0-800m on kunnallistekniikan näkökulmasta hyväkuntoista. Välillä on paljon kadun poikkisuunnassa alittavia raaka-, jäte- ja sadevesijohtoja, joista vain pieni osa aiheuttaa aineistossa nähtäviä poikkeamia. Paaluvälillä 800-2000m ongelmakohtia on huomattavasti enemmän. Kuviossa 41 on esimerkki mittausaineistosta paaluvälillä 900-1200m. Harri Heikkinen on Aalto-yliopistolle tekemässään lisensiaatintyössään todennut, että deformaatio on voimakasta kaduilla, joilla kulkee säännöllisesti linja-autoliikennettä ja varsinkin kohdissa, joissa linja-autot joutuvat ajamaan hiljaa ja pysähtymään (Heikkinen 2012, 93). Kunnallistekniikan läsnäolo näillä paikoilla korostaa ongelmia, kuten plv 975 metrin kohdalla oleva linja-auton pysähtymislevike, jonka keskellä kulkee raaka- ja jätevesiputki todistaa (kuvio 42).



Kuvio 41. Pappilantie plv 900-1200m. Ylin ikkuna kuvaa suunnan 2 ja keskimäinen suunnan 1 uraisuutta. Alimmassa ikkunassa sininen käyrä kuvaa suunnan 1 ja punainen käyrä suunnan 2 IRI-arvoa



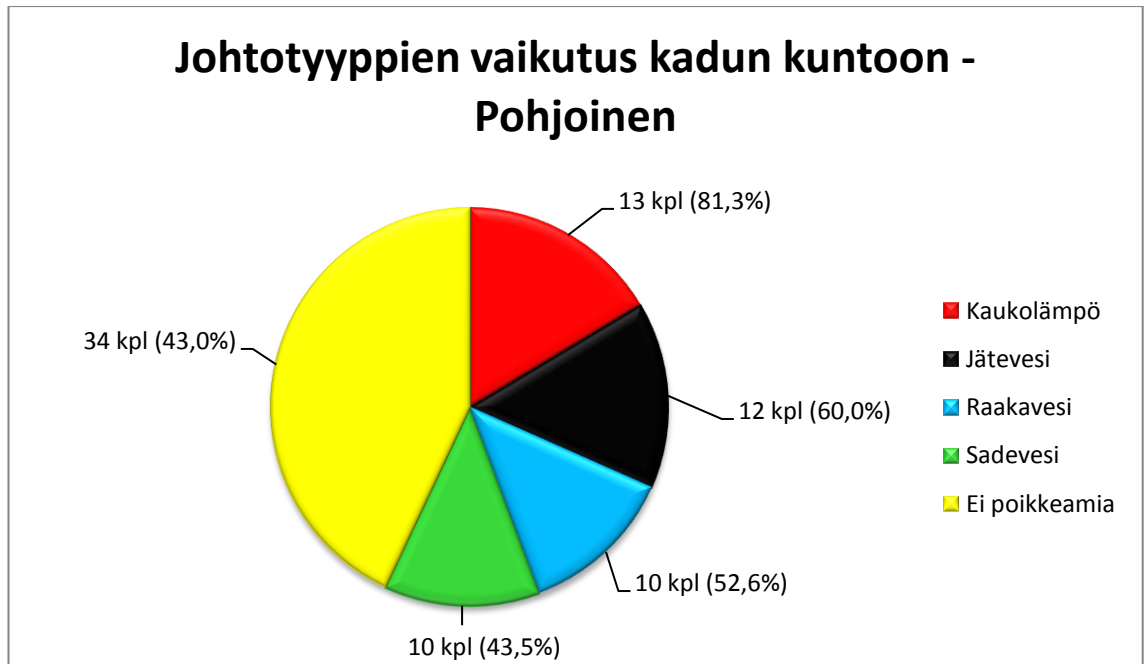
Kuvio 42. Linja-auton aiheuttama painuma pysähtymislevikkeellä, Pappilantie plv 975m (Rytilahti 2015)

10.2 Tilastollinen tarkastelu

Aineistolle tehtiin tässä työssä myös tilastollinen tarkastelu. Tutkimuksen 12 kadun rakenteissa oli yhteensä 363 kunnallistekniikan johtoa, jota voidaan pitää tarvittavan suurena määränä sille, että tarkastelu on tilastollisesti edustava. Myös kohteiden sijainti eri alueilla ja erilaisilla maaperillä lisää tarkastelun luotettavuutta. Kuvioissa 43, 44 ja 45 on esitetty johtokohtaisesti ja kappalemääräisesti johdot, jotka aiheuttavat poikkeamia ja yhteenlaskettuna johdot, jotka eivät aiheuta poikkeamia aineistossa. Prosenttiluku kappalemäärän perässä kertoo, kuinka suuri osa kunkin alueen putkityypeistä aiheutti poikkeamia tutkimustuloksissa. Myös poikkeamia aiheuttamattomien johtojen osuus on esitetty.

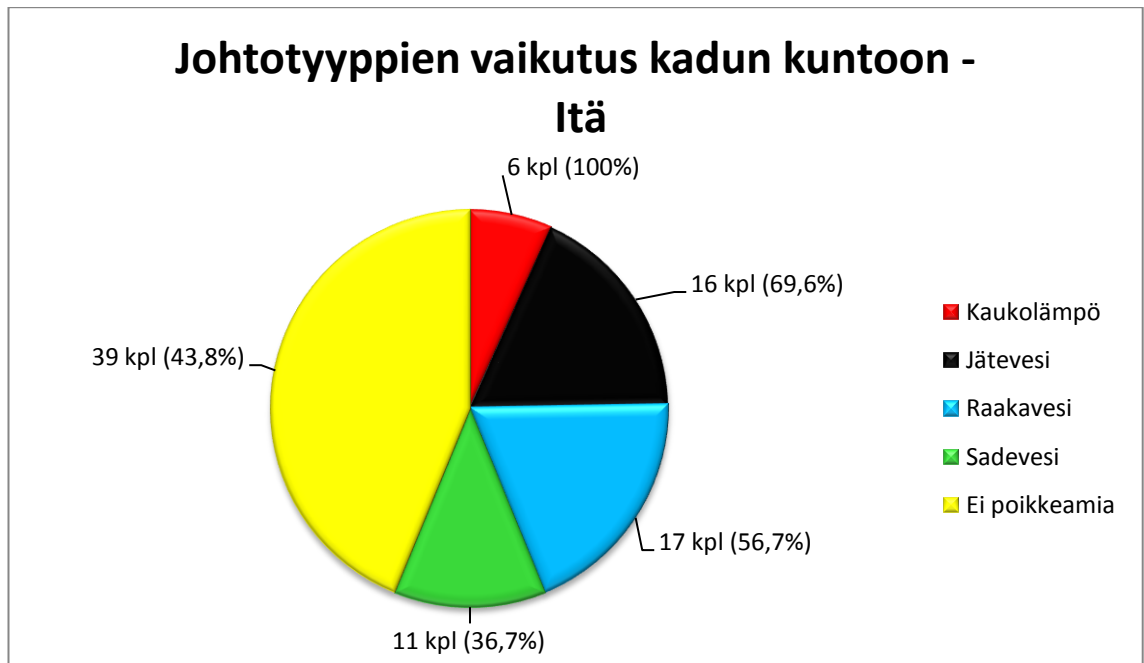
Pohjoisen alueella oli tutkimuskohteista vähiten kunnallistekniikan johtoja. Johtojen aiheuttamat ongelmat olivat kokonaisuutta tarkasteltaessa pienempiä ja vähemmän näkyviä ongelmia aiheuttavia, kuin muilla alueilla. Eniten ongelmia aiheuttivat kaukolämpöjohdot, joista 13 johtoa 16:sta aiheutti poikkeamia katu-

rakenteille. Yhteensä 57 % tällä alueella sijaitsevista johdoista näkyivät poikkeamina aineistossa. Suurin osa poikkeamia aiheuttaneista johdoista aiheuttivat poikkisuuntaisia epätasaisuuksia eli heittoja.



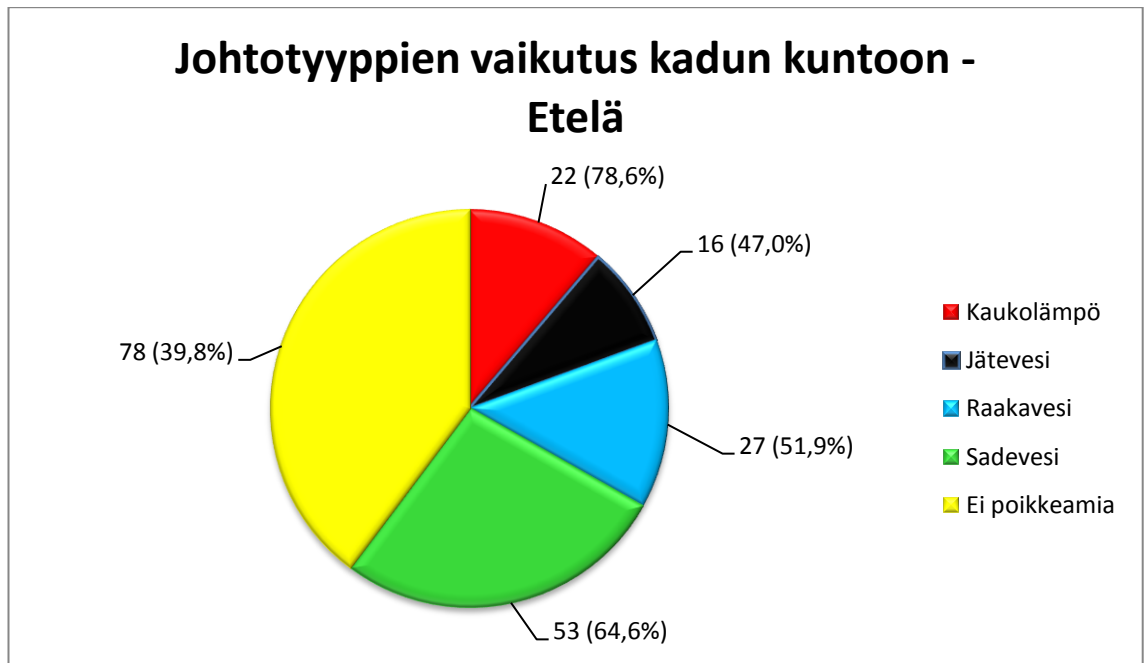
Kuvio 43. Johtotyyppien vaikutus kadun kuntoon - Pohjoinen. Kappalemäärä kertoo, kuinka moni putki aiheuttaa poikkeaman aineistossa ja suluissa oleva prosenttiluku näiden putkien määrän suhteessa kaikkiin putkiin

Idän alueen johdoista noin 56 % aiheutti poikkeamia katurakenteille. Jätevesi- ja raakavesijohdot aiheuttivat idässä suhteessa enemmän ongelmia muihin kohdealueisiin verrattuna. Jätevesijohdoista lähes 70 % näkyivät poikkeamina aineistoissa, raakavesijohdoista noin 57 %. Kaukolämpöjohdoista jokaisen voitiin katsoa aiheuttavan ongelmia, mutta näitä johtoja oli vain kuusi kappaletta alueella. Poikkeamia aineistoihin aiheuttaneet johdot näkyivät kaduilla eniten päällysteen halkeamina ja heittoina idän alueella.



Kuvio 44. Johtotyyppien vaikutus kadun kuntoon - Itä. Kappalemäärä kertoo, kuinka moni putki aiheuttaa poikkeaman aineistossa ja suluissa oleva prosenttiluku näiden putkien määrän suhteessa kaikkiin putkiin

Etelän alueen kaduilla oli tämän tutkimuksen kohdealueista eniten kunnallistekniikkaan liittyviä poikkeamia. Yli 60 % alueen johdoista aiheutti poikkeamia tutkimusaineistoihin, joista suuri osa aiheutti myös näkyviä ongelmia katurakenteille. Etelän alueella lähes 65 % sadevesijohdoista aiheutti poikkeamia aineistoihin, kun muilla alueilla vastaava luku oli 40 % luokkaa. Jätevesijohdot taas aiheuttivat vastaavasti vähemmän poikkeamia muihin alueisiin verrattuna, noin 47 % johdoista. Etelän alueen katurakenteen ongelmat ovat huomattavasti pahempia, kuin muilla alueilla. Ongelmat ovat useiden tekijöiden summa, joista suurimpina mainittakoon muita alueita vilkkaampi raskas liikenne ja huonommat pohjamaat. Kunnallistekniikan johtojen kohdalla ongelmat korostuvat. Johtojen aiheuttamat poikkeamat näkyvät tyypillisesti vahvana urautumisena, halkeamina ja heittoina.



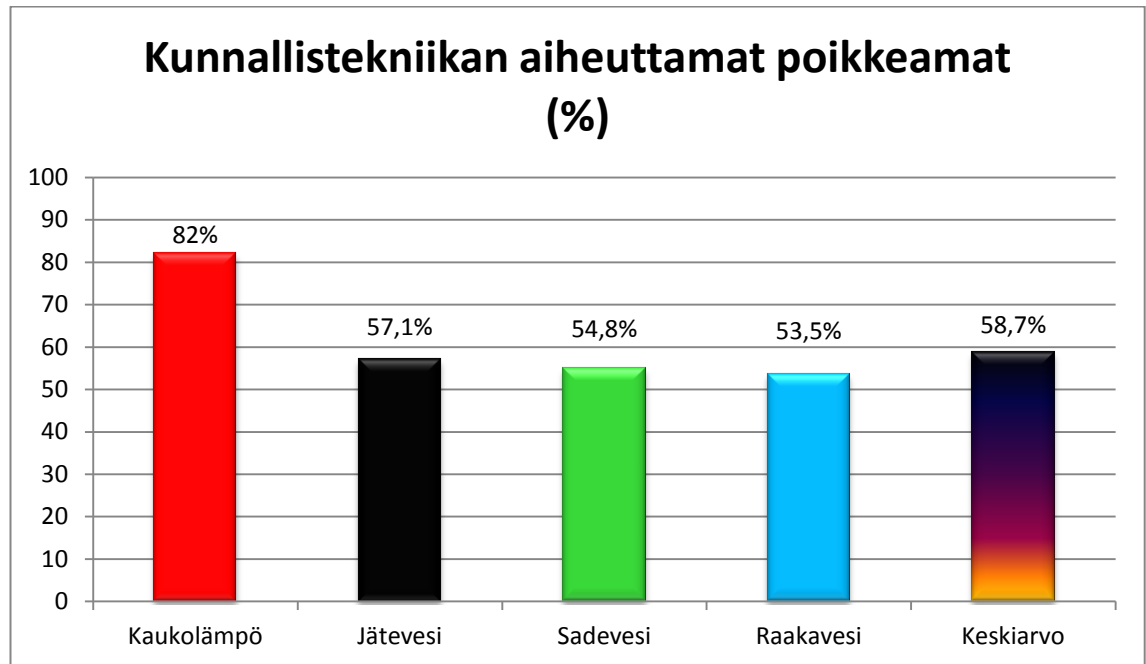
Kuvio 45. Johtotyyppien vaikutus kadun kuntoon - Etelä. Kappalemäärä kertoo, kuinka moni putki aiheuttaa poikkeaman aineistossa ja suluissa oleva prosenttiluku näiden putkien määrän suhteessa kaikkiin putkiin

Taulukossa 1 on esitetty kappalemääräisesti johtotyyppien vaikutus katuverkolle kaikkien alueiden osalta. Sadevesiputkia on katuverkolla määrällisesti eniten ja niistä löytyi myös eniten katuverkolle aiheuttamia poikkeamia. Kaukolämpöputkia oli taas määrällisesti vähiten, 50 kappaletta, mutta niistä jopa 41 aiheutti poikkeamia aineistoihin.

Taulukko 1. Poikkeamat johtotyypeittäin

Johtotyyppi	Aiheuttaa poikkeamia	Ei aiheuta poikkeamia
Kaukolämpö	41	9
Jätevesi	44	33
Sadevesi	74	61
Raakavesi	54	47
Yhteensä	213	150

Kuten kuviosta 46 voidaan todeta, kaukolämpöputket ovat tutkimusta edeltäneen oletuksen mukaisesti eniten poikkeamia aiheuttava johtotyyppi. Jopa 82 % 50:stä putkesta aiheutti poikkeamia katuverkossa. Muiden johtotyyppien osuus oli keskiarvoisesti noin 55 % luokkaa. Kaikkien johtotyyppien poikkeamien osuus tarkastelluista putkista oli 58,7 %.

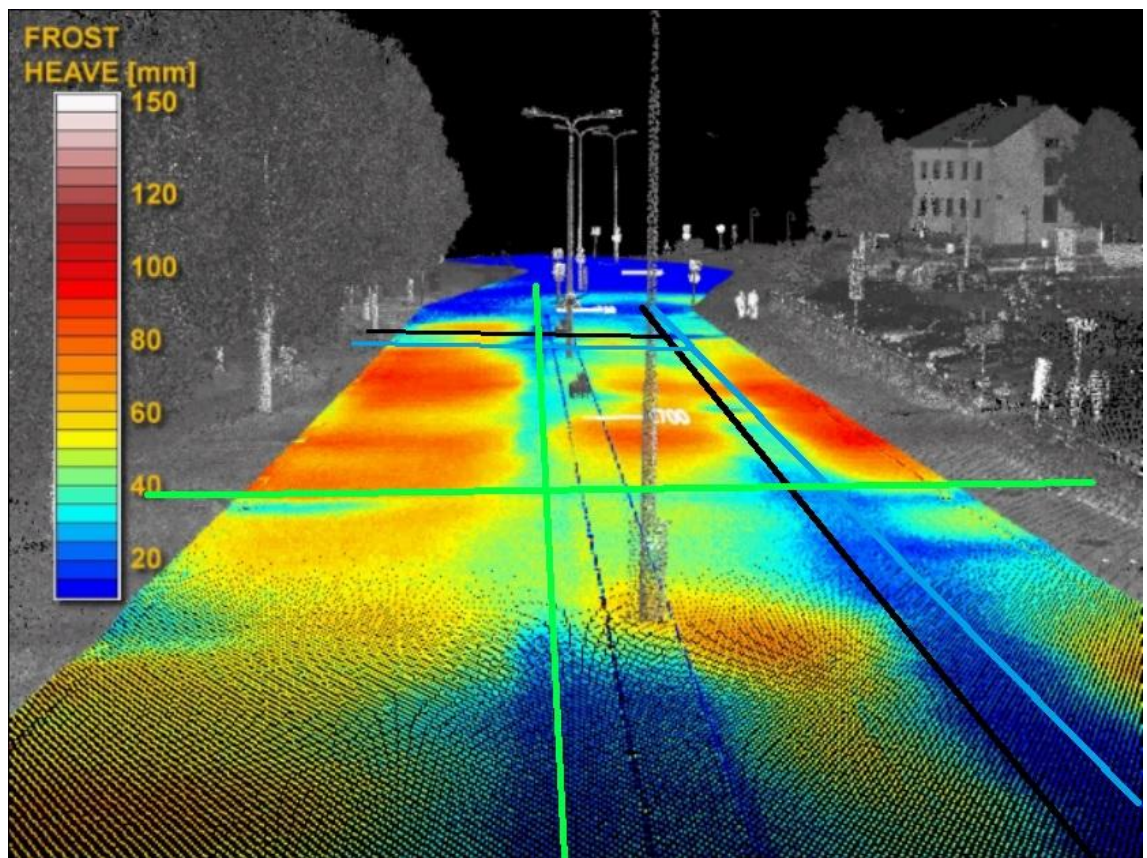


Kuvio 46. Kunnallistekniikan aiheuttamat poikkeamat (%)

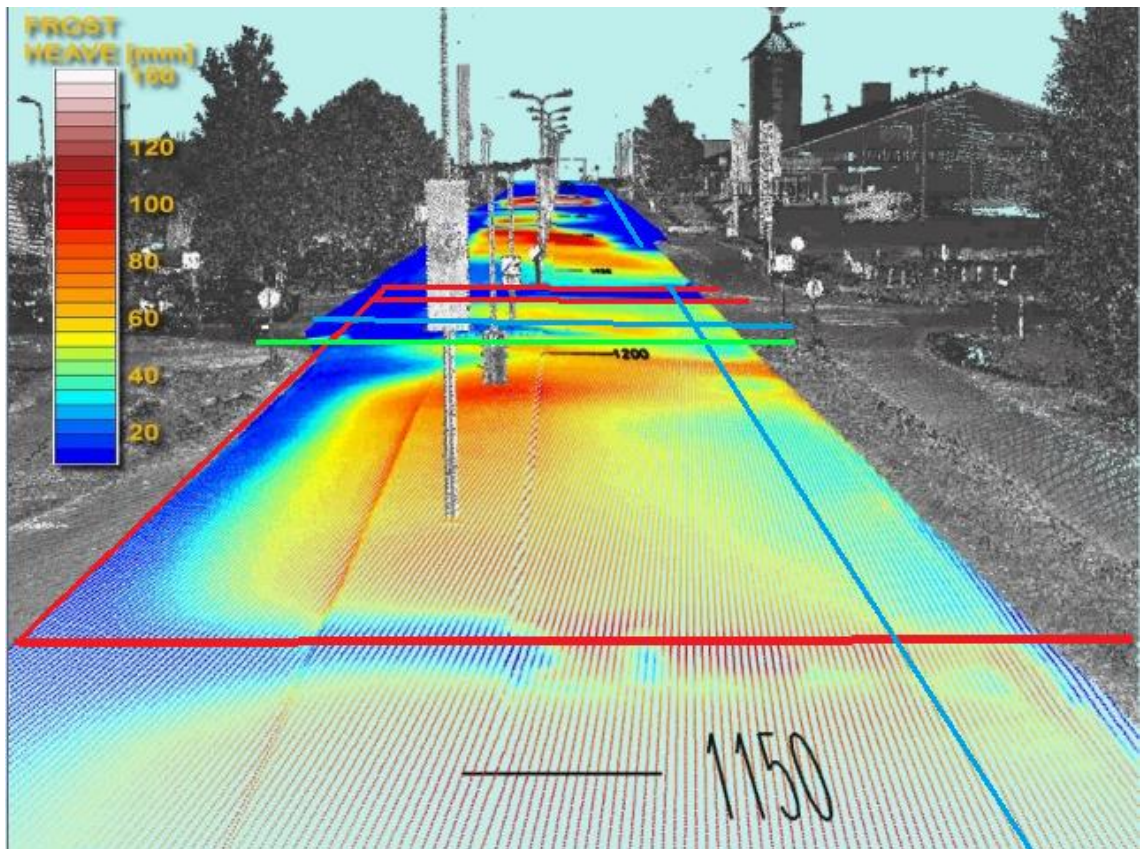
Tilastollinen tarkastelu osoittaa, että eri johtotyyppien vaikutus katuverkon kuntoon erilaisilla kohdealueilla on hyvin samantyyppinen. Jokaisella alueella kunnallistekniikan aiheuttamien poikkeamien määrä oli 60 % luokkaa, mikä tukee tässä työssä esitettyjä väitteitä kunnallistekniikan vaikutuksesta katuverkon kuntoon. Tilastollinen tarkastelu osoittaa myös sen, että erilaisella maaperällä olevien katujen johdot aiheuttavat samassa suhteessa poikkeamia katurakenteesseen: huonoimmilla maaperillä ongelmat ovat vain suurempia ja näkyvämpiä.

10.3 Kunnallistekniikka ja routanousu

Routanousuvideot tukevat muualta saatuja tuloksia kunnallistekniikan vaikutuksesta katuverkon kuntoon. Johtojen ympärillä routanousu on vähäisempää, mikä näkyy sinisinä ja keltaisina väreinä videoissa. Oletuksen mukaisesti, kaukolämpöjohtojen kohdalla oli vähiten routanousua, sillä ne kulkevat lähempänä pintaa ja ovat lämpimämpiä, kuin muut johtotyytit. Johtojen ympärillä oleva routtimattomuus taas aiheuttaa routivuuseroja muun kadun kanssa. Kun maaperä kadulla routii, mutta johtojen ympärillä ei routaa ole, kadulle syntyy epätasaista routimista. Epätasainen routiminen taas aiheuttaa päällysteelle jännityksiä, joista syntyy halkeamia. Halkeamista taas seuraa se, että päällyste ei enää toimi yhtenäisenä laattana, jolloin ongelmat alkavat lisääntyä. Kuvioissa 47, 48 ja 49 on esimerkkikuvia routanousuvideoista, joihin on yhdistetty katurakenteessa olevat johtorakenteet.

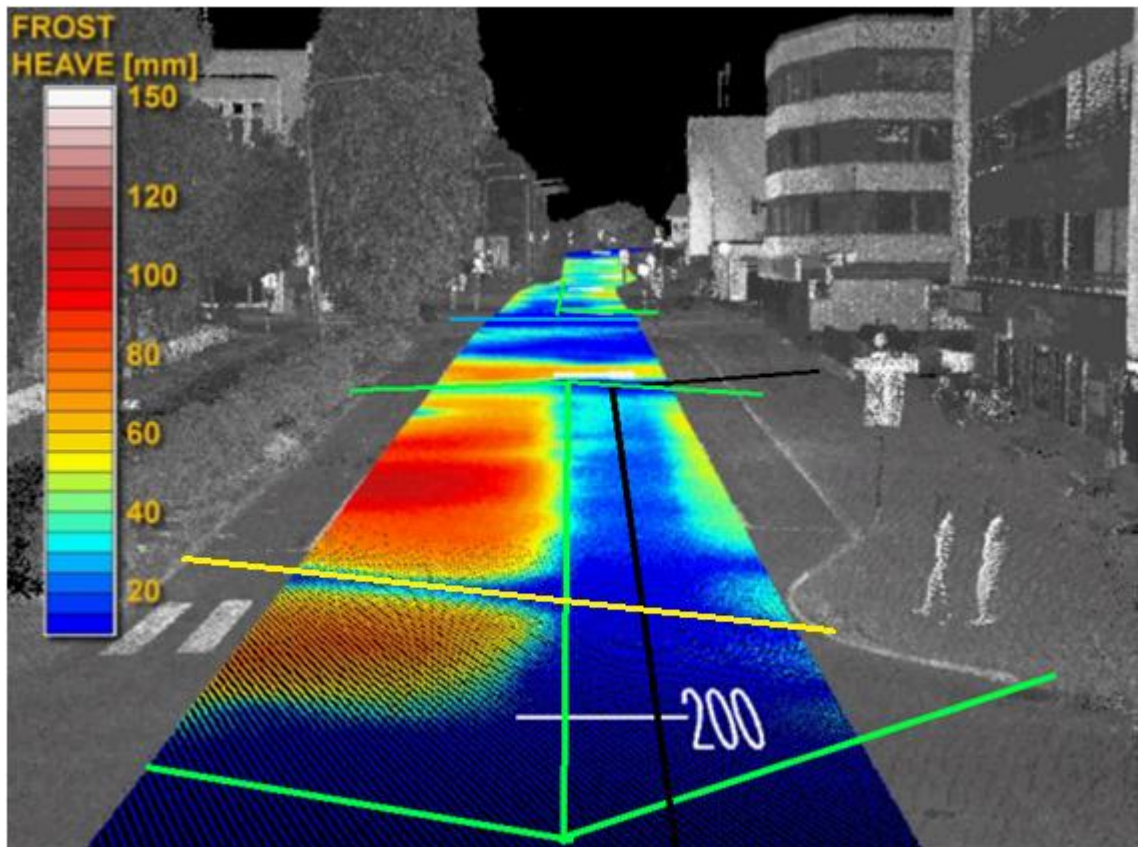


Kuvio 47. Routanousu, Valtakatu (Mukaillen GeoVap s r.o 2011)



Kuvio 48. Routanousu, Teollisuustie (Mukaillen GeoVap s r.o 2011)

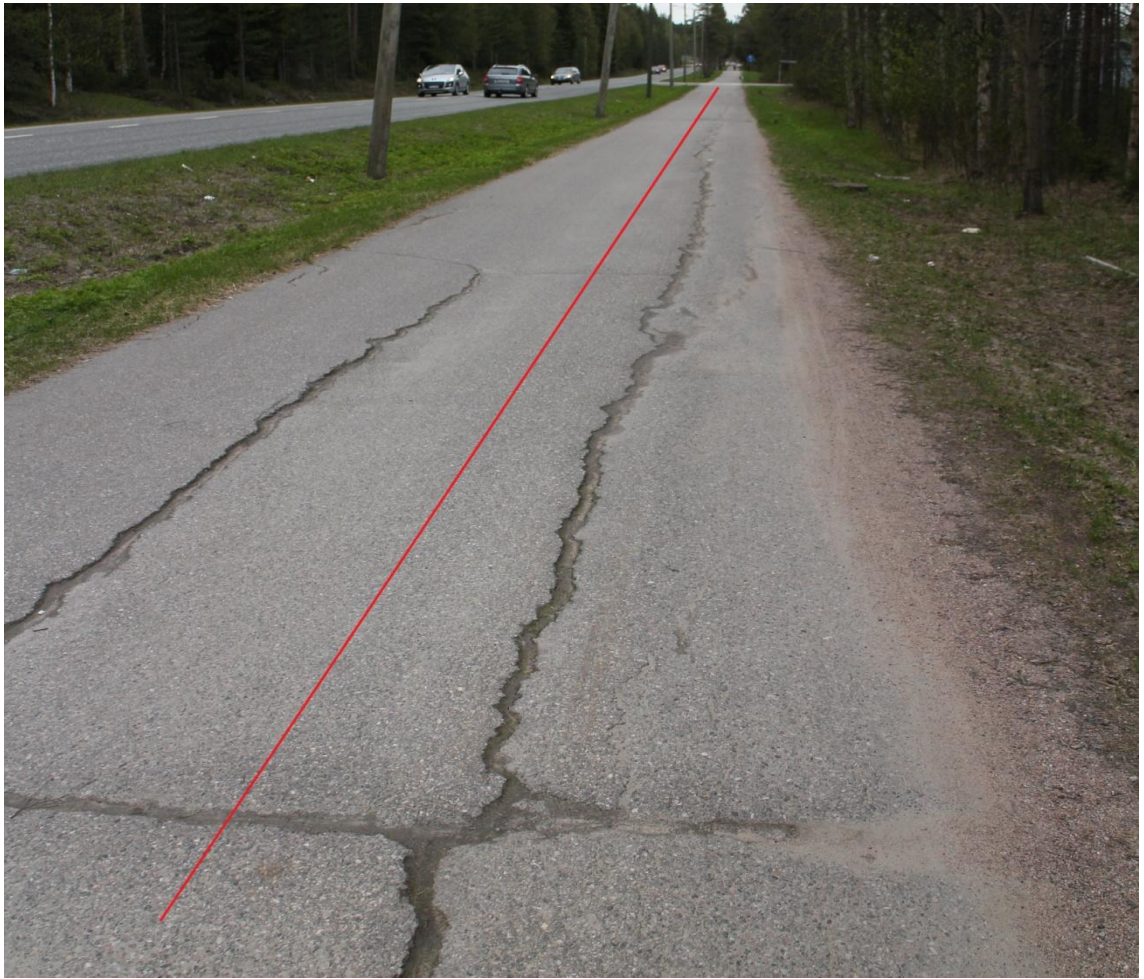
Kuvioon 49 on lisätty keltaisella värillä viiva kuvaamaan johtoa, joka ei näy tutkimuksessa käytetyissä johtokartoissa. Maatutka-aineistojen perusteella tässä kohdassa on johtokaivanto. Tämä johto voi olla esimerkiksi teleoperaattorin kaapeli, joiden kaapelikarttoja tässä työssä ei ole käytetty. Myös kunnallistekniikan johto, jota ei ole kartoitettu, on mahdollinen.



Kuvio 49. Routanousu, Ruokasenkatu (Mukaillen GeoVap s r.o 2011)

10.4 Kevyen liikenteen väylät

Tämän työn yhteydessä tarkasteltiin lyhyesti kunnallistekniikan vaikutusta myös kevyen liikenteen väylien kuntoon. Katujen lisäksi kunnallistekniikka aiheuttaa ongelmia myös kevyen liikenteen väylille. Kevyen liikenteen väylät ovat heikkomman rakenteensa ja ohuemman päällysteensä ansiosta vielä herkempiä vaurioitumaan kuin ajoradat. Roudalla on tässäkin iso merkitys vaurioitumiseen. Kuvion 50 esimerkki on Ounasrinteentien vieressä kulkevalta kevyen liikenteen väylältä, jossa väylän keskellä kulkee kaukolämpöjohto. Kaukolämpöjohto pitää maaperän johdon ympäriltä lämpimämpänä, jonka takia routanousua ei väylän keskellä tapahdu. Kun väylän reunat routivat, mutta keskiosa ei, jännitys päällysteessä käy liian suureksi ja päällyste hajoaa. Kun päällyste on haljennut, se ei enää toimi yhtenäisenä laattana, joka taas aiheuttaa entistä pahempia epätaisuuksia.



Kuvio 50. Ounasrinteentien kevyen liikenteen väylä (Rytilahti 2015)

Kevyen liikenteen väylän kunnossapito on tärkeää eri liikkujaryhmien kannalta. Päällysteen tasaisuus on niin liikuntarajoitteisille kuin pyöräilijöille, rullaluisteli-joille ja muille ns. vauhtilajien edustajille tärkeä turvallisuutta ja liikkumista parantava tekijä. Myös pituus- ja poikkisuuntaiset routahalkeamat tai yllättävät kuopat voivat aiheuttaa vaaratilanteita ja liikkumisen hankaloitumista. (Tiehallinto 2005a, 32–33.)

11 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä esitettyjen tutkimustulosten mukaan kunnallistekniikan vaikutus katuverkon kuntoon on merkittävä. Yli puolet kaikista tutkimuskohteissa olleista kunnallistekniikan johdoista voitiin katsoa aiheuttavan poikkeamia kaduille. Joukossa oli paljon johtoja, joiden aiheuttamat ongelmat näkyivät jo päällysteen vaurioina, mutta myös paljon piileviä vikoja, jotka tulevat ennen pitkään aiheuttamaan uusia vaurioita kaduille.

Pahimpana johtotyyppinä katuverkon kunnolle voidaan pitää kaukolämpöjohtoja, jotka asennetaan noin metrin syvyyteen. Lisäksi niissä virtaa lämpimämpi vesi kuin muissa johtotyypeissä, joka pitää johtoa ympäröivän maan sulana. Kaukolämpöjohdoista yli 80 % voitiin todeta tutkimuksessa käytetyillä menetelmillä aiheuttavan poikkeamia aineistoon. Routarajan alapuolelle noin 2,7 metriin asennettavat raaka-, sade- ja jätevesijohdot aiheuttivat hieman yli joka toisessa tapauksessa poikkeamia. Kaukolämpöä huomattavasti syvemmälle asennettavien vesihuollon johtojen vaikutus katurakenteelle voidaan osittain selittää sillä, että kaivannon täyttöön käytettävää routimatonta materiaalia tulee paljon syvemmälle, kuin missä kaivantoa ympäröivän maaperän routaraja sijaitsee. Vesihuollon johtotyypeistä jätevesijohdojen voitiin katsoa aiheuttavan eniten poikkeamia. Jätevesijohdoissa kulkee muita vesihuollon johtoja lämpimämpi vesi, joten tuloksista voi esittää johtopäätöksen, että mitä lämpimämpi vesi johdossa virtaa, sitä enemmän poikkeamia johto aiheuttaa katurakenteelle.

Tässä työssä ei tarkasteltu katurakenteessa olevien tele- tai sähkökaapeleiden vaikutusta katujen kunnolle. Oletuksena voidaan kuitenkin todeta, että myös kaapelit aiheuttavat vastaavia ongelmia kaduille kuin kunnallistekniikka, sillä molempiin pätee samat kaivantoihin liittyvät ongelmat. Tämä johtopäätös juontaa siitä, että jokainen kadun aukaisu aiheuttaa muutoksen katurakenteessa.

Kunnallistekniikan aiheuttamat vauriot liittyvät aina pysyviin muodonmuutoksiin. Tyypillisimpiä ongelmia ovat päällysteen urautuminen, erilaiset, yleensä johdon-suuntaiset halkeamat sekä pituus- ja poikkisuuntaiset epätasaisuudet. Urautu-

misessa urautumistyyppit 0, 1 ja 2 ovat tavallisimpia. Rakennusvaiheen huono tiivistys aiheuttaa tyyppin 0 urautumista, eli täyttöön käytetty maa-aines tiivistyy liikenteen johdosta. Kadun poikkisuuntaan ylittävissä kaivannoissa tämä aiheuttaa putken kohdalle heiton. Pitkittäissuunnassa taas huonosti tiivistetty kaivanto aiheuttaa epätasaista urautumista. Tyyppin 1 urautumista syntyy, kun vesi pääsee tierakenteen yläosaan ja tyyppin 2 urautumista silloin, kun maan alla vuotava putki pehmentää sen ympärillä olevaa maa-ainesta. Rovaniemen korkeudella kunnallistekniikka aiheuttaa ongelmia epätasaisen routimisen seurauksena. Kunnallistekniikan johdot pitävät ympärillään olevan maaperän routa-aikaan sulana. Kun muu katurakenne alkaa routia, mutta johtojen ympärillä tätä ei tapahdu, syntyy epätasaista routanousua. Epätasainen routanousu taas johtaa suuriin jännitystiloihin päällysteessä, ja ennen pitkään päällyste antaa periksi ja halkeaa. Kun päällysteeseen tulee halkeama, se ei toimi enää yhtenäisenä laattana, vaan epäjatkuvuuskohdassa ongelmat alkavat lisääntymään.

Merkittävin katuverkon kuntoa heikentävä tekijä kunnallistekniikan osalta on johtokaivannot. Vuotoja korjattaessa ja verkostoa saneerattaessa kaivantojen aukaisu ja uudelleentäyttö aiheuttaa muutoksia katurakenteeseen. Vaikka täytössä käytettäisiin samoja materiaaleja kuin mitä sieltä otettiin pois, katurakenne ei silti pysy täysin samana kuin ennen kaivannon tekoa. Katurakenteen tiivysaste voi olla hyvästä tiivistyksestä riippumatta eri kuin ympäröivällä maalla. Nämä seikat näkyvät ennen pitkään kasvaneina jännityksinä epäjatkuvuuskohdissa ja aiheuttavat vaurioita katurakenteisiin. Myös huonosti tehdyillä siirtymäkiilarakenteilla ja routalevyjen puutteellisella asennuksella on oma roolinsa katurakenteen vaurioihin. Lisäksi kunnallistekniikan kaivot voivat aiheuttaa ongelmia, jotka näkyvät pinnassa asti. Kun kaivot pysyvät roudan sulaessa paikoillaan, mutta ympäristö routii, aiheutuu useasti aiemminkin mainittua routanousua. Tämä taas aiheuttaa heittoja ja mahdollisia halkeamia päällysteeseen.

Katurakenteelle aiheutuvien ongelmien lisäksi kunnallistekniikan aiheuttamat vauriot, kuten kaikki muutkin katurakenteessa olevat vauriot aiheuttavat haittaa myös sen käyttäjille, omistajille ja sivullisille. Tienkäyttäjille ongelmat ilmenevät tärinäistä ja heitoista aiheutuneina terveysongelmina ja ajomukavuuden heikke-

nemisenä, polttoaineen kulutuksen kasvuna ja renkaiden kulumisena. Kaupungille vauriot aiheuttavat lisäkustannuksia kasvaneina kunnossapidon tarpeina. Sivullisille kadulla olevat epätasaisuudet voivat aiheuttaa meluhaittoja ja epä-mukavaa tärinää. Esimerkiksi lähellä raskaan liikenteen käyttämää katua asuva voi kokea epätasaisuuksien aiheuttamat raskaan liikenteen ajoneuvojen kolahdukset hyvinkin häiritsevinä.

Tämä opinnäytetyö on tehty vain Rovaniemen katuverkon aineistosta, mutta on todennäköistä, että työssä esiin tulleet ongelmat vaivaavat katuverkkoa muual-lakin päin Suomea. Kaikista ongelmista huolimatta kunnallistekniikka kuuluu kaupunkialueilla katuverkkoon. Joissain määrin sen vaikutuksia katuverkon kunnolle voidaan vähentää kiinnittämällä huomiota sekä kunnallistekniikan, että katuverkon suunnitteluun, rakentamiseen ja saneeraukseen. Jätän tässä työssä auki kysymyksen ovatko tutkimuksessa esiin nostetut ongelmat niin merkittäviä, että niihin tarvitsisi puuttua esimerkiksi rakennusohjeita tarkastamalla. Esimer-kiksi johtojen syvemmälle sijoittaminen lisäisi rakennuskustannuksia, joten onko pidemmässä tähtäimessä kannattavampaa rakentaa samalla tavalla kuin tä-hänkin asti, vaikka kunnossapitoon ja mahdollisiin päällystesaneerauksiin ku-luisikin vaurioiden takia enemmän rahaa? Tutkimusta olisi mielenkiintoista jat-kaa toisen, etelämpänä sijaitsevan kaupungin osalta ja verrata saatuja aineisto-ja keskenään. Tästä voisi saada selville esimerkiksi kuinka suuri merkitys routi-misella on kunnallistekniikkaa sisältävälle katuverkolle. Useamman aineiston avulla voitaisiin myös havaita, onko rakennustavoissa tai käytetyissä kunnallis-tekniikan ja katurakentamisen materiaaleissa eroja.

LÄHTEET

A 6.6.2013/407 Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta.

Belt, J., Lämsä, V., Savolainen, M. & Ehrola, E. 2002. Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto. Tiehallinnon selvityksiä 15/2002.

Dawson, A. & Kolisoja P. 2004. Permanent deformation. ROADDEX. Viitattu 6.2.2016 http://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/01/2_1-Permanent-Deformation_I.pdf

Energiateollisuus ry. 2013. Kaukolämpöjohtojen suunnittelu- ja rakentamisohjeet. Viitattu 12.6.2015. <http://energia.fi/julkaisut/suositus-l112013-kaukolampjohtojen-suunnittelu-ja-rakentamisohjeet>

Geologian tutkimuskeskus 2015. Karttapalvelut. Viitattu 16.6.2015 <http://gtkdata.gtk.fi/Maankamara/index.html>

Granlund, J. 2008. Health Issues Raised by Poorly Maintained Road Networks. ROADDEX.

Halttu, V. 2015. Roadscanners Oy. Asiakastoimintojen päällikön haastattelu 21.5.2015.

Heikkinen, H. 2012. Nastarenkaiden vaikutus päällysteiden kulumiseen taajamanopeuksissa. Lisensiaatintyö. Aalto-yliopisto: yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos

Herronen, T. 2016. Roadscanners Oy. Yksikönpäällikön haastattelu 16.2.2016.

Herronen, T., Saarenketo, T. & Varin, P. 2013. A83 Rest And Be Thankful – Ground Penetrating Radar, LIDAR & FWD surveys and their analyses. Roadscanners Oy.

Kontsas, A. 2015. Napapiirin Energia ja Vesi Oy. Vesihuoltopäällikön haastattelu. 26.6.2015.

Rakennustieto Oy 2015a. InfraRYL 2015/1 Jätevesiviemärit. Helsinki: Rakennustieto.

- 2015b. InfraRYL 2015/1 Kaivantojen täytöt. Helsinki: Rakennustieto.
- 2015c. InfraRYL 2015/1 Katurakenteet. Helsinki: Rakennustieto.
- 2015d. InfraRYL 2015/1 Maakaivannot. Helsinki: Rakennustieto.

Riihiniemi, J. 2015. Metsämuseontien perusparannuksen työselitys. Email timo.rytilahti@roadscanners.com 11.1.2016. Tulostettu 14.1.2016.

Riikonen, M. 2014. Telimassojen vaikutus tierakenteen vasteisiin. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 11/2014. Viitattu 27.2.2016
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts_2014-11_telimassojen_korottamisen_web.pdf

Roadscanners Oy 2016. Road Doctor® 3 and Modules. Viitattu 24.2.2016
<http://www.roadscanners.com/product/road-doctor-3/>

Rytilahti, T. 2012. Kaukolämpöverkoston vuoto- ja kunnossapitotarkastelu. Opinnäytetyö. Rovaniemen ammattikorkeakoulu, tekniikka ja liikenne, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Rytilahti, T. 2015. Valokuvia tutkimuskohteista.

Saarenketo, T. 2014. Päälystevauriot. Tampereen teknillisen yliopiston kurssimateriaali 2014.

Saarenketo, T. 2015, 2016. Roadscanners Oy. Toimitusjohtajan haastattelu 9.11.2015, 22.2.2016

Saarenketo, T., Matintupa, A. & Kourim, B. 2012. Experiences with New Technologies in Road Problems Diagnostics. Proceedings of EPAM 2012 Conference, Malmo, Sweden.

Saarenketo, T. & Middleton K. 2012a. Rovaniemen kaupungin katuverkon kuntoanalyysi Street Doctor-menetelmällä. Roadscanners Oy.

- 2012b. Rovaniemen pää- ja kokoojakatujen rakenteellinen kunto 2000-2010. Roadscanners Oy.

Saarenketo, T. & Middleton K. 2014. Rovaniemen kaupungin katuverkon kuntoanalyysi Street Doctor-menetelmällä. Roadscanners Oy.

Saarenketo, T., Pyhähuhta, M. & Munro, R. 2001 – 2014a. Mitä on pysyvä muodonmuutos ja miksi sitä pitää välttää. ROADDEX. Viitattu 12.1.2016.
<http://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/pysyvat-muodonmuutokset/mita-on-pysyva-muodonmuutos-ja-miksi-sita-pitaa-valtaa/>

- 2001 – 2014b. Pysyvät muodonmuutokset, urautumisen luokittelu. ROADDEX. Viitattu 29.5.2015 <http://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/pysyvat-muodonmuutokset/3-pysyvat-muodonmuutokset-urautumisen-luokittelu/>

- 2001 – 2014c. Tutkimus- ja mittaustekniikat. ROADDEX. Viitattu 27.5.2015. <http://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/pysyvat-muodonmuutokset/4-tutkimus-ja-mittaustekniikat/>

Tiehallinto 2005a. Kevyen liikenteen väylät liikuntapaikkoina. Viitattu 19.12.2015. <http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3200928-vkevliikentvaylliikunt.pdf>

- 2005b. Tien päällysrakenteen mitoituksessa käytettävät moduulit ja kestävyysmallit. Viitattu 15.1.2016. <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/tts71d.pdf>

Tiehallinto 2007. Käsikirja päällysteiden pinnan kunnon mittaamiseen. Viitattu 30.1.2016 http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3201047-v-kasikirja_paallysteiden_pinnan_kunnon_mitt.pdf.

Tiehallinto 2009. Päällysteiden paikkaus. Viitattu 1.6.2015. http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2200009-v-09-paallysteiden_paikkaus.pdf

Tiehallinto ja Energiateollisuus ry 2005. Kaukolämpöjohdot ja maantiet. Viitattu 4.6.2015. http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100032-v-05kaukol_ja_maant.pdf

Varin, P. & Saarenketo, T. 2014. Effect of axle and tyre configurations on pavement durability – a prestudy. ROADDEX. Viitattu 7.2.2016 <http://www.roadex.org/roadex-network-publishes-report-on-the-effect-heavy-trucks-on-pavement-durability/>

LIITE

Liite 1. Esimerkinäkymä, Teollisuustie plv 150-450m

