



AINETTA RIKKOMATTOMAT TUTKIMUSMENETELMÄT KA- TUINFRAN TUTKIMUKSISSA

Kati Lång

Opinnäytetyö
Helmikuu 2013
Rakennustekniikka
Infratekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Infrarakentamisen suuntautumisvaihtoehto

KATILÅNG

Ainetta rikkomattomat tutkimusmenetelmät katuinfran tutkimuksissa

Opinnäytetyö 72 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Helmikuu 2013

Tässä työssä esiteltiin Roadscanners Oy:n yleisimmin käytössä olevia pintaa rikkomattomia tutkimusmenetelmiä. Pintaa rikkomattomia menetelmiä käytetään yleisesti väylien rakenteellisen ja toiminnallisen kunnon kartoituksissa. Lisäksi menetelmiä hyödynnetään laadunvalvonnan työkaluina. Työssä tarkasteltiin maatutkausta, pudotuspainolaitemittauksia, laserkeilausta ja palvelutasomittauksia. Lisäksi työssä käsiteltiin yleisellä tasolla visuaalisia tutkimusmenetelmiä kuten lämpökamerakuvausta.

Työhön valittiin kolme projektiesimerkkiä, joiden kautta perehdyttiin tarkemmin mittausprosessiin ja mittauksista saataviin tulosteisiin. Projekteista hankittiin tietoa Roadscanners Oy:n arkistoista sekä haastatteleamalla projekteihin osallistuneita työntekijöitä. Hankittujen tietojen avulla pystyttiin lukijalle selvittämään konkreettisten esimerkkien kautta mittauksista saatujen tulosten sisältöä. Mittausmenetelmien kuvauksia varten tietoa kerättiin erilaisista kirjallisuuslähteistä.

Työn tuloksena saatiin aikaiseksi kattava paketti kuvaamaan yleisellä tasolla ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä. Menetelmien yleisimmät käyttökohteet, mittaukseen tarvittava kalusto ja mittauksista saatavat tulokset esitellään tiiviinä kokonaisuutena. Tulevaisuudessa tilaajien pyytäessä tarkempaa lisätietoa mittausmenetelmistä ja niiden käyttökohteista, on Roadscanners Oy:llä käytössä yksiin kansiin koottu materiaali, jota on helppo jakaa asiakkaille.

Asiasanat: maatutka, pudotuspainolaite, palvelutasomittaus, laserkeilaus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Option of Civil Engineering

KATILÄNG

Non-destructive research methods in road infrastructure studies

Bachelor's thesis 72 pages, appendices 4 pages
February 2013

This thesis presented the most common non-destructive research methods used by Roadscanners Ltd. Non-destructive research methods are commonly used in the studies of structural and functional condition surveys. In addition the methods are used as tools in quality control surveys. The study examined ground-penetrating radar, falling weight deflectometer measurements, laser scanning and service level measurements. Visual research methods such as thermal camera imaging were dealt with in general level.

Measuring processes were described with the help of three example projects. Details of the projects were obtained from the Roadscanners Ltd.'s database. In addition employees involved were interviewed to help precisely explain the phases of measuring and results. The descriptions of the non-destructive research methods were collected from various written sources.

The thesis is a comprehensive package which presents several non-destructive methods in one book. The most common uses of the methods are described and there is information about the equipment needed and used in the measurements. There are picture examples from the results which are explained in detail. As an outcome Roadscanners Ltd. now has a study which is easy to hand out to customers who want more information about the non-destructive measuring methods.

Key words: ground penetrating radar, falling weight deflectometer, laser profilometer
laser scanner

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Tausta.....	7
1.2	Tavoitteet	7
1.3	Rajaukset.....	8
1.4	Yrityksen esittely	8
2	KADUN RAKENNE	9
2.1	Kadun rakenneosat.....	9
2.2	Katurakenteiden ongelmia	11
3	KÄYTTÖSSÄ OLEVIEEN MITTAUSMENETELMIEN ESITTELY	13
3.1	Yleistä mittausmenetelmistä	13
3.2	Maatutkaus.....	13
3.2.1	Historia.....	13
3.2.2	Maatutkauksen teoriaa	14
3.2.3	Mittauskalusto ja mittaaminen	16
3.2.4	Tulokset.....	18
3.2.5	Riskit ja laadunvalvonta.....	21
3.3	Pudotuspainolaitemittaukset	21
3.3.1	Historiaa	21
3.3.2	Pudotuspainolaitemittauksen teoriaa.....	22
3.3.3	Mittauskalusto ja mittaaminen	23
3.3.4	Tulokset.....	24
3.3.5	Riskit ja laadunvalvonta.....	26
3.4	Laserkeilaus	28
3.4.1	Historia.....	28
3.4.2	Laserkeilauksen teoriaa.....	28
3.4.3	Mittauskalusto ja mittaaminen	30
3.4.4	Tulokset.....	31
3.4.5	Riskit ja laadunvalvonta.....	32
3.5	PTM -mittaukset	33
3.5.1	Palvelutasomittauksen teoriaa.....	33
3.5.2	Mittauskalusto ja mittaaminen	34
3.5.3	Tulokset.....	35
3.5.4	Riskit ja laadunvalvonta.....	37
3.6	Visuaaliset tutkimusmenetelmät	38
4	YLEISTÄ PROJEKTIESIMERKEISTÄ	41
5	TAMPEREEN KAUPUNGIN PROJEKTI.....	44

5.1	Yleistä Tampereen projektista	44
5.2	Lähtötiedot	44
5.3	Käytetyt mittausmenetelmät	45
5.4	Mittauksista saatujen tulosten purku.....	45
6	LEMPÄÄLÄN PROJEKTI.....	51
6.1	Yleistä Lempäälän projektista	51
6.2	Lähtötiedot	51
6.3	Käytetyt mittausmenetelmät	51
6.4	Mittauksista saatujen tulosten purku.....	52
7	ROVANIEMEN KAUPUNGIN PROJEKTI.....	55
7.1	Yleistä Rovaniemen projektista	55
7.2	Lähtötiedot	55
7.3	Käytetyt mittausmenetelmät	56
7.4	Mittauksista saatujen tulosten purku.....	57
8	TULEVAISUUDENNÄKYMÄT	61
	LÄHTEET.....	66
	LIITTEET	69
	Liite 1a. Katujen luokittelu liikenneteknisen merkityksen mukaan	69
	Liite 1b. Pohjamaan kantavuusluokitus.....	69
	Liite 2. Tampereen kaupungin projektin ensimmäisen mittauksen tulospäätelmä	70
	Liite 3. Tampereen kaupungin projektin laadunvarmistusmittausten tulospäätelmä	71
	Liite 4. Lempäälän projektin tulospäätelmä.....	72

LYHENTEET JA TERMIT

BCI	Base Curvature Index. Pohjamaan kuntoa kuvaava parametri.
GPR	Ground Penetrating Radar. Maatutka.
GPS	Global Positioning System. Maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
GTK	Geologian Tutkimuskeskus.
IRI	International Roughness Index. Kansainvälinen epätasaisuusindeksi.
PPL	Pudotuspainolaite.
PTM	Palvelutasomittaus.
SCI	Surface Curvature Index. Päällysrakenteen yläosan kuntoa kuvaava parametri.
SM	Sähkömagneettinen.

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä käyttämällä voidaan tutkia väylien rakenteellisen ja toiminnallisen kunnan yleistilaa. Tulosanalyseistä saadaan selville kehitystrendi. Eli pysyykö väylän rakenteellinen ja toiminnallinen kunto nykyisellä tasolla vai tapahtuuko kunnan tasossa muutoksia. Säännöllisin väliajoin toistettavien tutkimusten avulla saadaan selville myös millä nopeudella kunto paranee tai heikkenee. Kerätyn tiedon pohjalta voidaan perustellusti valita oikeanlaiset kunnossapitotoimenpiteet kohdekohtaisesti. Kohteiden elinkaarta voidaan jatkaa kevyellä korjauksella tai tarvittaessa raskaammilla toimenpiteillä. Toisissa kohteissa riittää pelkästään päällysteen uusiminen ja huonokuntoisemmat kohteet vaativat rakenteen parantamista. Ainetta rikkomattomia menetelmiä hyödyntäen voidaan rajata yhden kohteen sisältä eri alueita, joissa tarvitaan erilaisia korjaustoimenpiteitä.

Maatutkausta ja muita ainetta rikkomattomia menetelmiä hyödyntämällä voidaan suunnitella toimenpide-ehdotuksia, joissa on saatu kohdistettua tarvittavat toimenpiteet oikeisiin kohtiin. Kunnossapidon toimenpiteissä saadaan säästettyä kustannuksissa, kun korjausten suunnittelu on tehty kohdekohtaisesti ja järjestelmällisesti faktatiedon pohjalta. Kuntotutkimusten avulla saadaan katuomaisuuden hallinta kustannustehokkaammaksi ja suunnitelmallisemmaksi.

1.2 Tavoitteet

Työn tavoitteena on esitellä yleisimpiä Roadscanners Oy:n käytössä olevia ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä. Työssä keskitytään käsittelemään maatutkauksen, pudotuspainolaitemittauksen, laserkeilauksen ja palvelutasomittauksen perusteita. Tarkoituksena on, että lukijalle syntyy kuva siitä, mihin tarkoituksiin menetelmiä voidaan hyödyntää. Jokaisen menetelmän peruseriaatteet kuvataan, menetelmissä käytettävä laitteisto esitellään sekä tarkastellaan menetelmän avulla saatavia tuloksia. Lisäksi työssä selvitetään millaisia riskejä ja laatuvaatimuksia edellä mainittuihin menetelmiin liittyy. Koska visuaaliset tutkimusmenetelmät ovat nykyisin tärkeä osa muita mittauksia,

esitellään yleisesti videoinnin ja lämpökamerakuvausten käyttökohteita sekä sovellusohjelma, jonka avulla visuaalisia menetelmiä saadaan työstettyä osaksi tuloksia.

Opinnäytetyössä käsitellään aiemmin toteutettuja projekteja, joista jokainen on sisällöltään eri laajuinen. Projekteissa on yhdistelty eri ainetta rikkomattomista tutkimusmenetelmistä saatuja tietoja, ja projektien kautta saadaan esiteltyä käytännön toteutuksia mittausmenetelmistä. Projektin tiedot ja kuvat kerätään Roadscanners Oy:n arkistosta. Tulosten tarkastelu on tarkoitus toteuttaa siten, että lukija ymmärtää, mitä tietoja milläkin mittauksella on projektissa selvitetty. Tulosten purkamista varten haastatellaan tarvittaessa projektissa mukana olleita työntekijöitä.

1.3 Rajaukset

Opinnäytetyössä keskitytään Roadscanners Oy:n käyttämiin ainetta rikkomattomiin tutkimusmenetelmiin. Työn rajauksessa mukaan on valittu menetelmät, joita yritys säännöllisesti käyttää. Menetelmät kuvataan sellaisella tasolla, että niistä saadaan hyvä yleiskuva. Yleiskuvan saamiseen ei vaadita tulosten laskennassa käytettäviä matemaattisia kaavoja, joten niiden tarkempi esittely on rajattu työstä pois. Työn tulosten tulkinnoissa hyödynnetään Roadscanners Oy:n kehittämiä ohjelmia, joten niiden lyhyet esitte-lyt ovat mukana työssä. Muiden yritysten vastaavia ohjelmia ei tässä työssä esitellä.

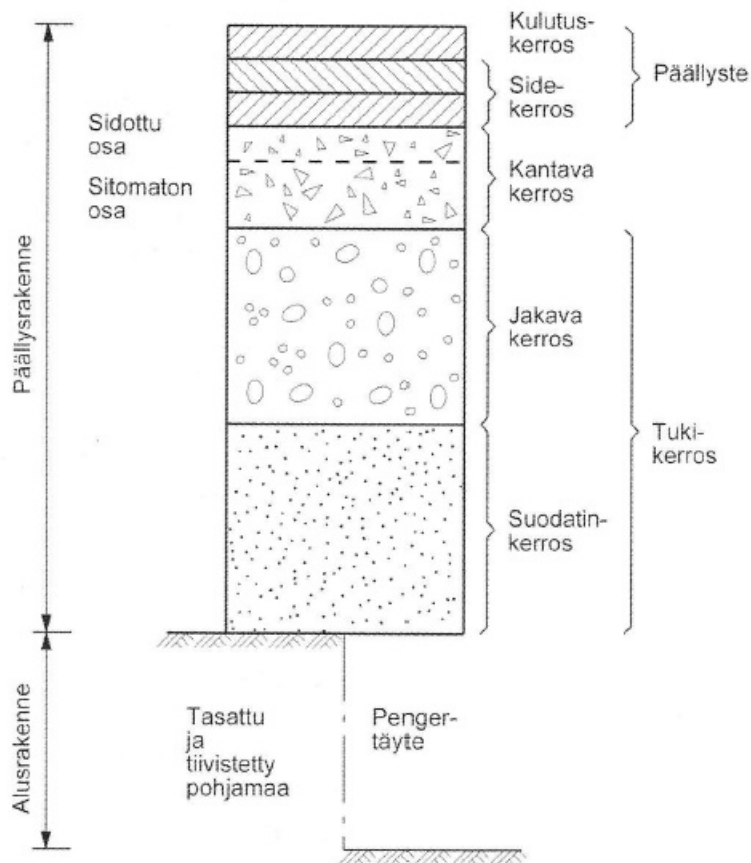
1.4 Yrityksen esittely

Roadscanners Oy on vuonna 1997 perustettu konsulttitoimisto ja ohjelmistoalan yritys. Yrityksen erityisosaaminen keskittyy väylien rakenteellisen ja toiminnallisen kunnan kartoituksiin ja vaurioanalyysiin sekä edellä mainittujen tutkimusten pohjalta tehtäviin kestoennusteisiin ja korjaussuunnitelmiin. Lisäksi yritys markkinoi ja tuottaa erikoisohjelmistoja väylätutkimuksiin, tutkimustulosten analyysiin ja hallintaan, sekä korjaussuunnitteluun.

2 KADUN RAKENNE

2.1 Kadun rakenneosat

Kadun rakenne jaetaan päällysrakenteeseen ja alusrakenteeseen. Kuvassa 1 on kadun normaalipäällysrakenteeseen liittyvät nimitykset. Kadun päällysrakenteeseen kuuluvat päällyste, kantava kerros sekä tukikerros. Päällyste käsittää kulutuskerroksen sekä mahdolliset sidekerrokset. Kantava kerros koostuu sidotusta ja sitomattomasta osasta. Tukikerroksen muodostavat jakava kerros ja suodatinkerros. Kadun alusrakenne muodostuu tasatusta ja tiivistetystä pohjamaasta tai pengertäytteestä. (Katu 2002, 95.)



Kuva 1 Kadun rakenneosien nimityksiä (Katu 2002)

Päällysteessä oleva kulutuskerros rakennetaan useimmiten asfalttibetonista (AB6 – AB 22). Viime aikoina kulutuskerroksen materiaalina on käytetty paljon myös luonnonkivi- ja betonikivipäällysteitä. Kulutuskerroksen avulla katurakenteeseen saadaan muodostettua tasainen pinta, jossa on riittävä kitka. Lisäksi kulutuskerros estää pintavesien pääsyn alempiin rakennekerroksiin. (InfraRYL 2012, 19.) Sidekerrosta käytetään tarvittaessa,

esimerkiksi raskaasti liikennöidyissä kohteissa (Kasari 2012, 8). Sidekerroksessa materiaalina käytetään sidekerroksen asfalttibetonia (ABS 6 – ABS 22).

Kantava kerros on rakennekerros, joka rakennetaan aina, riippumatta maapohjan kantavuusluokitukselta. Kantava kerros muodostaa päällystekerroksille tasaisen, tiiviin ja oikeanmuotoisen alustan. Ajouratojen osalta rakennekerroksen materiaalina käytetään sora- tai kalliomursketta. Rakeisuus määritellään suunnitelmissa maksimiraekoon ollessa 32–64 mm. Kerroksen yläpinnan osalta murskeen maksimiraekoko on pienempää, muotoilun helpottamiseksi. Kantava kerros voidaan tehdä osittain tai kokonaan stabiloituna. Stabilointi toteutetaan esimerkiksi vaahtobitumilla (VBST). Jalkakäytävillä ja kevyen liikenteen väylillä rakennusmateriaalina käytetään 0–32 mm mursketta. (Katu 2002, 95.)

Jakava kerros rakennetaan sorasta tai murskeesta (InfraRYL 2010, 304). Soraa käytettäessä maksimiraekoko on 100 mm. Suodatinkerros tehdään hiekasta, jonka maksimiraekoko on 50 mm ja kapillaarisuus on alle 0,90 m. Suodatinkerros voidaan korvata tarvittaessa suodatinkankaalla. Tällöin tukikerroksen rakenne tehdään kokonaan jakavan kerroksen materiaalista, jonka pohjalle suodatinkangas asennetaan. Rakennetta käytetään esimerkiksi heikosti kantavilla mailla. Jakava kerros ja suodatinkerros muodostavat katurakenteen tukikerroksen. Tukikerros rakennetaan kaikissa katuluokissa kohteisiin, joiden maapohjan kantavuusluokitus on D–G. (Katu 2002, 95.) Tukikerroksen tehtävinä on jakaa pohjamaan tulevia kuormia tasaisesti, katkaista kapillaarinen veden nousu päällysrakenteisiin sekä vähentää routanousuja (InfraRYL 2012, 48).

Rakennekerrosten mitoituspaksuudet vaihtelevat katuluokittain sekä pohjamaan kantavuusluokittain. Mitoitusperusteina ovat kantavuusominaisuudet sekä routivuusominaisuudet. Kadut jaetaan kuuteen luokkaan liikenneteknisen merkityksen mukaisesti (InfraRYL 2010, Liite T2). Liitteessä 1a on taulukkomuodossa katujen luokitusperusteet. Pohjamaan kantavuusluokat jaetaan luokkiin A–G ja niiden luokittelu on liitteessä 1b. Pohjamaan kantavuusvaatimusten perusteella määräytyvät normaalipäällysrakenteen kokonaispaksuudet ja kerrospaksuudet. Alusrakenteen kantavuutta arvioidaan normaalitilanteessa pohjamaan kantavuuden perusteella (Katu 2002, 95.)

2.2 Katurakenteiden ongelmia

Katurakenteiden kunnon heikkenemiseen voi olla useita syitä. Yleisimpiä vaurioiden aiheuttajia ovat pysyvien muodonmuutosten aiheuttamat ongelmat kuten urautuminen ja roudan aiheuttamat vauriot. Puutteellinen tai toimimaton kuivatusjärjestelmä aiheuttaa lähes poikkeuksetta ongelmia katurakenteissa. Myös rakentamisen aikaiset virheet voivat olla syynä kunnon heikkenemiselle.

Väylän rakenteen parantamisprosessissa on erittäin tärkeää diagnosoida ongelmat. Kunnostustoimenpiteiden valintaan vaikuttavat syyt, jotka ovat aiheuttaneet rakenteen kunnon heikkenemisen. Kuvassa 2 on kuvattu eri urautumistyyppit. Kun vedellä kyllästymätön materiaali tiivistyy katurakenteessa, syntyy tyyppin 0 urautumista. Uusissa rakenteissa tapahtuu aina pienissä määrin tyyppin 0 urautumista. Myös roudan on todettu aiheuttavan tyyppin 0 urautumista, kun jäätynyt pohjamaa ja kiviaines keväällä sulaa aiheuttavan tilavuuden muutosta materiaalin tiivistyessä. Havaittavissa uratyyppi on pienenä rakenteen painumana alkuperäiseen pintaan nähden. Normaalisti urautumissyvyys on vastakunnostetuilla teillä noin 2–4 mm:n luokkaa. (Roadex 2001-2011.)



Kuva 2 Urautumistyyppit (Roadscanners Oy 2012, muokattu)

Tyyppin 1 urautumista tapahtuu, kun ainetta puristetaan tietyn jännityksen ylittävällä paineella siten, että aineessa tapahtuu muovautumista ja liikkeitä. Esimerkiksi heikko-laatusissa sitomattomissa materiaaleissa renkaan alla tai sen välittömässä läheisyydessä materiaali leikkautuu plastisesti. Tien pinta kohoaa ajouran ympäriltä kuvan 2 esimerkin mukaisesti ja materiaali löyhtyy. Useimmiten syynä tyyppin 1 urautumiseen on sitomattoman kantavan kerroksen liian heikko leikkauslujuus. Urat voivat ilmetä katurakenteessa urina, joiden rengasuran viereen on noussut palteita tai urien pohjalla voi olla verkkohalkeamia. (Dawson & Kolisoja 2006, 9-10.)

Tyyppin 2 urautuminen tapahtuu katurakenteen ja pohjamaan rajapinnassa, jolloin muodonmuutos vaikuttaa koko rakenteeseen, kuten kuvassa 2 on esitetty. Sitomaton kiviaines on hyvälaatuista ja kadun rakennekerrokset mukailevat pohjamaassa tapahtuvia muodonmuutoksia niin, ettei rakenteiden paksuus muutu. Tyyppin 2 urautumista syntyy, jos kadun rakennekerroksista kohdistuu liian suuria jännityksiä pohjamaahan. Rakenteiden kerrospaksuuksien lisäämisellä tai esimerkiksi teräsverkoilla voidaan ehkäistä tyyppin 2 urautumisen syntymistä. (Roadex 2001-2011; Dawson & Kolisoja 2006, 11.)

Renkaiden aiheuttama kulutus aiheuttaa tyyppin 3 urautumisen. Urautumistyyppi on esitetty kuvassa 2. Kulumista tapahtuu sekä päällystetyillä että sorapintaisilla väylillä. Pohjoismaissa suurin syy kulumiseen on nastarenkaiden käyttö talvikautena. 3 tyyppin urautuminen on sitä yleisempää mitä suurempi keskimääräinen vuorokausiliiikennemäärä on. Tämän urautumistyyppin tunnistaa parhaiten terävänmuotoisista urista ja siitä, että urien etäisyys toisiinsa nähden on henkilöauton akselivälin mittainen. (Roadex 2001-2011.)

3 KÄYTÖSSÄ OLEVIEN MITTAUSMENETELMIEN ESITTELY

3.1 Yleistä mittausmenetelmistä

Teiden ja katujen kunnan selvitys tehdään erilaisten tutkimusten avulla. Käytössä on useita erilaisia rakenteita rikkomattomia mittausmenetelmiä, joiden avulla saadaan luotettavaa ja kattavaa tietoa katujen rakenteellisen ja toiminnallisen kunnan yleisilasta. Kuntotutkimusten avulla saadaan tarkasti mitattua paikkaan sidottua tietoa, jonka perusteella voidaan tehdä kohdennettuja toimenpide-ehdotuksia. Menetelmien käyttö on nopeaa, ja tuo kustannussäästöjä, kun oikeat toimenpiteet saadaan kohdistettua oikeisiin kohtiin. Menetelmiä hyödynnetään myös rakentamisen laadunvalvonnassa. Seuraavissa luvuissa perehdytään rakennetta rikkomattomien tutkimusmenetelmien toimintaperiaatteisiin. Esiteltävinä mittausmenetelminä ovat maatutkaus, pudotuspainolaitemittaus, laserkeilaus ja palvelutasomittaus. Lisäksi tarkastellaan visuaalista vaurioinventointia, ja siitä saatavia hyötyjä.

3.2 Maatutkaus

3.2.1 Historia

Maatutkauksen ensimmäisiä sovelluskohteita olivat mannerjäätikkötutkimukset, joista on dokumentointia jo 1920-luvun loppupuolelta (Maijala & Saarenketo 2000, 5). Maatutkasovelluksia testattiin ensimmäistä kertaa liikenneinfrastruktuuriin liittyvissä tutkimuksissa USA:ssa 1970-luvun alkupuolella. Ensimmäinen autoon kiinnitetty, tiemittauksiin soveltuva mittausyksikkö kehitettiin USA:ssa vuonna 1985. Myös tanskalaiset ja ruotsalaiset kehittivät maatutkauksessa käytettäviä antennoja aktiivisesti 1980-luvulla. (Saarenketo 2006, 15.)

Suomeen maatutkaus tuli 1980-luvulla, jolloin Geologian tutkimuskeskus (GTK) alkoi selvittämään maatutkan käytön soveltuvuutta turve- ja maaperätutkimuksiin. Vuonna 1985 Tielaitos otti maatutkauksen osaksi tietuotantoon liittyviä kohteita ja 1990-luvun alussa maatutkamittaukset vakiintuivat käyttöön (Saarenketo 2000, 16). Viime vuosien

aikana kehitystyö on kohdistunut vähäliikenteisten sorateiden sekä kivettyjen teiden tutkimusten kehittämiseen. Toinen kehittämistyön tärkeä osa-alue on ratapuolella, rata-rakenteiden kunnan tutkimusten kehittäminen. (Saarenketo 2006, 15.)

3.2.2 Maatutkauksen teoriaa

Maatutkaus soveltuu menetelmänä hyvin esimerkiksi olemassa olevien tie- ja katurakenteiden kuntotason selvittämiseen. Rakennekerrosten paksuudet ja niiden laatu saadaan selville tutkadatasta tehtävistä tulkinnoista. Maatutkamittauksella tutkitaan kadun pituussuunnassa sen rakennekerrosten ja niiden alapuolisen pohjamaan ominaisuuksia. Ominaisuuksia ovat esimerkiksi väylän rakennekerrosten paksuudet, rakennemateriaalien kosteuspoikkeamat ja päällysteen tyhjätila. Pohjamaasta saatavan tiedon perusteella voidaan arvioida sen tyyppiä. Myös kallionpinnan syvyyttä voidaan havainnoida aineistosta.

Menetelmän etuna on sen suorittamisen nopeus ja se, että mittaus tehdään pintaa rikkomatta. Lisäksi menetelmä tuo kustannussäästöjä, koska perusmittauksessa rakenteiden mahdolliset ongelmakohdat saadaan paikannettua tarkempia tutkimuksia varten. Tarvittaessa tehtävien referenssitutkimusten, kuten kairausten ja laboratoriotutkimusten, jälkeen voidaan päättää väylään tehtävistä korjaustoimenpiteistä. Jos esimerkiksi korjauksia päätetään tehdä pistemäisesti tai halutaan korjata vain huonoimmassa kunnossa olevat katuosuudet, saadaan perustieto kadun kunnosta ja akuuteimmin korjausta tarvitsevista kohdista maatutkauksen avulla.

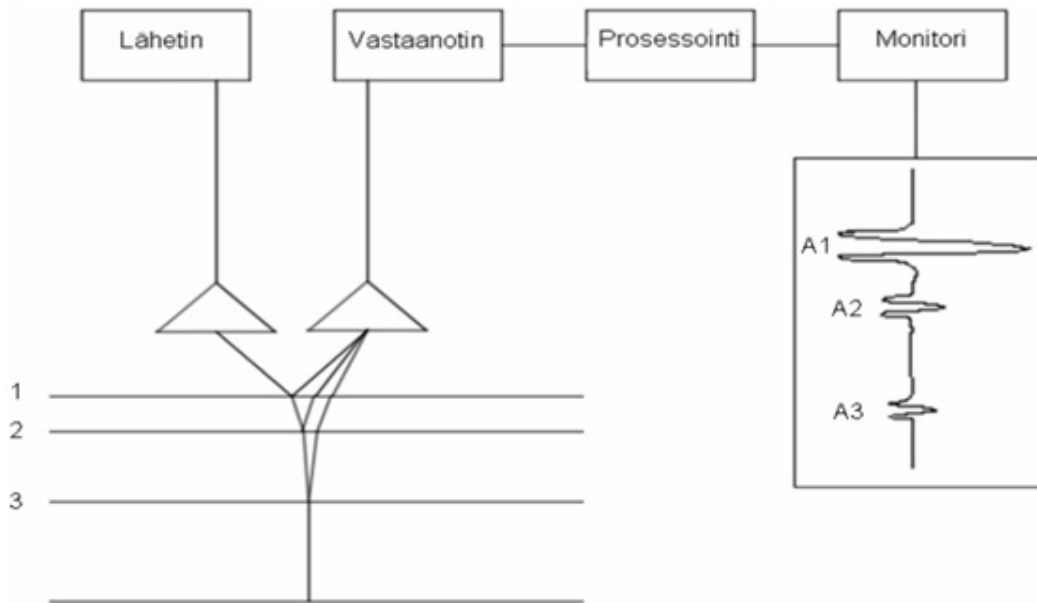
Maatutkamenetelmä perustuu sähkömagneettisten (SM) aaltojen tutkimiseen. Tutkimuksissa käytettävä taajuusalue on 10–3 000 MHz. SM-aallon voidaan sanoa etenevän aaltolina eristeisessä väliaineissa edellä mainitulla taajuusvälillä. Väliaineen ominaisuudet vaikuttavat aallon etenemiseen ja sen käyttäytymiseen. Kun tunnetaan SM-aallon nopeus, voidaan heijastusten aikaerosta laskea aallon kulkema matka, ja sitä kautta päästään määrittämään rakennekerrosten paksuuksia. Maatutkasignaaliin vaikuttavia fysikaalisia parametreja ovat väliaineen sähkönjohtavuus, dielektrisyys ja magneettinen susceptibiliteetti. (Saarenketo & Majjala 2004, 10; Kantia 2008, 4.)

Väliaineen sähkönjohtavuus kuvaa sitä, miten vapait varaukset liikkuvat väliaineessa. Maatutkasignaalin vaimennus ja materiaalin sähkönjohtavuus on sitä suurempaa, mitä enemmän vapait varauksia, ioneja ja elektroneja väliaineessa on. Magneettinen susceptibiliteetti eli magnetoitumisen voimakkuutta kuvaava suure voidaan Suomessa jättää huomioimatta, koska Suomen maaperässä ei yleensä ole magneettisia väliaineita, joita parametrilla mitataan. (Maijala & Saarenketo 2000, 7.) Dielektrisyys eli suhteellinen permittiivisyys on parametri, joka kuvaa aineen kykyä varautua eli polarisoitua. Luonnonmateriaaleissa vesimolekyyli on varautumiskyvyltään merkittävin (Kantia 2008, 4.) Dielektrisyysarvon avulla kuvataan materiaalin sähköistä ominaisuutta, jolla selvitetään materiaalin huokosten sisältämä vapaan veden määrä.

Maatutkaukseen voidaan käyttää erilaisia laitteistoja. Yleisimmin käytössä oleva menetelmä on perinteinen pulssitutka. 3D-laitteistoissa voidaan hyödyntää esimerkiksi askeltaajuustutkaa tai taajuusmoduloitua jatkuva-aaltotutkaa (Passi 2006, 13). Pulssitutka koostuu mittauksen kannalta eri tehtäviä hoitavista komponenteista (Saarenketo 2006, 50):

- 1) Pulssigeneraattorista
- 2) Lähetinantennista
- 3) Vastaanotinantennista
- 4) Näytteenottimesta.

Pulssigeneraattorin tehtävä on tuottaa yksittäisiä signaaleja, joiden voimakkuus ja toistotaajuus on ennalta määrätty. Lähettävä antenni lähettää pulssin väliaineeseen. Pulssin pituus riippuu maatutkan antennitaajuudesta, ja pituus on noin vajaasta yhdestä kymmeneen nanosekunteihin. Rakenteessa olevien aineiden rajapinnoilta heijastuu aina osa pulssin energiasta takaisinpäin, ja vastaanottava antenni kerää palaavat signaalit ja vahvistaa ne. Osa pulssin energiasta etenee rajapinnan läpi ja heijastuu alemmilta rajapinnoilta. Pulssi vaimenee, mitä syvemmälle rakenteeseen mennään. Kuvassa 3 on esitetty yksinkertaistettu toimintaperiaate maatutkan toiminnasta. Heijastusten kuluaika ja amplitudi mitataan, ja mittauksia tehdään tiheässä tahdissa maastossa. Pisteiden tiheän mittausvälin ansiosta saadaan tutkittua väliaineista rakenteita kuvaava, jatkuva luotausprofiili. (Saarenketo & Maijala 2004, 10.)



Kuva 3 Yksinkertaistettu maatutkan toimintaperiaate. A1 kuvaa rajapinnasta 1 vastaanotettua heijastetta jne. (Kantia 2008)

3.2.3 Mittauskalusto ja mittaaminen

Maatutkamittaus suoritetaan maatutka-antenneja hyödyntäen. Maatutka-antennit luokitellaan kahteen päätyyppiin, ilmastantenneihin ja maavasteantenneihin (Ruotoistenmäki 2005, 41). Antennien lisäksi mittauksessa tarvitaan tallennusyksikkö, johon antennien lähettämä tieto kerätään. Paikkatietoa tallentaa ja kerää GPS -laitteet ja yleensä mittausautoon on asennettu vielä digitaalivideojärjestelmä, jolla tien kunto tallennetaan mittaushetkellä (Saarenketo 2006, 50). Edellä mainitut laitteet tarvitsevat virtalähteen, joka on asennettu mittausautoon.

Päällysrakenteen kokonaispaksuus, pohjamaan ominaisuudet sekä päällysrakenteen alaosan ominaisuudet selvitetään matalampaa taajuutta käyttävällä maavasteantennilla. Laitteiston erottelukyky on sitä heikompaa mitä matalampaa taajuutta käytetään. Maavasteantennit toimivat laajalla taajuusvälillä, eli 30 MHz:stä 2500 MHz:iin, ja antennin läpäisevyys ulottuu aina 20–30 m:iin saakka. Yleisesti tie- ja katurakenteita mitattaessa käytetään 400–500 MHz taajuusalueella toimivaa maavasteantennia, jolloin tarkkaa tietoa saadaan noin kolmen metrin syvyyteen asti. (Saarenketo 2000, 23.)

Ilmastantennin taajuusalue on 500 MHz:stä 2,5 GHz:iin, eli se toimii korkeammilla taajuuksilla kuin maavasteantenni. Ilmastantennien läpäisevyys syvimmillään on

0,5–0,9 m:n luokkaa. Yleisimmin käytetään 1 GHz taajuudella toimivaa antennia. Ilmavasteantennilla tutkitaan päällysrakenteen sekä kulutuskerroksen ominaisuuksia. (Saarenketo 2006, 51.)

Sekä ilmavaste- että maavasteantenni kiinnitetään mittausauton etuosaan. Ilmavasteantenni asennetaan noin puolen metrin korkeuteen, ja maavasteantenni muutaman senttimetrin korkeuteen tien tai kadun pinnasta (Ruotoistenmäki 2005, 41). Mittausnopeus riippuu siitä, onko käytössä molemmat antennit vai vain toinen. Jos käytetään pelkkää ilmavasteantennia, voidaan mittaus suorittaa ajamalla nopeusrajoitusten mukaisesti aina 100 km/h nopeuteen asti. Kun käytetään molempia antennia yhtä aikaa, asettaa maavasteantenni matalamman maksiminopeusrajoituksen. Maavastetta mitattaessa ajonopeus on normaalisti 5–30 km/h (Saarenketo 2006, 51.) Katujen maatumkaus suoritetaan yleensä siten, että molemmat antennit ovat käytössä yhtä aikaa, eli mittausnopeus määräytyy maavasteantennin mukaisesti. Kuvassa 4 on esimerkki Roadscanners Oy:n mittausautosta, johon on asennettu sekä ilma- että maavasteantennit.



Kuva 4 Roadscanners Oy:n mittausauto, johon on asennettu 1 GHz ilmavasteantenni ja 400 MHz maavasteantenni (Roadscanners 2012)

Päällysrakenteiden kokonaispaksuuden selvityksessä mittaus tulee suorittaa ajourien välisellä alueella. Näin saadaan todellinen kuva rakenteista, ja vältetään liikennekuorman aiheuttamien mahdollisten kulumisten ja painumien mittaus. Rakennekerrosten kuntoa tai päällysteen jäljellä olevaa paksuutta selvittäessä mittauksessa on ajettava mahdollisimman tarkasti ajourissa. (Ruotoistenmäki 2005, 42–43.)

3.2.4 Tulokset

Väyliä rakenteesta tutkittavia fyysisiä ominaisuuksia ovat eri rakennekerrosten rakenteet, niiden paksuus ja tyhjättila sekä rakenteen kokonaispaksuus. Kosteus- ja tiiviyserot sekä eri kerrosten materiaalivaihtelut aiheuttavat muutoksia ominaisuuksissa. Rakentamisen aikana syntyneet tiiveyserot nähdään rajapintoina tutkakatassa. (Ruotoistenmäki 2005, 41.) Rummut ja putket pystytään paikantamaan suurella todennäköisyydellä, koska niiden sähkömagneettiset ominaisuudet eroavat tien rakennekerrosten ominaisuuksista. Huomioitava kuitenkin on, että tietoa saadaan vain mitatun linjan kohdalta, ei koko väylän leveydeltä. Tarvittaessa täytyy mitata useampia linjoja, jotta kadusta saadaan tarkka kokonaiskuva.

Eri maalajeille, ilmalle ja esimerkiksi vedelle on omat erikseen määritetyt dielektrisyysarvot. Maatutkauksella tehtävä päällysteen dielektrisyysarvon määrittäminen perustuu niin kutsuttuun heijastustekniikkaan ja suhteelliseen permittiivisyyteen. Päällysteen tiivistämisessä ilma poistuu rakennekerroksesta eli tyhjättila pienenee. Dielektrisyys kasvaa suuremmaksi, kun tyhjättila pienenee. (PANK 2008). Lukuja hyödynnetään uuden päällysteen tyhjättilan laadunvalvonnassa.

Väyliä pohjamaan laatuluokitus voidaan tehdä suhteellisen permittiivisyyden toisinsanoen dielektrisyysvakion avulla. Luokitusta hyödynnetään esimerkiksi tilanteissa, joissa suunnitellaan väylän leventämistä. Luokitus pätee, kun mittaus on tehty pohjaveden pinnan yläpuolella (Kantia 2008, 15.) Taulukossa 1 (Saarenketo & Scullion 2000, 126) on esitetty pohjamaan laatuluokitus dielektrisyysarvojen perusteella.

Taulukko 1 Dielektrisyysarvoihin perustuva pohjamaan laatuluokitus (Saarenketo & Scullion, 2000)

Dielektrisyysarvo	Luokitus
4 – 9	Kuiva ja routimaton maalaji, yleensä ottaen hyvä kantavuus
9 – 16	Kostea ja hieman routiva maalaji, alentunut, mutta useimmiten riittävä kantavuus
16 – 28	Erittäin routiva ja vedelle sensitiivinen maalaji, alhainen kantavuus, toistuva dynaaminen kuorma muodostaa huokosvedenpainetta, joka aiheuttaa pysyviä muodonmuutoksia
> 28	Plastinen ja epävakaata maalaji

Saarenketo ja Scullion (2000, 132) ovat tutkineet dielektrisyysarvon avulla tierakenteen sitomattomien rakennekerrosten laatua. Taulukossa 2 on esitetty tutkimusten tuloksena laadittu laatuluokitustaulukko sitomattomille kantavan kerroksen murskeille. Laatu- luokitusta hyödynnetään esimerkiksi silloin, kun väylän rakenteeseen suunnitellaan ras- kaampia korjauksia, ja halutaan selvittää massanvaihdon tarve sitomattoman kantavan kerroksen osalta.

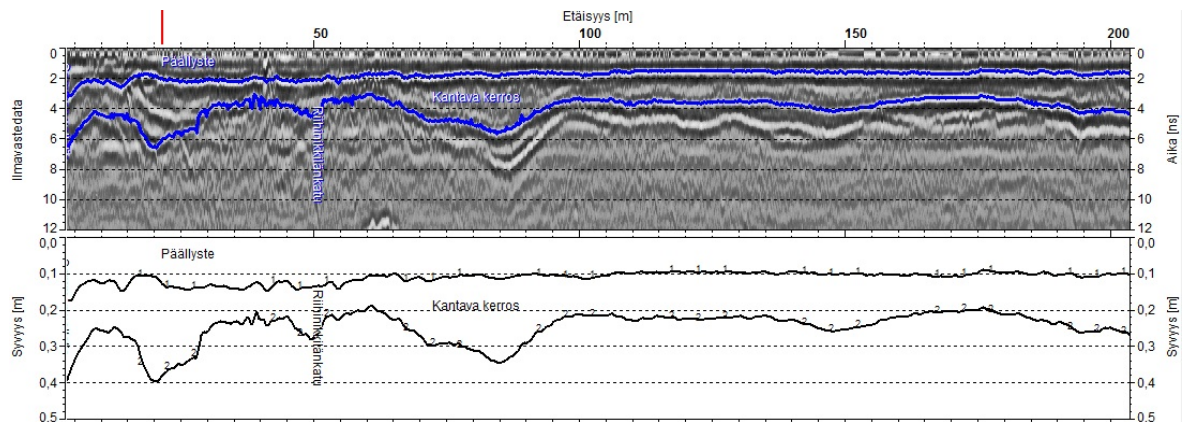
Taulukko 2 Dielektrisyysarvoon perustuva sitomattoman kantavan kerroksen laatuluokitus

Dielektrisyys	Luokitus
5 – 10	Hyvälaatuinen kantava kerros, optimikosteus
10 – 16	Hälyttävän kostea, vettä sitova kantava kerros
> 16	Dynaaminen, kuormitettuna plastisesti käyttäytyvä kantava kerros

Maatutkauksessa saatu mittausdata prosessoidaan tulosten saavuttamiseksi. Prosessoin- nin vaiheista ja tarkasta kuvauksesta löytyy ohjeita esimerkiksi maatutkalaitteisto- ja ohjelmistovalmistajien manuaaleista. Prosessoinnin jälkeen tehdään rajapintojen tulkin- nat, jotka ovat oleellinen osa tuloksia.

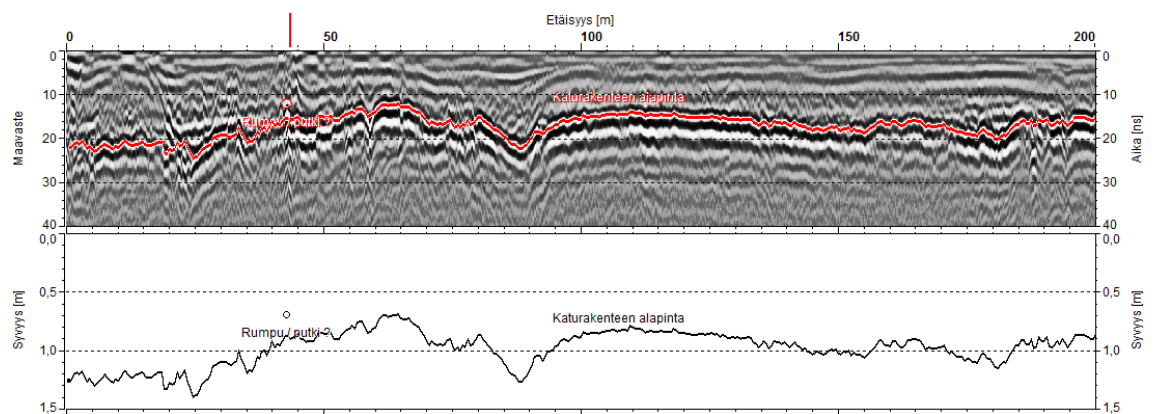
Ilmavastedatasta tulkitaan aina sidottujen kerrosten eli päällysteen tai mahdollisesti päällysteen ja sidotun kantavan kerroksen alapinta. Näin saadaan selville sidotun ker- roksen paksuus (Saarenketo & Maijala 2004, 28.) Alla oleva kuva 5 esittää näkymää, jossa ilmavastedata on prosessoitu ja tulkittu. Kuvan ylemmässä ikkunassa tutkadata näkyy taustalla ja alemmassa ikkunassa tutkadata on piilotettu, jotta tulkitut rajapinnat erottuvat selkeämmin. Ylemmän ikkunan oikeassa reunassa mittayksikkönä on käytetty nanosekuntia, koska mittauksissa käytetty antenni mittaa sähkömagneettisen aallon kul- kuaikaa, ja sen yksikkönä käytetään nanosekunteja. Samat kerrosrajat löytyvät alem-

masta kuvasta, johon nanosekunnit on laskettu syvyyttä kuvaavaan yksikköön eli metreihin. Ylempi viivatulkinta kuvaa päällysteen alapinnan tasoa. Kuvassa oleva alempi viivatulkinta kuvaa kantavan kerroksen alapinnan tasoa. Se on toinen aina ilmavasteantennin tuloksissa esitettävä jatkuva rajapinta. Jos väylän rakenteessa on selkeä jakava kerros, myös se voidaan esittää profiilikuvassa.



Kuva 5 Ilmavastedata, prosessoitu ja tulkittu

Maavastedataan tulkitaan aina myös tie- tai katurakenteen sitomattomien kerrosten alapinta, kuten esimerkikuvassa 6. Jos tutkadatasta voidaan selvästi nähdä esimerkiksi kallion rajapinta, tulee se merkitä kuvaan omaksi rajapinnaksi. Lisäksi maavastedatasta on mahdollista nähdä putkien tai rumpujen sekä mahdollisten rouaeristeiden sijainti. Nämä, ja muut lisähuomiot voidaan merkitä kuvaan tekstin ja/tai erikoismerkintöjen avulla. Kuvaa 6 tarkastelemalla nähdään, että mahdollinen rumpu tai putki on merkitty kuvaan pienellä ympyrällä.



Kuva 6 Maavastedata, prosessoitu ja tulkittu

3.2.5 Riskit ja laadunvalvonta

Maatutkamittausten tekniseen onnistumiseen vaikuttavat useat eri tekijät. Yleisimpiä ongelmia ovat laitetekniset ongelmat. Mittauksen alkaessa kaikkien laitteiden tulee toimia, ja jos yksi laite ei käynnisty yhtä aikaa muiden laitteiden kanssa, tulee mittaajan huomata asia heti ja mitata kohde alusta uudelleen. Mittauksissa on ennalta määritelty aloitus- ja lopetuspiste, ja mittaus tulee suorittaa tarkasti koko väliltä. Riskinä voi olla liian kokemattomalla mittaajalla, että laitteet käynnistetään tai sammutetaan liian aikaisin, jolloin mittausväli jää vajaaksi. Mittaus voi jäädä vajaaksi myös, jos kartoista ei ole tarkistettu kadun jatkuvuutta oikein. (Matintupa 2013.)

Säätilat aiheuttavat riskin tulosten oikeellisuuteen. Mittausten tarkkuus kärsii, jos tien pinta on kostea. Jos tehdään esimerkiksi laadunvalvontamittauksia, ja tarvitaan tarkkoja dielektrisyysarvoja, ajoitetaan mittauspäivä sateettoman päivän jälkeiselle päivälle. Mittaukset tehdään yli 0 °C lämpötilassa, jotta dielektrisyysarvot ovat normaaleja. Maavasteantennilla mitattaessa tien pinnalla ei myöskään saa olla lätäköitä, jotka aiheuttavat häiriötä aineistoon. Maavasteantennin tuloksiin ei vaikuta pieni kosteus, mutta laitteistoihin voi päästä vettä, jolloin laitteistolla on riski mennä oikosulkuun. (Matintupa 2011a, 12.)

Mittauksen aikaisella laadunvarmistuksella vähennetään mittaustulosten virheriskiä. Maatukat ja käytössä olevat trippimittarit kalibroidaan säännöllisesti. Yrityksen ulkopuolinen taho suorittaa laboratoriossa säännöllisin väliajoin maatukatestin, jolla antenit kalibroidaan. Ilmavasteantennit kalibroidaan aina mittausten yhteydessä vakiintuneella metallilevyheijastemittauksella. Trippimittarit kalibroidaan testiradalla vuosittain tai renkaan vaihdon yhteydessä. (Laatukäsikirja 2012.)

3.3 Pudotuspainolaitemittaukset

3.3.1 Historiaa

Ensimmäiset pudotuspainolaitteella mitattavat kantavuusmittauskokeilut tehtiin Tanskassa vuonna 1964, kun tanskalaisessa tielaboratoriossa kehitettiin ns. kevyt pudotus-

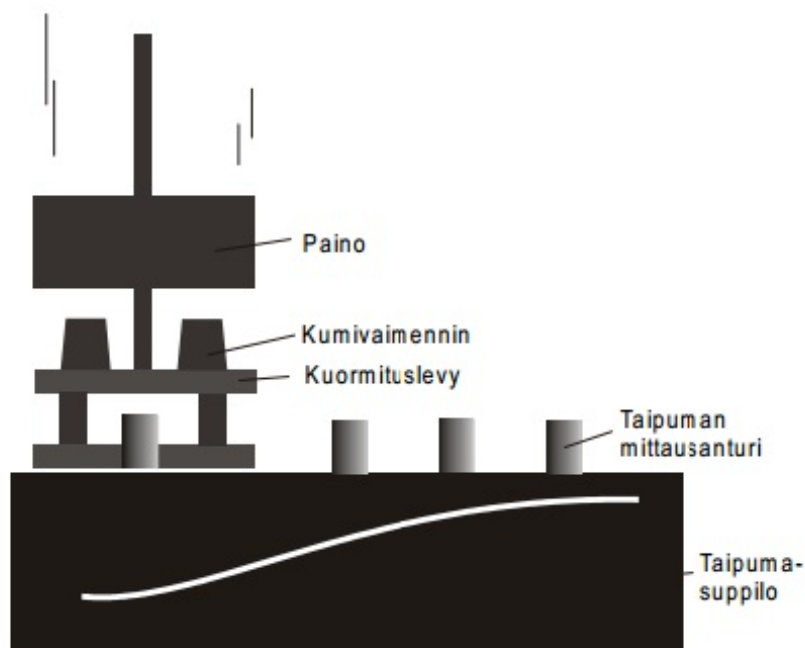
painolaite. 1970-luvulla tekniikka kehittyi, ja ensimmäiset auton kanssa käytettävät mitauslaitteet saatiin käyttöön. (Bohn A, 1–3.)

3.3.2 Pudotuspainolaitemittauksen teoriaa

Pudotuspainolaitemittauksia hyödynnetään tie- ja katurakenteiden ylläpidon toimenpiteiden suunnittelussa. Yleisimmin mittauskohteina ovat päällystetyt väylät, mutta esimerkiksi kevätkantavuustutkimuksia tehdään sorateille. Mittauksia tehdään, kun halutaan arvioida vanhan rakenteen kuormituskestävyyttä eli selvittää väylän kantavuutta. Lisäksi menetelmää käytetään rakentamisen aikaisessa laadunvarmistuksessa, kun halutaan varmistaa rakenteiden tiiviys. Jotta pudotuspainomittauksista saadaan tulkittua, tarvitaan päällystepaksuudesta tieto.

Pudotuspainolaitteella (PPL) mitataan tien tai kadun kuormituksen aikaisia taipumia. Taipuma kuvaa tien rakenteen ja sen eri kerrosten materiaalien käyttäytymistä. Taipumalla kuvataan käytännössä materiaalin pystysuoraa siirtymää. Pudotuspainolaitteella simuloidaan liikennekuormitusta, ja sillä mitataan tiehen kohdistuva voima sekä voiman aiheuttama taipuma. (Spoof & Petäjä 2000, 4.)

Liikennekuormituksen tyyppi on dynaamista kuormitusta ja se saadaan aikaan pudottamalla paino kuormituslevylle. Kuormituslevy on halkaisijaltaan 300 mm oleva pyöreä levy. Painon suuruus ja pudotuskorkeus on säädeltävissä ja näin tutkittavan kuorman suuruutta tien pintaa kohden voidaan vaihdella. Kuvassa 7 on esitetty pudotuspainolaitemittauksen toimintaperiaate. Esimerkiksi kuorma-auton 10 tonnin akselipainoa vastaa 50 kN suuruinen voima. Taipuma mitataan levyn alta sekä eri etäisyyksiltä kuormituslevystä. Anturien etäisyys voi vaihdella 0,2 m:stä 2,5 m:iin. Mittaustuloksena saadaan niin sanottu taipumasuppilo. (Ruotoistenmäki 2005, 38.)



Kuva 7 Pudotuspainolaitteen toimintaperiaate (Spoof & Petäjä 2000, 4)

Taipumasuppilo kertoo tien kyvystä kestää toistuvia liikennekuormituksia, eli se kuvaa tien kuormituskestävyyttä. Taipumasuppilon avulla rakennekerroksille saadaan lasketua muodonmuutosmoduulit, kun rakennekerrosten paksuudet tiedetään (Roadex 2000-2011). Mitä paksumpi ja jäykempi tien rakenne on, sitä pienempiä taipumat ovat. Taipumasuppilo normalisoidaan kuormituksen ja mittauslämpötilan suhteen. Sen jälkeen siitä voidaan laskea taipumasuppiloparametreja. (Spoof & Petäjä 2000, 12.) Parametrit eli indeksit kuvaavat eri rakennekerrosten kuntoa. Yleisimmin laitteella määritettävät indeksit ovat SCI (Surface Curvature Index) eli päällysrakenteen yläosan kuntoa kuvaava pintakantavuusindeksi ja BCI (Base Curvature Index), joka taas kuvaa pohjamaan kuntoa. Lisäksi laskemalla voidaan selvittää esimerkiksi rakenteen ja pohjamaan jäykkyyttä. (Saarenketo 2008, 12.)

3.3.3 Mittauskalusto ja mittaaminen

Mittaus suoritetaan pysäytetyllä ajoneuvolla, johon on kiinnitetty pudotuspainolaitteen sisältävä perävaunu (Roadex 2001-2011). Mittaukset suoritetaan mittauspiste kerrallaan. Yhteen mittaukseen kuluu aikaa noin 1–2 minuuttia. Kun siirtoajot ja valmistelevat työt huomioidaan, saadaan yhden työvuoron aikana mitattua noin 120–200 mittauspistettä.

(Ruotoistenmäki 2005, 39.) Menetelmä on suhteellisen hidas esimerkiksi maatutkaimitaukseen verrattuna, mutta nopeampi kuin levykuormituskoee. Kuvassa 8 on suomalaisen Finn-Raj Oy:n KUAB 50 -tyyppinen ajoneuvolla vedettävä pudotuspainolaite.



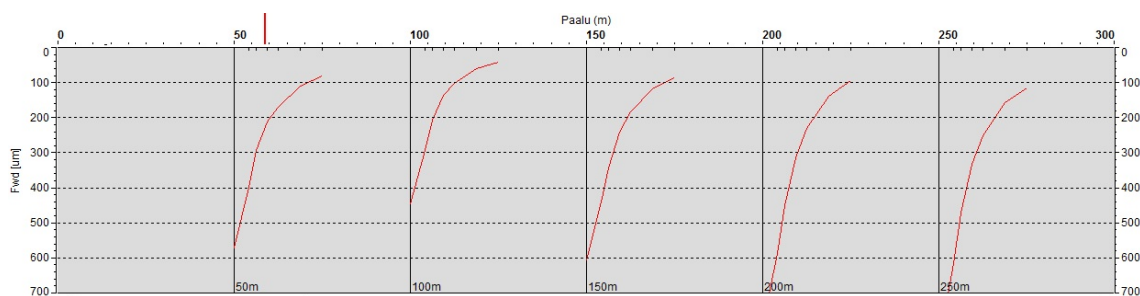
Kuva 8 Finn-Raj Oy:n pudotuspainolaite (Finn-Raj Oy 2011)

Mittauslinjan tulee olla vähintään metrin etäisyydellä tien reunasta (Spoof & Petäjä 2000, 9). Jotta tulokset ovat laadukkaita ja käyttökelpoisia, tulee kahden mittauspisteen välinen maksimietäisyys pituussuuntaisesti olla enintään 50 m. Mittauskohteessa valitaan tutkittava tavoitekuorma, ja sitä tulee käyttää koko kohteen mittauksessa. Tavoitekuorman suuruus voi vaihdella 20–150 kN välillä, ja yleisin 300 mm levyn kanssa käytettävä kuormitus on 50 kN. (Roadex 2001–2011.)

3.3.4 Tulokset

Pudotuspainolaitemittausten tulokset esitetään yleensä taipumasuppilona. Kuvassa 9 on malli taipumasuppilonäkymästä. Taipumasuppilon muodosta voidaan arvioida tien rakennekerrosten ominaisuuksia. Takaisinlaskentamenetelmien avulla voidaan mitatuista taipumasuppiloista tehdä tarkkoja laskentoja, ja tuloksena saadaan muodonmuutosmoduulit. (Spoof & Petäjä 2000, 4.) Laskettujen moduulien ja rakennekerrosten paksuuksien perusteella saadaan laskettua lähtökantavuus. Lähtökantavuus on tärkeä osa korjausrakentamisen suunnittelua. Kun korjaustoimenpiteiden moduulit tiedetään, voidaan läh-

tökantavuuteen lisätä sopivin korjausmenetelmä ja moduulilukujen avulla voidaan tarkastaa, että kantavuus on korjaustoimenpiteiden jälkeen riittävä. (Varin 2013.)



Kuva 9 Pudotuspainolaitemittausaineisto esitettyinä taipumasuppiloina (Roadscanners Oy 2010)

Pudotuspainolaitteiden mittauksia analysoitaessa heti mittausten jälkeen lasketaan E2-moduuli. E2-moduuli kuvaa mitatun rakenteen keskimoduulia (MN/m^2). Luvun avulla simuloidaan karkeasti levykuormituskokeen tuloksia. (Saarenketo 2008.) Rakennekerroksia ei ole eritelty, eli luku antaa karkean käsityksen. Jos halutaan selvittää eri rakennekerrosten E-moduulit, tehdään takaisinlaskenta käyttäen esimerkiksi Odemarkin menetelmää (Varin 2013).

Rakennekerrosten kunnosta kertovia tunnuslukuja lasketaan taipumasuppiloiden pohjalta. Suomessa mittauslaitteessa käytettävien antureiden eli geofonien jakauma on 0, 200, 300, 450, 600, 900 ja 1200 (Saarenketo 2008.) Luvut kuvaavat geofonin etäisyyttä kuormituslevystä millimetreinä. Taipuma-arvojen erotusten avulla saadaan selvitettyä SCI ja BCI -tunnuslukuja. Tunnuslukujen avulla selvitetään, onko tutkittavassa kohteessa tyypin 1 tai 2 urautumista.

SCI-arvo, joka kuvaa pintakantavuutta, lasketaan ensimmäisen kahden geofonin välisestä taipumaerotuksesta eli taipuma D0 arvosta vähennetään D200 taipuma-arvo. Tuloksena saatava luku kuvaa päällysteen ja sitomattoman kantavan kerroksen jäykkyyttä. Jos arvo on suuri, viittaa se korkeaan tyypin1 urautumisriskiin. Taulukossa 3 on tehty karkea jaottelu SCI-arvoista. Luokitus kuvaa päällystettyjen väylien raja-arvoja. Raja-arvoja hyödynnetään esimerkiksi ennustettaessa tulevia päällystevaurioita. (Roadex 2001-2011.)

Taulukko 3 SCI-parametrin karkea luokittelu (Saarenketo 2008)

SCI 200	Luokka
< 150 µm	Hyvä
> 250 µm	Huono
> 400 µm	Erittäin huono

BCI-arvo kuvaa pohjamaan kantavuutta. Luku saadaan vähentämällä kuormituslevystä nähden toiseksi kauimmaisen geofonin arvosta D900 kauimmaisen geofonin arvo D1200. Tulokseksi saatavasta luvusta voidaan päätellä, miten väylän rakenne jakaa kuormaa heikolla pohjamaalla. Jos arvo on suuri, viittaa se urautumistyyppin 2 riskeihin sekä mahdolliseen pumppautumisongelmaan. (Roadex 2001-2011.) Pumppautumisongelmalla tarkoitetaan ongelmaa, jossa pohjamaahan kohdistuvat pystysuorat jännitykset eivät pääse jakautumaan tarpeeksi laajalle. Tällöin pohjamaahan kohdistuu pystysuoraa jännitystä niin suuressa määrin, että se aiheuttaa pohjamaassa olevan huokosvedenpaineen purkautumisen ylöspäin kohti väylän rakenteita. BCI-arvot voidaan myös luokitella karkeasti taulukon 4 mukaisesti.

Taulukko 4 BCI-parametrin karkea luokittelu (Saarenketo 2008)

BCI 1200	Luokka
< 20 µm	Hyvä
> 40 µm	Ongelmia
> 60 µm	Huono
> 100 µm	Erittäin huono

3.3.5 Riskit ja laadunvalvonta

Pudotuspainolaitemittaukset tehdään pysähtyneellä ajoneuvolla, jolloin mittaus aiheuttaa aina liikenneturvallisuusriskin (Roadex 2001-2011). Riskin pienentämiseksi tulee mittauksessa käytettävässä ajoneuvossa olla varoitusvilkut sekä mittauksesta kertova

kyltti. Mittausten suorittamisen turvallisuus on parantunut sen jälkeen, kun mittaukset on saatu tallentumaan automaattisesti, eikä kuljettajan tarvitse enää nousta ajoneuvosta kesken mittauksen.

Mittaustulosten oikeellisuuteen vaikuttavia riskejä aiheuttavat mittausajankohdan valinta, mittauskaluston kunto sekä mittausten suorittajien ammattitaito (Varin 2013). Mittausajankohta vaihtelee sen mukaan, mitä mittauksella halutaan tutkia. Sorateiden kevät-kantavuuksien tutkimisessa mittauksia suoritetaan myös kevätaikaan, mutta päällystettyjen väylien tutkimisessä mittaukset tulee suorittaa kesäaikaan. Myös kevätkantavuutta voidaan mitata kesäaikana. Jos mittaukset tehdään kesällä, tulee lämpötilakorjauskertoimen avulla huomioida päällysteen lämpötilan vaikutus. Kevätkantavuutta tutkittaessa huomioidaan mittausajankohta myös erillisellä kevätkantavuuskertoimella. (Kähkönen 2005, 8.) Mittaustulosten analysoijan tulee olla ammattitaitoinen, ja pystyä huomioimaan tarvittavan kertoimet tulosten teossa.

Päällystettyjä väyliä mitattaessa mittaukset tulee suorittaa kesäaikaan ja rakenteen tulee olla täysin sula. Mittauspisteessä kuormituslevyn alla olevan maan tulee mittaushetkellä olla kuiva. Tutkittavan kohteen päällysteen lämpötilalla on myös merkitystä. Mittaukset tulee keskeyttää, jos päällysteen pintalämpötila kohoaa yli $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$:een tai alittaa $+0\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Lämpötilan tarkkailussa käytettävän lämpömittarin lukematarkkuuden tulee olla vähintään $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$:ta. (Spoo & Petäjä 2000, 7-9.) Jos lämpötila poikkeaa sallitusta välistä, voi se aiheuttaa tuloksiin vääristymiä, joita ei tuloksia käsitellessä voida korjata. Lämpötila vaikuttaa taipumaan, ja taipuman virheellinen tulos vääristää koko mittauksesta saatavat tulokset.

Tulosten virheriskiä voi aiheuttaa laitteistosta johtuva epätarkkuus. Yhtenä esimerkkinä mainittakoon mittausauton matkamittarin tarkkuus. Jos mitataan pitkiä osuuksia yhdellä kertaa, kertaantuu matkamittarin virhe. Siksi laatuvaatimukseen on kirjattu, että matkamittarin lukematarkkuuden tulee olla yksi metri tai tarkempi. Matkamittarin tarkkuus tulee tarkistaa säännöllisesti. (Varin 2013). Myös itse pudotuspainolaite tulee huoltaa ja kalibroida. Kuormituslevyn alla oleva kumimatto ja joustopuskurit tulee vaihtaa valmistajan ohjeiden mukaan. Kalibroinnit tulee suorittaa vuosittain. Pudotuspainolaite tulee viedä mittauskauten alussa vertailupäiville, jossa sille annetaan toimintakauden ajaksi asianomainen hyväksyntä. (Spoo & Petäjä 2000, 6.)

Mittauksen aikana mittauslaitteiden paikannuksen tulee olla pituus- ja poikkisuunnassa tarkkoja. Pudotuspainolaitemittaukset tulee tehdä samalta linjalta kuin maatulkaus, jos menetelmiä halutaan käyttää yhdessä. Mittauspisteiden välien tulee olla tasaisia, tai jos tehdään eri väleillä, tulee molempien linjojen mittauspisteet silti kohdentaa, jotta saadaan kattava ja luotettava tulos. (Varin 2013.)

3.4 Laserkeilaus

3.4.1 Historia

Laserkeilausta on käytetty liikenneinfratutkimuksissa viimeiset 15 vuotta. Tekniikkaa on hyödynnetty esimerkiksi tunnelitutkimuksissa, siltamittauksissa sekä maastokartoitusten teossa. Aluksi liikkuvat lasermittaukset tehtiin helikopterista käsin, mutta tekniikan kehittyessä mittauksia tehdään yhä enemmän liikkuvasta autosta. (Matintupa 2011b.) Suomessa Destia Oy on tehnyt laserkeilausta ilmasta käsin vuodesta 1999 lähtien erilaisiin tiesuunnittelun hankkeisiin. Maanmittauslaitos aloitti keilaukset vuonna 2008 uuden korkeusmallin kehittämisen yhteydessä. (Suominen 2009.) Myös Roadscanners Oy on tehnyt merkittävää tutkimustyötä laserkeilauksen parissa viime vuosien aikana. Yritys on kehittänyt vuonna 2010 Road Doctor Laser Scanner (RDLS) ohjelmaketin, jonka avulla voidaan kerätä ja analysoida laserkeilauksesta saatavaa dataa. (Matintupa 2011b.)

3.4.2 Laserkeilauksen teoriaa

Laserkeilaamista voidaan hyödyntää esimerkiksi väyläympäristön kartoituksissa, tiealueen inventoinnissa sekä väylän pinnan mittauksissa. Menetelmä sopii monimutkaisten rakenteiden tai epätasaisten pintojen mittaamiseen ja mallintamiseen. (Suominen 2009.) Laserkeilain on toimiva työkalu kuivatusanalyysien tekoon. Myös pysyvien muodonmuutosten yhtenä tärkeänä aineistona käytetään laserkeilausmittauksesta saatua tietoa. (Roadex 2001-2011.)

Eri tarkoituksiin soveltuvia laserkeilaimia on useita, ja ne voidaan luokitella neljään pääluokkaan käyttötarkoituksen mukaan (Cronvall, Kråknäs & Turkka 2012, 12):

- 1) **Kaukokartoitus–laserkeilaimet**, joita käytetään ilmalaserkeilauksessa esimerkiksi helikopterista käsin. Mittausetäisyys on 0,1 km–100 km, ja mitatun pisteen tarkkuus on joitain cm, kuitenkin alle 10 cm.
- 2) **Mobiililaserkeilaimet**, eli ajoneuvoon asennetut laserkeilauslaitteet, joita käytetään väylien mittaamiseen. Mittausetäisyys voi vaihdella muutamasta m:stä noin 100 m:iin, ja pistetiheys on moninkertainen verrattuna kaukokartoituslaserkeilaimiin. Mitatun pisteen tarkkuus on noin 1–3 cm.
- 3) **Maalaserkeilaimet** eli terrestriaaliset laserkeilaimet, joita käytetään yleensä paikallaan maanpinnalla. Mittausetäisyys voi vaihdella 1 m:stä 300 m:iin, ja parhaimmillaan mittaustarkkuus voi olla noin 1 cm.
- 4) **Teollisuuslaserkeilaimet**, joita käytetään pienten kohteiden erittäin tarkkaan mittaamiseen esimerkiksi arkeologisissa tutkimuksissa. Mittaustarkkuus on alle 1 mm ja mittausetäisyys on maksimissaan 30 m.

Laserkeilaus on menetelmä, joka hyödyntää koordinaattimittausta. Mittausmenetelmän avulla saadaan kerättyä tietoa monipuolisesti, nopeasti ja erittäin tarkasti. Keilaimia käyttämällä voidaan mitata kohdetta koskettamatta, jolloin on mahdollista mitata turvallisesti myös vaarallisia tai hankalasti saavutettavia kohteita. (Cronvall ym. 2012, 10.)

Valon kulku-aikaan perustuvat laserkeilaimet mittaavat etäisyyden kohteeseen aikana, joka valosignaali kuluu kulkea kohteeseen ja takaisin. Kun valosignaalin lähtökulmat vaaka- ja pystysuunnassa sekä matka tiedetään, voidaan jokaiselle pisteelle laskea x-, y-, ja z-suuntaiset koordinaatit. (Joala 2006, 1.) Lisäksi järjestelmään tallennetaan jokaiselle pisteelle intensiteetti- eli heijastusarvo, joka perustuu paluusignaalin voimakkuuteen (Suominen 2009). Intensiteetti-arvon avulla määritellään pisteille sävyarvo, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi silloin, kun mitattavan kohteen pinnan korkeuserot ovat pieniä ja siitä halutaan saada erottumaan mahdolliset kuviot (Cronvall ym. 2012, 11). Mittauksen tuloksena saadaan aikaan pistepilvi, jonka avulla voidaan tehdä 3D-malli.

3.4.3 Mittauskalusto ja mittaaminen

Liikkuvassa laserkeilaustutkimuksessa mittausautoon asennetaan kolmiosainen laserskanneri. Lasertykki tuottaa lasersäteen, keilain levittää säteen ja ilmaisinoso mittaa takaisin heijastuvan signaalin avulla kohteen etäisyyden. Etäisyyden mittaaminen perustuu valonnopeuteen tai vaihesiirtymään. Uusimmissa laitteissa mittaaminen voi perustua myös näiden yhdistelmään. (Roadex 2001-2011.)

Liikkuvat laserkeilauslaitteistot voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään. Mobiiliskannerilaitteistoon, joka on kalliimpi ja tarkempi. Sen avulla voidaan mitata väylän ja sen lähiympäristön tarkat koordinaatit noin sadan metrin etäisyyteen saakka keskimäärin 1–3 cm tarkkuudella. Toiseen ryhmään kuuluvat halvemmat maalaserkeilaimet, jotka on asennettu liikkuvalla alustalle. Myös tällöin puhutaan liikkuvasta laserkeilauksesta. Kuvassa 10 on Roadscanners Oy:n mittausauto, jonka takaosaan on kiinnitetty laserkeilauslaitteisto. (Roadex 2001-2011, kurssi 1; Cronvall ym. 2012, 16.)



Kuva 10 Mittausauto, johon on kiinnitetty laserskannausjärjestelmä (Kuva: Roadex 2001-2011)

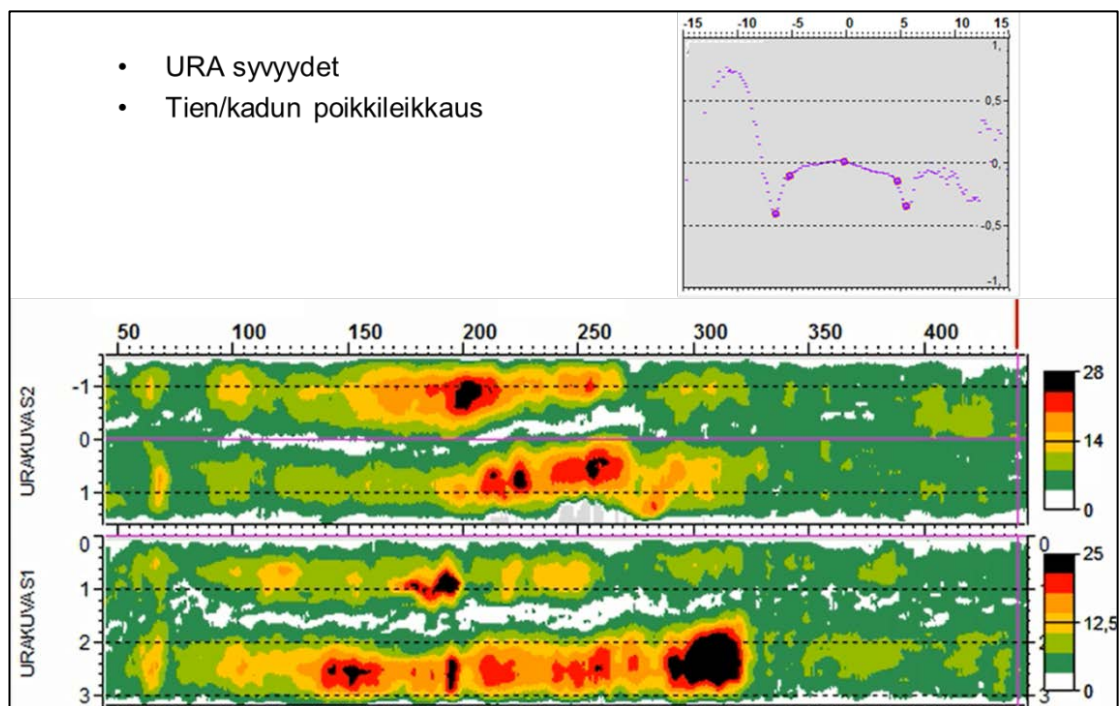
Keilaimet asennetaan mittausajoneuvoon vähintään 3,5 m:n korkeuteen maanpinnasta, jotta väylän luiskien alareunat saadaan mahdollisimman kattavasti mitattua samalla ajokerralla (Cronvall ym. 2012, 11). Lisävarusteena mittauksessa käytetään digitaalivideokameraa, jolla videokuvataan samaan aikaan tutkittava kohde. Videokamera voi sijaita laserkeilaimen yhteydessä tai se voidaan asentaa erikseen mittausajoneuvon katolle.

3.4.4 Tulokset

Laserkeilauksen avulla saadaan tutkittavasta kohteesta mitattua pistepilvi. Pistepilven pohjalta tehdään 3D-mallinnus väylän pinnasta. Esimerkiksi kuivatustutkimuksia varten saadaan tietoa väylän ja sitä reunustavien ojien korkeusasemasta. Väylälle on voinut kehittyä reunapalteita tai luiskat ovat voineet valua ojiin, jolloin kuivatus ei toimi tarkoitetulla tavalla. Mittausten pohjalta voidaan tuloksista nähdä ongelmakohdat nopeasti ja selkeästi. (Roadex 2001-2011.)

Laserkeilausta voidaan hyödyntää routanousujen tutkimiseen. Kun mittaukset tehdään samasta kohteesta keväällä routanousun ollessa suurimmillaan ja kesällä sulaaan aikaan, voidaan tuloksia vertailemalla selvittää kohteet, joissa esiintyy routanousua. Lisäksi tutkimusten perusteella voidaan määrittää routanousun suuruus. (Matintupa 2011b, 2.)

Väylän pinnan mittauksissa voidaan myös hyödyntää laserkeilaustekniikkaa. Kuvassa 11 on esitetty laserkeilauksen avulla mallinnettu tien pinta, johon on eri värein määritetty urasyvyksiä. Tuloksista voidaan myös laskea poikkileikkauksia kuvan oikeassa reunassa olevan mallin mukaisesti. Poikkileikkausten avulla voidaan tutkia esimerkiksi uraisuutta.

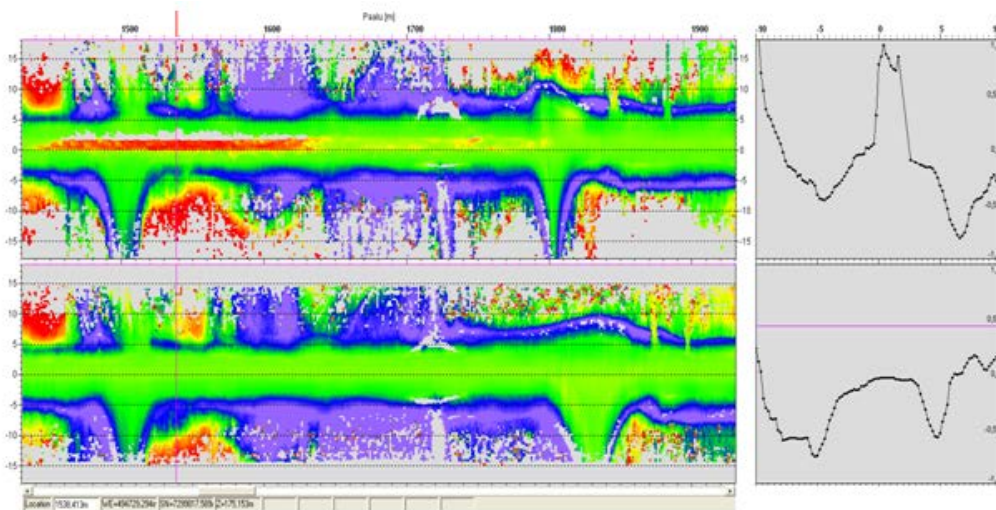


Kuva 11 Laserkeilauksen hyödyntäminen uraisuusmittauksissa (Roadscanners Oy 2012)

3.4.5 Riskit ja laadunvalvonta

Laserkeilauksen hyötyjä ovat esimerkiksi mittaamisen nopeus ja se, että menetelmää voidaan käyttää hankalassakin työskentely-ympäristössä (Suominen 2006.) Kun pistepilvi on tarpeeksi tiheä, saadaan sen avulla luotua erittäin tarkka mallinnus väylästä ja sen ympäristöstä. Pistepilven laatuun vaikuttavat yksittäisen pisteen laatu, pistepilven tiheys sekä erikseen mitattavien pistepilvien yhdistämisen tarkkuus (Joala 2006, 3.) Yleisesti voidaan ajatella, että mitä tiheämmin mitattu pistepilvi on, sitä tarkempi mallinnus voidaan tehdä. Mutta silti on muistettava, että jos yksittäisten pisteiden tarkkuus on huono, ei pistepilvikään ole tarkka, ja tuloksista ei silloin ole hyötyä. (Cronvall ym. 2012, 19.)

Mittaustulosten tarkkuuteen vaikuttavat näkyvyyttä heikentävät tekijät, kuten sumu, lumi, pöly tai sade. Yleisin syy virheellisiin mittaustuloksiin on lasersäteiden ennenaikainen heijastuminen tai poikkeaminen. Esimerkiksi tiellä oleva pöly voi aiheuttaa ennen aikaista heijastumista, jolloin tien todellista korkeusasemaa ei saa selvitettyä ilman uutta mittausta. (Matintupa 2010, 6–10.) Kuvassa 12 on esimerkki laserkeilatusta tiekohteesta, joka on pölynnyt. Tuloksissa pölyäminen näkyy piikkeinä poikkileikkauskuvassa sekä poikkeavina heijasteina pinnan mallissa. Mittausajankohdan valinta on tärkeä osa mittausten suunnittelussa, jotta tuloksista saadaan luotettavia ja tarkkoja. Kesäaikana tehtävissä mittauksissa korkea kasvillisuus väylän reunoilla voi vääristää maanpinnan todellista muotoa, jolloin saadaan vääristynyttä tietoa. (Matintupa & Saarenketo 2011, 12.)



Kuva 12 Pölyämisen vaikutuksen näkyminen laserkeilausaineistossa (Roadscanners Oy 2011)

Liikkuvalla mittausmenetelmällä tulee kiinnittää huomiota myös laitteiston asentamiseen. Keilaimien asento ja sijainti tulee olla tarkasti tiedossa, jotta lähtökulmat ja etäisyydet saadaan määriteltyä oikein. Inertialaitteiden avulla saadaan poistettua ajoneuvon kallistelun vaikutus, ja siten ajolla ei ole vaikutusta yksittäisen pisteen koordinaattien tarkkuuteen. (Cronvall ym. 2012, 19.)

3.5 PTM -mittaukset

3.5.1 Palvelutasomittauksen teoriaa

Palvelutasomittauksella eli PTM -mittauksella tutkitaan tien pinnan pituus- ja poikki-profiilia (Tiehallinto 2007, 12). Mittauksella saadaan tietoa muun muassa väylän pinnan epätasaisuudesta ja urautuneisuudesta. Menetelmällä voidaan mitata myös sivukaltevuuksia. (Roadex 2001-2011.)

Käyttökohteita PTM -mittauksista saataville tuloksille on useita. Tieverkoston yleiskunnon seurannassa käytetään PTM -mittauksia, ja esimerkiksi Suomessa mitataan teitä yli 30 000 km vuosittain. (Tiehallinto 2007, 12.) Tien pinnan tasaisuuden mittaamista hyödynnetään väylän kunnon inventoinnissa sekä päällystystöiden laadunvalvonnassa. Kunnon inventoinnissa tutkitaan routanousujen ja rakenteen oman painon synnyttämien painumien aiheuttamia epätasaisuuksia. Väylän epätasaisuudet voivat ilmetä reikinä, pituushalkeamina tai esimerkiksi epätasaisina routanousuina. Jos epätasaisuutta on paljon, aiheuttaa se liikenneturvallisuusriskin. Pystysuuntainen epätasaisuus voi ilmetä autoilijalle tärinä, ja tarpeeksi voimakas tärinä voi olla terveystarve. (ROADEX 2001–2011.)

Myös tien poikkisuuntaista profiilia tutkitaan PTM -mittauksilla. Poikkisuuntaista epätasaisuutta eli urautumista aiheuttavat pääasiassa päällysteen kulumisen sekä sitomattomien päällysrakennekerrosten ja alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset. (Belt, Kolisoja, Alatyttö & Valtonen 2006, 12.) Tien uraisuus on ongelmallista, jos urat ovat niin syviä, että niihin voi jäädä vettä. Tällöin syntyy vesiliirtoon joutumisen mahdollisuus, eli liikenneturvallisuusriski. (ROADEX 2001-2011.)

3.5.2 Mittauskalusto ja mittaaminen

Mittauksessa käytetään tarkoitusta varten varusteltua mittausajoneuvoa. Ajoneuvo on varustettu laseranturilla, pystykiihtyvyyssanturilla sekä ultraääniantureilla. Suomessa tehtävissä mittauksissa käytetään 17 ultraäänianturia, jolloin saadaan 128 yksittäistä mittaustulosta jokaisesta anturista 10 cm matkalle. Yksittäisistä tuloksista lasketaan automaattisesti keskiarvo, joka toimii lähtökohtana parametrien laskemiselle. (Tiehallinto 2007, 14.) Laseranturilla mitataan tien pinnan ja auton korin välistä etäisyyttä. Kiihtyvyyssanturilla mitataan korin pystysuuntaista liikettä. Kuvassa 13 on mittausauto, johon on kiinnitetty ultraäänisensoreihin perustuva mittausjärjestelmä. Kiihtyvyyssanturi on kiinnitetty auton taka-akselistoon. Mitatuista tiedoista lasketaan tien pituussuuntainen profiili. Laskettu profiili kuvaa tien tasaisuutta urien suhteen. (Onninen 2001, 3.) Ultraäänianturit on sijoitettu uramittauspalkkiin ja uramittaustuloksista saadaan määriteltyä tien poikkileikkausprofiili.



Kuva 13 Ultraäänisensoreihin perustuvalla Roadmaster mittausjärjestelmällä varusteltu mittausauto (Roadex 2001–2011)

Antureiden lisäksi mittausautoon on asennettu muita mittauslaitteita. Pulssianturi on kiinnitetty mittausajoneuvon renkaaseen, ja sillä mitataan matkaa. GPS-järjestelmän avulla määritellään mittausauton sijainti, eli saadaan paikkatietoa x- ja y-koordinaattien muodossa. Inklinometrien eli kallistuskulmamittareiden avulla tallennetaan auton liikkeitä ja suuntia sekä auton asentoa. (Tiehallinto 2007, 14.)

PTM -mittauksen suorittaminen voidaan toteuttaa joko yhdeltä kaistalta per suunta tai mittaus voidaan tehdä kaikilta kaistoilta molempiin suuntiin, jos halutaan tarkempia tuloksia (Onninen 2001, 13). Mittaaminen tapahtuu liikenne rajoitusten mukaisesti liikenteen seassa, jolloin mittausnopeus vaihtelee 30 km/h ja 90 km/h nopeuksien välillä. Mittausnopeus tulee pitää tasaisena mahdollisuuksien mukaan koko mittauksen ajan. Yleisesti Suomessa kerralla mitattava leveys on 3,2 m. Mittauksen suorittajan tulee sijoittaa mittaus ajourille, ja kapeammilla teillä tulee huolehtia siitä, että laitimmainen anturi on päällysteen päällä. (Tiehallinto 2007, 14.)

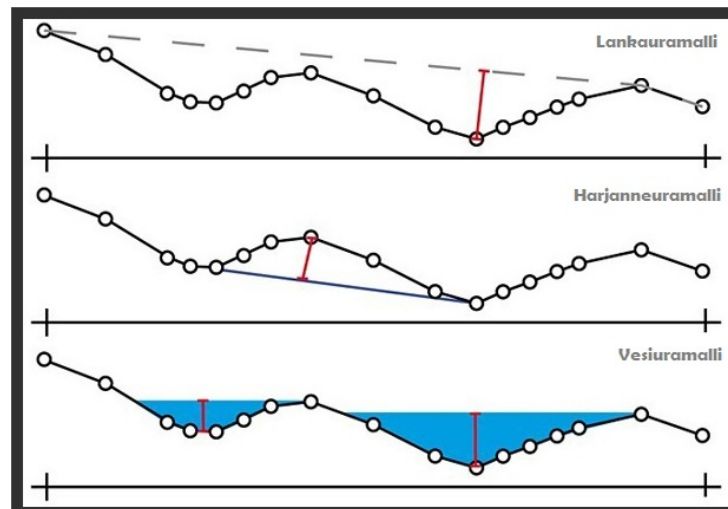
3.5.3 Tulokset

PTM -mittauksella saaduista tiedoista lasketaan erilaisia tunnuslukuja, jotka kuvaavat tien pinnan epätasaisuutta. Maailmanlaajuisesti tutkittava IRI-arvo (mm/m) eli International Roughness Index kuvaa mitattavan kohteen pituussuuntaista tasaisuutta. IRI kuvaa yleisesti sellaista epätasaisuutta, joka tuntuu väylän käyttäjältä epämukavalta. Se ei siis kuvaa tien geometriaan liittyvää tasaisuutta. Mittauksesta saadaan tulokseksi aallonpituuksia, ja IRI-arvossa on pääasiassa huomioitu aallonpituudet, jotka ovat välillä 0,5–30 m. Tietoja luetaan mitattavalta osuudelta 4 cm:n välein. Tuloksissa IRI-arvo esitetään yleisesti 100 m:n tiesosuuksille. (Onninen 2001, 4.) Tiehallinnon vuonna 2007 tekemän kuntoluokitustaulukon perusteella pääteiden keskimääräiset IRI-arvot vaihtelevat noin 1 mm/m:stä 2,5 mm/m:iin. Vähäliikenteisemmällä teillä, joiden KVL on alle 350, arvo voi vaihdella 1,8 mm/m:stä 6,6 mm/m:iin, eli vaihteluväli on huomattavasti suurempi. (Tiehallinto 2007, 22.)

Päällystyksen laadunvalvonnassa käytetään yleisen IRI-arvon lisäksi IRI4 tunnuslukua. IRI4 -tunnusluvussa on huomioitu mittaustulokset, joiden epätasaisuuksien aallonpituudet ovat 0,5 m:stä 4 m:iin. Aallonpituuksien huomioitava väli määräytyy sen perusteella, että päällystystöissä levittimen käytöllä voidaan vaikuttaa vain alle 4 m:n epätasaisuuksiin. (Onninen 2001, 6.)

Tutkittavasta kohteesta määritetään pituusprofiilin lisäksi poikkiprofiileja säännöllisin välein. Poikkisuuntaisen profiilitiedon avulla voidaan tutkia päällysteen laatua sekä arvioida kunnossapidon tarpeellisia toimenpiteitä. (Tiehallinto 2007, 28.) Mitattavasta kohteesta tutkitut poikkileikkaukset voidaan esittää erilaisten mallien avulla. Kuvassa

14 on erilaisia poikkileikkausmalleja. Ylin malli kuvaa perinteistä lankauramallia. Keskimmäisenä on harjanneuramalli ja alimpana on esimerkki vesiuramallista. Samasta kohteesta voidaan tehdä useampi malli, riippuen mitä halutaan erityisesti tarkastella. Poikkileikkausmalleja voidaan verrata keskenään, ja sitä kautta saadaan tärkeää tietoa tutkittavasta kohteesta. Esimerkiksi lankauramallia ja harjanneuramallia verrattaessa toisiinsa voidaan saada viitteitä pysyvistä muodonmuutoksista, jos mallien keskinäinen ero on suuri. (Roadex 2001–2011.)



Kuva 14 Erilaisia uramittaustulosten mallinnustapoja (Roadex 2001-2011, muokattu)

Lankauramallia hyödynnetään usein esimerkiksi maksimiurasyvyyden laskentaan. Maksimiurasyvyys lasketaan mittaamalla erikseen urasyvyys molemmista rengasurista. Kuvassa 14 olevassa mallissa punainen viiva kuvaa suurinta etäisyyttä ns. tien pinnan päälle kiristetystä langasta. Urasyvyys vaikuttaa ajomukavuuteen ja vesiliittoriskin olemassaoloon. Siksi sen mittaaminen on tärkeää sekä kunnossapidon että laadunvalvonnan kannalta. (Tiehallinto 2007, 30.)

Muita poikkiprofiilista laskettavia tunnuslukuja ovat esimerkiksi harjanteen korkeus, heitot ja sivukaltevuus (Ruotoistenmäki 2005, 30). Harjanteen korkeus määritellään kuvassa 14 olevan keskimmäisen mallin mukaisesti. Eli vasemman ja oikean ajouran väliin piirretään kuvan mukainen sininen viiva. Sitä vastaan lasketaan suurin ero jokaisessa poikkiprofiilin mittauspisteessä. Saatu lukuarvo voi olla positiivinen tai negatiivinen, riippuen onko ajourien välissä harjannetta. Positiivinen harjanteen korkeus voi kertoa reunojen painumista. Negatiivinen arvo taas viittaa väylän reunojen routimiseen, varsinkin jos mittauksissa huomataan muutoksia kevättalven ja kesän mittausten tuloksissa. (Onninen 2001, 10.) Harjanteen korkeudella on merkitystä liikenneturvallisuudel-

le, koska se heikentää turvallisuutta väistö- ja ohitustilanteissa. Harjanteen korkeuden kasvun seurannalla voidaan suunnitella rakentamisen vahvistamisen ajoitusta. Esimerkiksi vähäliikenteisellä tiellä raja-arvona voidaan pitää 20 mm:n harjanteen korkeutta. Kun PTM -mittauksia tehdään vuosittain samalle katuosuudelle, voidaan jo vuosittaisesta 5 mm:n harjanteen korkeuden kasvusta päätellä, että kadun rakenteessa tapahtuu sellaisia muutoksia, jotka vaativat päällystystä raskaampia kunnossapitotoimenpiteitä. (Tiehallinto 2007, 32–33.)

Sivukaltevuuden muutosten seurannalla saadaan tietoa epätasaisista pohjamaan painumista ja roudan vaikutuksesta. Pohjamaan painumat voivat aiheuttaa muutoksia esimerkiksi kaarrekkallistuksiin, ja on tärkeää tietää, milloin muutoksia on syntynyt haitallisissa määrin. Sivukaltevuusmittausten tuloksia voidaan hyödyntää myös päällystykseen tasauksen suunnitteluun. Pintakuivatuksen toimivuutta voidaan tarkastella, kun yhdistetään ura- ja harjannetutkimukset yhteen sivukaltevuusmittaustulosten kanssa. (Onninen 2001, 11.) Jos sivukaltevuus on riittämätön tai väärään suuntaan, aiheuttaa se ajoneuvoille ulossuistumisriskin. Väärään suuntaan oleva sivukaltevuus voi ohjata rakenteeseen tulevaa vettä väärään paikkaan, jolloin se voi jäädä rakenteeseen aiheuttaen siellä vaurioita. (Tiehallinto 2007, 35.)

3.5.4 Riskit ja laadunvalvonta

Epätasaisuus- ja uratutkimusten sekä erityisesti pysyvien muodonmuutosten tutkimusten kannalta on tärkeää, että PTM -mittauksissa mittausaineistoa kerätään ja tarkastellaan tarpeeksi tiheästi. Mittausaineiston keruu tapahtuu jatkuvalla mittauksella ja luotettavimmat tulokset saadaan, kun tulosten laskenta suoritetaan 5-10 m välein. Myös 20 ja 100 m:n laskentavälejä käytetään yleistarkasteluissa. Jos tutkimus tehdään liian pitkillä laskentaväleillä, voi lyhyellä alueella esiintyvä ongelmaväli hukkaa esimerkiksi IRI-arvojen osalta muuten hyväkuntoiseen rakenteeseen. (Roadex 2001–2011.)

IRI-arvoja tarkasteltaessa tulee huomioida, että liikenteessä helposti havaittavat terävät epätasaisuudet, joiden pituus on alle 3 m sekä yksittäiset alle 0,5 m:n pituiset epätasaisuudet eivät tule huomioiduksi 100 m:n välein tehtävässä IRI-arvon tulosteessa. Jos halutaan tarkastella esimerkiksi saumakohtia, tulee käyttää 10 metrin tarkasteluväliä. (Tiehallinto 2007, 13.)

Mittausten aikana tehtävä paikannus matkamittauksen avulla on tarkkuudeltaan sellainen, että tarkat paikannukset voidaan tehdä toimistolla. Mittaukset tulee siksi aloittaa ja päättää tunnistettavasta kohdasta. Mittaukset tulee pyrkiä aloittamaan ja lopettamaan noin 100 m ennen ja jälkeen mitattavan kohteen, jotta varsinaisen kohteen mittaukset voidaan suorittaa samaa nopeutta ajaen. Varmuutta mittaustulosten oikeellisuuteen saadaan tekemällä mittaukset molempiin suuntiin. Vaurioalueiden sijaintia ja laajuutta voidaan siten vertailla tulkintavaiheessa. (Onninen 2001, 13–14.)

3.6 Visuaaliset tutkimusmenetelmät

Visuaalisia tutkimusmenetelmiä hyödynnetään usein kuntotutkimusten ja hankearviointien teossa. Tutkimuskohteisiin tehdään maastokäyntejä, ja yleensä kohteet vähintäänkin valokuvataan. Nykyisen tekniikan avulla on yhä enemmän siirrytty käyttämään videokuvaamista, koska videoinnin avulla voidaan kohdetta tarkastella myöhemmin ilman uutta maastokäyntiä. Videokuvauksen avulla väylän mittaushetken kunto saadaan tallennettua, ja siihen voidaan palata esimerkiksi mahdollisissa kiistatilanteissa. Videoista voidaan erotella tarvittaessa digitaalisia kuvia, joita voidaan liittää esimerkiksi raportteihin.

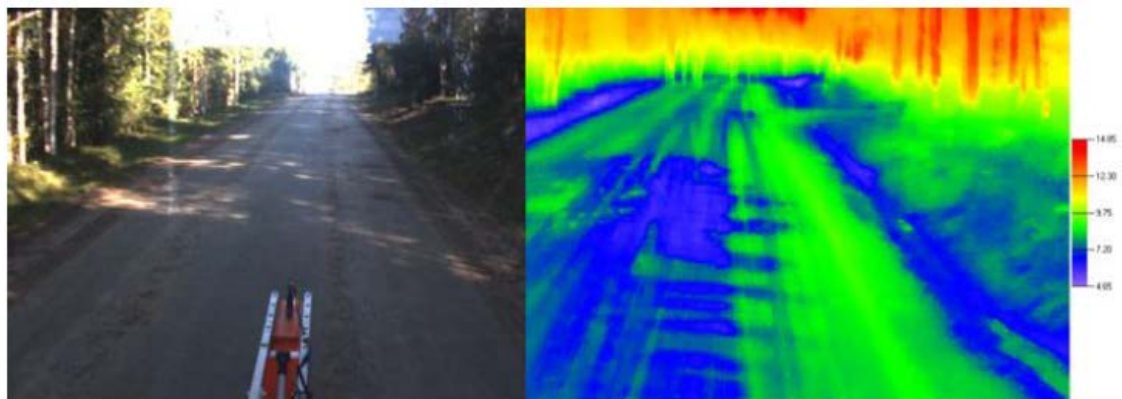
Kohteen videointi on yksinkertaista ja nykyajan välineillä mittaus saadaan suoritettua muiden mittausten, kuten esimerkiksi maatutkauksen yhteydessä. Maatutkatulkintojen laatu paranee, kun videolta voidaan varmistaa mahdollisia ongelmakohtia. Lisäksi eri asiakasryhmille saadaan jaettua tietoa, jota on vaikea pelkästään selittää. Videokuvan avulla suunnittelijat, urakoitsijat ja tiepiirit saavat selkeämmän käsityksen väylän nykytilasta. Lisäksi tutkittavan väylän pintakohteet ja laitteistot tulevat kuvattua videolle, jolloin niiden kuntoa voidaan tarkastella jälkikäteenkin. (Saarenketo & Maijala 2004, 20.)

Päällystevaurioinventoinnissa digitaalinen videokuvaukseen on erinomainen apumenetelmä. Videoon tallentuvat esimerkiksi pituushalkeamat, verkkohalkeamat sekä erilaiset purkaumat. Videoista voidaan irrottaa tarkempaa tarkastelua varten pysäytettyjä kuvia, joissa pintavauriot näkyvät. Myös sorateiden kunnan arvioinnissa hyödynnetään ajoneuvosta käsin kuvattua videota. Tiemestarit ja urakoitsijat saavat videokuvasta tehokkaan työkalun väylän kunnan valvontaan. Myös liikennemerkkien, valaisinpylväiden ja

muiden tieverkoilla olevien laitteiden ja varusteiden kuntoa voidaan tarkastella videolta. (Ropponen & Pulkkinen 2009.)

Kuivatusanalyysien teossa ojat, rummut ja tien pinnan kunto tallennetaan joko videolle tai valokuviksi. Pelkkiä valokuvia otettaessa olisi kuvaajan hyvä tehdä tarkentavia muistiinpanoja ja huomioita kuvauskohteista. Tutkimuskohteissa, joissa on rumpuja, aiheuttavat tukkeumat lähes poikkeuksetta ongelmia. Sen takia rummut tulisi kuvata yksilöidysti myöhempää korjaussuunnittelua ja ongelmien selvitystä varten. (Roadex 2001–2011.) Kuivatusanalyysiä tehdessä tehokkain tiedonkeruumenetelmä on kolmen kameran järjestelmä. Kameran asennetaan mittausauton katolle vähintään kahden metrin korkeuteen maanpinnasta. Yksi kamera suunnataan kuvaamaan tien reunaa ja ojaa, ja toinen kamera kuvaa päällysteen kuntoa. Kolmannen kameran avulla voidaan tutkia laskuojan kuntoa, kun se suunnataan kohtisuoraan väylän sivulle. (Saarenketo 2009b, 5.)

Lämpökamerakuvaus on toinen visuaalinen tutkimusmenetelmä, jota hyödynnetään väylien tutkimuksissa. Menetelmää hyödynnetään esimerkiksi kuivatuksen kunnan analyseissä. Liittymärumpujen olemassaolo ja niiden toimivuus voidaan tarkastaa lämpökameran avulla. Kelirikkokohteissa voidaan paikantaa potentiaaliset kelirikkokohteet. Kylmä vesi pumppautuu väylän rakenteen pintaan pehmentäen pinnan rakennetta ja aiheuttaen deformaatiota. Kohdat, joissa edellä mainitun kaltaisia ongelmia on, voidaan paikantaa lämpökameran avulla. Kuvassa 15 on rinnakkain videokamerasta pysäytetty normaali kuva vasemmalla ja oikealla on yhtä aikaa kuvattu lämpökamerakuva. Lämpökamerakuvasta voidaan nähdä, että tien alla olevasta roudasta irtoaa vettä, joka imeytyy tierakenteeseen. Kuvassa tämä näkyy sinisinä, kylmempää symboloivina kohtina. (Matintupa 2011b.)



Kuva 15 Digitaalivideon pysäytetty kuva ja lämpökameran kuva tutkimuskohteesta (Roadscanners 2011)

Uusimpien tutkimusten perusteella lämpökamerakuvausta voitaisiin hyödyntää myös routalinssien paikantamiseen, väylän rakenteissa olevien routraisteiden paikantamiseen sekä päällystystöissä päällysteen lajittumisen kontrollointiin. 2000-luvulla lämpökamerakuvausta on alettu käyttää säännöllisesti yhtenä laadunvalvonnan apuvälineenä. (Saarenketo 2009a, 3.) Lämpökameramittausten hyödyntämistä tutkimuksissa kehitetään jatkuvasti, ja uusimmat kehitystutkimukset suuntautuvat päällystevaurioiden inventointimahdollisuuksiin (Matintupa 2011b).

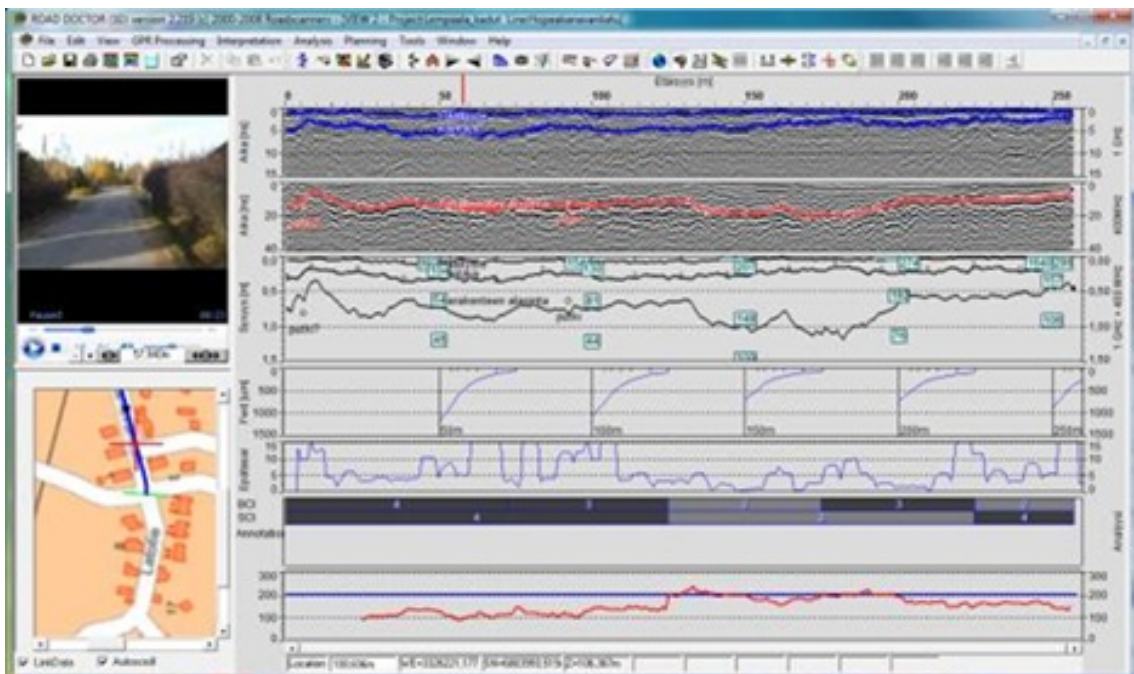
Road Doctor® Cam Link on Roadscanners Oy:n kehittämä ohjelma, jolla voidaan tallentaa videokuvaa ja valokuvia. Ohjelma on kehitetty työkaluksi tiestömittausten yhteydessä tehtävään visuaaliseen vaurioinventointiin. Kolmen kameran videot ja tarvittaessa valokuvat saadaan tallennettua samanaikaisesti. Lisäksi ohjelmaan saadaan kerättyä paikkatietoa GPS-paikannusjärjestelmän avulla kuvauksen yhteydessä. (Roadscanners 2013.)

Tallennettu video voidaan myöhemmin linkittää esimerkiksi maatutkalla mitattujen tulkintojen kanssa samaan näkymään, ja paikkatiedon lisäyksellä saadaan tulkinnat kohdistettua. Road Doctor -ohjelmalla karttakuva, videokuva ja paikkatiedon avulla kohdistettu maatutkatulkinta sekä muut tarvittavat lisätiedot saadaan koottua yhdeksi helposti tarkasteltavaksi projektikonaisuudeksi.

4 YLEISTÄ PROJEKTIESIMERKEISTÄ

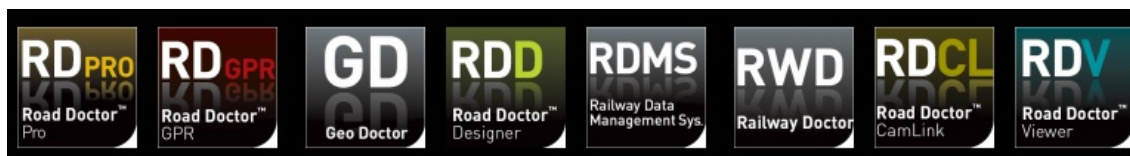
Opinnäytetyön seuraavissa luvuissa tutkitaan tarkemmin kolmea projektia, joissa on hyödynnetty ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä. Kaikki projektit ovat Roadscanners Oy:n toteuttamia. Yritys on erikoistunut väylien, kuten teiden, katujen, rautateiden, siltojen ja lentokenttien kunnan hallintaan sekä hallinnassa käytettäviin työkaluihin. Roadscanners Oy tekee tilauksesta muun muassa väylien rakenteellisia ja toiminnallisia kuntokartoituksia. Tutkimusten pohjalta voidaan tehdä myös vaurioanalyyskejä tai esimerkiksi korjaussuunnitelmia, tilaajan näin halutessa. Organisaatiossa kehitetään jatkuvasti myös väylätutkimuksissa käytettäviä erikoisohjelmistoja. Projekteissa esiteltävät tulokset on tuotettu Roadscanners Oy:n kehittämällä Road Doctor -ohjelmistolla.

Roadscanners Oy on kehittänyt Road Doctor -ohjelmistokokonaisuuden liikenneväylätutkimuksia varten. Ohjelmiston avulla voidaan samassa näytössä yhdistetysti tarkastella, tulkita ja analysoida eri menetelmillä mitattua katumittausaineistoa. Kuvassa 16 on esitetty ohjelmiston käyttöliittymänäkymä.



Kuva 16 Road Doctor -ohjelman käyttöliittymänäkymä

Kuvassa 17 on koottuna kaikki yrityksen ohjelmistopakettit. Ohjelmistokokonaisuudesta löytyy muun muassa Road Doctor Pro yrityksille, joilla on käytössään maatutkakalusto ja tarve työstää tulkintoja pitemmälle. Valikoimassa on Geo Doctor -ohjelmisto, joka on tarkoitettu geologian ja geofysiikan alan tutkijoille ja konsulteille. Road Doctor Administration taas on kaupungeille ja kunnille katuverkon mittausaineiston hallinnan työkaluksi suunniteltu ohjelmisto. Road Doctor Viewer on kaikille ilmainen loppukäyttäjän katseluohjelma, jonka avulla voidaan tarkastella tuotettuja projekteja ja datanäkymiä. (Roadscanners Oy 2013.)



Kuva 17 Roadscanners Oy:n ohjelmistopakettit (Roadscanners 2008, muokattu)

Road Doctor Pro sisältää työkalut konsulteille mittauslaitteista kerätyn mittaustiedon tulkintaan ja analysointiin. Lisäksi ohjelman avulla voidaan suunnitella ja mitoittaa rakenteita. Maatutkauksen osalta ohjelma sisältää lisäominaisuuksia, joiden avulla maatutkatietoa voidaan prosessoida ja tulkita sekä tuloksista voidaan tehdä graafisia tai numeerisia esityksiä. Ohjelmisto on projektipohjainen, eli samaan projektiin voidaan kerätä kaikki tutkimuskohteesta mitattu tieto. Tiedot ovat hallittavissa yhtenä kokonaisuutena, ja eri mittausten tulkintoja voidaan katsella samaan aikaan yhdessä näkymässä, jossa tiedot ovat toisiinsa synkronoituja. (Roadscanners Oy 2008.)

Roadscanners Oy tarjoaa asiakkailleen erilaisia katuanalyysipaketteja. Peruspakettityyppejä on kolme erilaista:

- 1) **Suppea analyysipaketti**, joka sisältää maatutkamittaukset. Raportissa asiakas saa katukohtaiset pituusprofiilit tulkittuine kerrosrajapintoineen.
- 2) **Keskilaaaja analyysipaketti**, joka sisältää maatutkamittaukset videointeineen sekä pudotuspainolaitemittaukset. Raporttiin kirjataan katujen pituusprofiilit, joissa näkyvät kerrosrajapinnat, moduulilaskennat, pudotuspainolaitemittauksen tulokset sekä nykytilan lähtökantavuus.

- 3) **Laaja analyysipaketti**, joka sisältää maatutkamittaukset, tasaisuusmittaukset Roadmaster -ohjelmaa käyttämällä, pudotuspainolaitemittaukset, videoinnin ja vaurioanalyysin. Raportti on laaja, ja sen sisältöön kuuluvat kirjallinen kuvaus mittauskohteista, karttaesityksiä erilaisista kuntoparametreista, korjaussuunnitelmasuositus ja mahdollisten lisäselvitysten tarpeen kuvailu.

Seuraavissa luvuissa esitellään eri analyysipakettivaihtoehdoilla tehtyjä projekteja. Projekteista selvitetään käytetyt mittausmenetelmät ja puretaan mittauksista saatuja tuloksia. Ensimmäisenä on Tampereen kaupungin projekti, joka on tehty suppealla analyysipaketilla. Mittauksissa keskityttiin selvittämään tutkittavien kohteiden rakenteellinen kunto. Lisäksi kohteisiin tehtiin laadunvarmistusmittaukset kunnossapitotoimenpiteiden jälkeen. Toinen projekti on tehty Lempäälän kunnalle käyttäen keskilaajaa analyysipakettia. Projektin tavoitteena oli selvittää mitattavien kohteiden rakenteellinen ja toiminnallinen kunto. Viimeinen käsiteltävä projekti on Rovaniemen kaupungin projekti, joka on toteutettu laajaa analyysipakettia käyttämällä. Projektista esitellään toiminnallisen kunnan mittauksia, ja niistä saatuja tuloksia.

5 TAMPEREEN KAUPUNGIN PROJEKTI

5.1 Yleistä Tampereen projektista

Tampereen kaupungin projekti toteutettiin kahdessa osassa siten, että ensimmäisessä mittauksessa selvitettiin katujen rakenteiden nykytila ja toisessa mittauksessa tehtiin laadunvarmistus korjaustoimenpiteiden jälkeen. Syynä mittauksen tilaamiselle alun perin oli tilaajan toteama katujen huono kunto. Vuonna 2011 suoritettiin tilaajan valitsemille katukohteille perusmittaukset. Kesällä 2012 samoihin kohteisiin tehtiin laadunvalvontamittaukset. Seuraavissa luvuissa perehdytään tarkemmin yhteen projektissa mukana olleeseen katuun.

5.2 Lähtötiedot

Tilaaaja halusi tutkia olemassa olevien katurakenteiden nykytilannetta. Projektiin valittujen katujen rakenteellisen kunnan selvityksen avulla saatiin tarkempaa tietoa korjaussuunnittelua varten. Mittaustulosten pohjalta asiakas pystyy valitsemaan katukohtaisesti soveltuvimman korjausmenetelmän. Osa projektissa olevista kaduista haluttiin mitattavan kokonaan ja lopuista haluttiin selvittää rakenteellinen kunto vain tietyltä kadun osalta. Lähtötietoina tilaajalta saatiin mitattavien katujen nimet sekä tarvittaessa paaluvälit osuuksille, joille tutkimus haluttiin tehdä.

Asiakkaan kannalta tärkein mittauksista saatava tieto oli rakenteen kokonaispaksuus. Rakenteen kokonaispaksuuden raja-arvona käytettiin 1 m. Tulkintojen pohjalta asiakas pystyi päättämään, riittikö kohteen korjaustoimenpiteeksi kevyet päällysteeseen kohdistuvat toimenpiteet vai vaadittiinko järeämpiä kokonaisrakenteeseen vaikuttavia ratkaisuja. Koska asiakas itse ilmoitti tekevänsä korjaussuunnitelman tai teettävänsä sen muualla, päädyttiin asiakkaan kanssa käyttämään tämän projektin osalta suppeaa katu-analyysipakettia. Jälkimmäinen mittauksista tehtiin laadunvarmistussyistä. Tilaaajan urakka-asiakirjoissa on maininta, jonka mukaan korjaustoimenpiteiden laadunvarmistus tulee tehdä maatutkaa käyttämällä, jos korjaustoimenpiteen suorittaa ulkopuolinen urakoitsija. Laadunvarmistusmittauksen tulkintoja varten asiakkaalta pyydettiin rakennekerrosten suunnitellut paksuudet.

5.3 Käytetyt mittausmenetelmät

Katurakenteiden kerrospaksuuksien ja rakenteen kokonaispaksuuden selvittämisessä käytettiin maatutkamittausta yhdessä digitaalisen videoinnin kanssa. Lisäksi mittauksista tallennettiin GPS -koordinaatit. Maatutkausta käyttämällä saatiin tietoa päällysteen ja kantavan kerroksen paksuudesta sekä kokonaisrakenteen alapinnasta. GPS -koordinaattien avulla saatiin synkronoitua maatutkadata, katukartta ja videokuva samaan näkymään projektin sisällä.

Ensimmäisellä mittauskerralla ajettiin olemassa olevaa ajorataa pitkin ja molemmilta kaistoilta mitattiin yksi linja. Mittaukset tehtiin GSSI:n SIR-20 kalustolla. Käytössä oli 1 GHz:n ilmastiantenni, jolla saatiin mitattua päällysteen ja sitomattomien kerrosten paksuudet. Toisena antennina mittauksessa käytettiin 400 MHz:n taajuudella toimivaa maavasteantennia. Maavasteantennin syvyysulottuvuuden avulla tarkastelu saatiin ulotettua aina 3,5 m:n syvyyteen saakka. Mittaukset saatiin kohdistettua pulssianturin avulla. Digitaalisen videoinnin ja GPS -koordinaattien tiedot tallennettiin CamLink -ohjelman avulla. Mittausten jälkeen tiedot purettiin ja linkitettiin Road Doctor Pro -ohjelmaan prosessointia ja tulkintojen tekoa varten.

Toisella mittauskerralla käytettiin samoja mittauslaitteita kuin ensimmäisessä mittauksessa. Koska kyseessä oli laadunvalvontaan liittyvä mittaus, mitattiin jokaisesta kohteesta useampi linja. Normaalisti laadunvalvontaprojekteissa mitataan kaksi linjaa, ellei mitattava katu ole erittäin kapea. Tässä tapauksessa mitattiin joka kadulta kolme linjaa. Mittaukset suoritettiin ajoradan oikealta ja vasemmalta reunalta sekä keskilinjalta. Toisenkin mittauksen jälkeen kaikki mitattu tieto kerättiin Road Doctor Pro -ohjelmaan. Mittausdata prosessoitiin ja tulkittiin.

5.4 Mittauksista saatujen tulosten purku

Mittauksessa tallennetusta digitaalivideosta poimittiin molemmilla mittauskerroilla still-kuvia jokaisesta mitatusta kohteesta. Kuvassa 18 on esimerkkikohteesta otettu kuva ensimmäisen mittauskerran yhteydessä. Samasta kohdasta otettiin kuva myös laadunvalvontamittaustulkintojen teon yhteydessä.



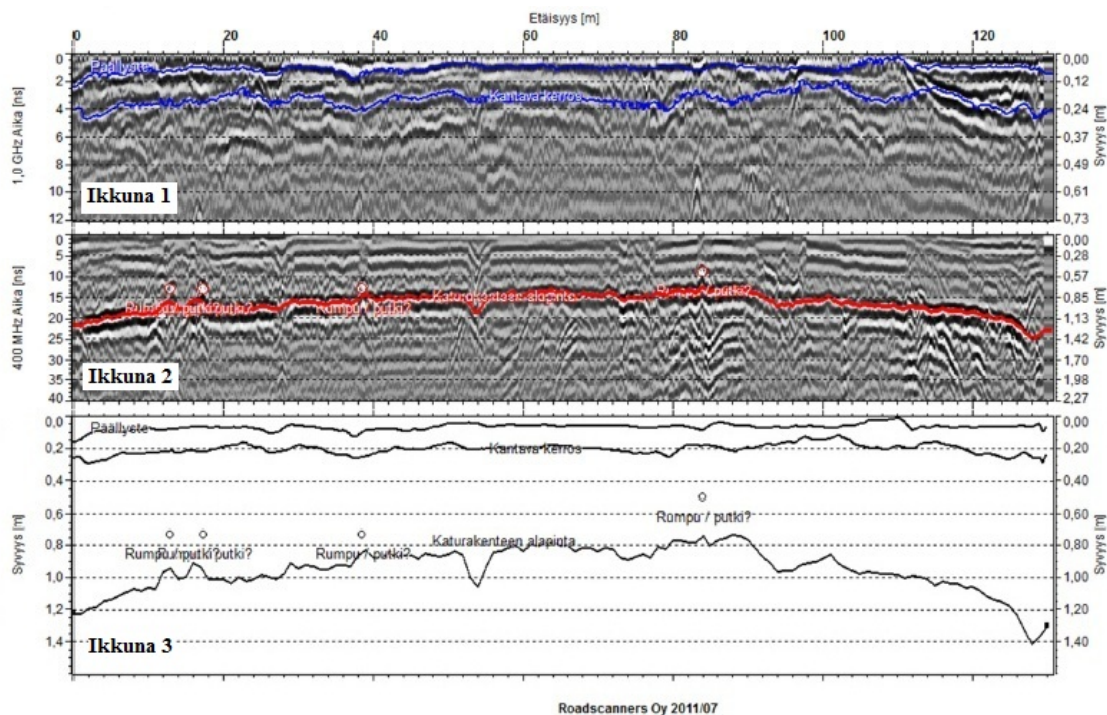
Kuva 18 Valitun kadun still-kuva ensimmäiseltä mittauskerralta

Kuvasta 19 nähdään, miten kohde on muuttunut ensimmäisen mittauskerran jälkeen. Kuvista voidaan suoraan nähdä, että kadun päällyste on uusittu ja kuivatusjärjestelyt ovat muuttuneet vähintään uusitun ojituksen muodossa. Tarkempia rakenteeseen liittyviä parannuksia voidaan tarkastella mittauksista tehtyjen tulkintakuvien pohjalta.



Kuva 19 Kadun still-kuva laadunvarmistusmittausten yhteydessä

Tulosten tarkastelua varten tehtiin Road Doctor -ohjelmaa käyttämällä katukohtaiset pituusprofiilikuvat. Kuvassa 20 on esitetty kadun toisen kaistan maatumittauksista saadut tutkadatavivat, joista on eroteltu kerrosrajat (suurennos liitteessä 2).



Kuva 20 Maatumittadatan tulkituttuna ensimmäisestä mittauksesta

Kuvassa 20 on kolme ikkunaa, joista jokainen kuvaa eri asiaa samalla kohtaa katua. Ylimmässä ikkunassa on ilmavasteantennin käsiteltyä tutkadatata, josta on sinisin viivoin tulkittu päällystekerroksen sekä kantavan kerroksen rajapinnat. Toisessa ikkunassa on maavasteantennista saatu tutkadatata prosessoituna. Katurakenteen alapinta on tulkittu ja kuvattu punaisella viivalla. Tutkadatatasta näkyy selkeästi, että katurakenteessa on putkia tai rumpuja. Ne on myös merkitty kuvaan pienillä ympyröillä ja seliteteksteillä. Pelkän maatumittadatan perusteella ei voida täydellä varmuudella sanoa, onko kyseessä putki vai rumpu, siksi selitteeseen on kirjattu molemmat vaihtoehdot.

Ikkunassa numero kolme on yhdistetty samaan kuvaan ilma- ja maavastedatatasta tehdyt tulkinnot. Kuvassa olevien tulkinnot selkeyttämisen vuoksi tutkadatataja ei ole asetettu näkyviin. Näkyvissä on pelkät kerrosten rajapintojen tulkinnot sekä putkien/rumpujen sijainnit. Rakennekerrokset on nimetty ja merkitty kuvaan. Kuvan yksikkönä ovat metrit, jotta kerrospaksuuksia päästään helpommin tarkastelemaan tulkituskuvasta. Tulostuvien lisäksi asiakkaalle lähetettiin tulosraportin mukana taulukko, jossa oli kirjattuna rakennekerrosten paksuudet viiden metrin välein. Taulukossa 5 on esimerkkikohteen taulukko, josta voidaan tarkastella lukuina esimerkiksi päällysteen paksuuksia. Esi-

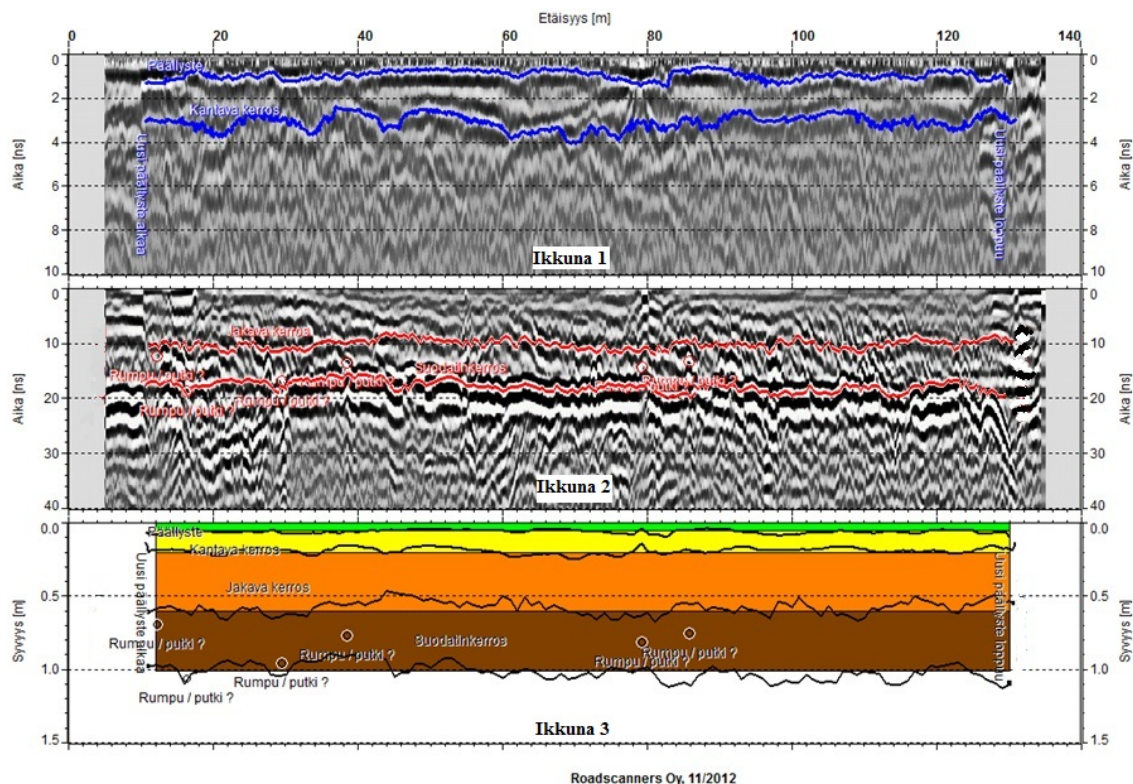
merkkikohteen päällysteen paksuus vaihtelee taulukosta saadun tiedon mukaan 20 mm:stä 150 mm:iin. Vastaavasti rakennekerrosten kokonaispaksuus vaihtelee 0,83 m:stä 1,22 m:iin. Taulukon perusteella voidaan todeta, että vaadittu kokonaisrakenteen 1 m:n kokonaispaksuus toteutuu vain kadun alku- ja loppupaalujen osuuksilla.

Taulukko 5 Rakennekerrosten paksuudet 5m:n välein esimerkkikohteessa

Paalu [m]	Päällyste alapinta [m] (koodi 21)	Kantava alapinta [m] (koodi 41)	Katurakenne alapinta [m] (koodi 71)
0	0,15	0,25	1,22
5	0,10	0,25	1,12
10	0,08	0,23	1,05
15	0,07	0,21	0,99
20	0,07	0,19	1,00
25	0,09	0,20	0,97
30	0,06	0,18	0,93
35	0,09	0,24	0,91
40	0,08	0,23	0,87
45	0,08	0,20	0,85
50	0,05	0,17	0,85
55	0,07	0,20	0,93
60	0,06	0,19	0,83
65	0,07	0,19	0,79
70	0,06	0,20	0,83
75	0,07	0,23	0,86
80	0,06	0,23	0,76
85	0,05	0,19	0,79
90	0,06	0,20	0,75
95	0,07	0,16	0,94
100	0,07	0,15	0,87
105	0,05	0,19	0,97
110	0,02	0,19	0,97
115	0,06	0,16	1,04
120	0,07	0,24	1,05
125	0,07	0,26	1,17

Ensimmäisten mittausten pohjalta tilaaja korjautti parhaaksi katsomillaan menetelmillä kadut. Korjausten jälkeen Roadscanners Oy suoritti laadunvarmistusmittaukset ja teki niistä tulosraportin kuvineen. Kuvassa 21 on esitetty laadunvarmistusmittauksista tehdyt tulokset (suurennos liitteessä 3). Lisäksi näkymässä esitetään tilaajalta saadut kerrosten suunnitelmienmukaiset rakennekerrosten paksuudet väreillä ja samaan kuvaan on asetettu näkyviin tulkitut kerrosrajat. Ikkunan 3 avulla voidaan suoraan nähdä, kuinka tarkasti rakennekerrosten paksuudet on onnistuttu korjaustoimenpiteissä toteuttamaan. Erona ensimmäisten

mäisten mittausten tulkintakuviin on se, että laadunvarmistuksessa myös suodatinkerroksen paksuus on tulkittu omaksi kerrokseksi.



Kuva 21 Maatutkatulkinta sekä suunnitelmapaksuudet tulospäivityksessä

Kolmannessa ikkunassa vihreällä värillä kuvataan päällysteen suunnitelmapaksuutta, joka esimerkkikohteessa on 0,05 m. Keltaisella värillä esitetään kantavan kerroksen suunnitelmapaksuus 0,15 m. Oranssi kerros kuvaa jakavan kerroksen suunnitelmapaksuutta. Kerroksen paksuudeksi on määritetty 0,35 m. Suodatinkerros on kuvassa ruskealla värillä. Kerrosten yhteenlaskettu suunnitelmapaksuus on 1 m, kuten kuvasta nähdään.

Mustat viivat ikkunassa kolme kuvaavat tulkittuja kerroksia, ja niistä voidaan nähdä, että paikoitellen esimerkiksi suodatinkerroksen alapinta ulottuu syvemmälle kuin 1 metri. Heittoa suunniteltuihin kerrospaksuuksiin voidaan havaita myös jakavan kerroksen osalta. Suodatinkerrosta on paikoitellen enemmän kuin suunniteltu, ja se ohentaa jakavan kerroksen paksuutta, koska kadun tasausta ei voida tässä tapauksessa nostaa. Kuvasta voidaan nähdä, että esimerkiksi paalun 20 kohdilla rakenteen kokonaiskerrospaksuus jää korjauksenkin jälkeen alle metriin. Myös paalun 50 m tienoilla voidaan havaita sama asia. Päällysteen paksuus näyttää ikkunan 3 kuvassa olevan koko tutkimuskohteen

osalta suunnitelman mukainen. Tarkempia lukematarkasteluja voidaan tehdä raportin mukana saatavista 5 m:n välein olevista kerrospaksuustaulukoista. Kaikilta kolmelta mitatulta linjalta tehtiin omat kerrospaksuustaulukot. Tulkintakuvien ja kerrospaksuustaulukoiden pohjalta tilaaja pystyy tarkastamaan urakoitsijan tekemän työn tarkkuuden. Tarvittaessa urakoitsijalta voidaan vaatia korjaustoimenpiteitä, jos laatuvaatimukset eivät työn suorituksen osalta täyty.

6 LEMPÄÄLÄN PROJEKTI

6.1 Yleistä Lempäälän projektista

Lempäälän projekti tehtiin vuonna 2008. Koko projektissa oli yhteensä viisi olemassa olevaa katu, joiden kunnon nykytilan tilaaja halusi selvittää. Tähän opinnäytetyöhön Lempäälän projektista valittiin yksi katu, jota tutkitaan tarkemmin. Kadulle tehdyt mitaukset ja mittausten perusteella saadut tulokset esitellään seuraavissa luvuissa.

6.2 Lähtötiedot

Tilaaja halusi selvittää kadun rakenteellisen ja toiminnallisen kunnon. Asiakkaan toiveiden pohjalta päädyttiin käyttämään keskilaajaa analyysipakettia. Lähtötietoina maatutkamittauksessa tarvittiin kadun nimi ja sijainti. Pudotuspainolaitemittauksiin saatiin tarvittavat lähtötiedot maatutkamittausten avulla.

6.3 Käytetyt mittausmenetelmät

Rakenteellisen kunnon selvittämisessä käytettiin useita eri mittausmenetelmiä. Maatutkauksen avulla selvitettiin rakenteessa olevien kerrosten paksuudet kuten päällysteen paksuus ja kantavan kerroksen paksuus. Lisäksi mittauksella selvitettiin rakenteen kokonaispaksuus. Maatutkamittauksen yhteydessä tehtiin myös digitaalinen videointi ja GPS -koordinaattien tallennus. Toiminnallisen kunnon selvitykseen käytettiin pudotuspainolaitemittausta, joka tilattiin Roadscanners Oy:n alihankkijalta.

Mittaukset suoritettiin siten, että mitattiin yksi linja per suunta. Mittauksessa käytettiin kahta eri taajuudella toimivaa antennia yhtä aikaa. Käytössä oli 1 GHz ilmavasteantenni, jota käyttämällä mitattiin päällysteen ja kantavan kerroksen paksuudet. Lisäksi saatiin tietoa päällysrakenteen yleiskunnosta. Katurakenteen alapinnan syvyyden mittaamiseen käytettiin 400 MHz taajuudella toimivaa maavasteantennia. Myös mahdolliset putket ja rummut havaittiin maavasteantennin avulla. Maatutkauksen yhteydessä katu digi-

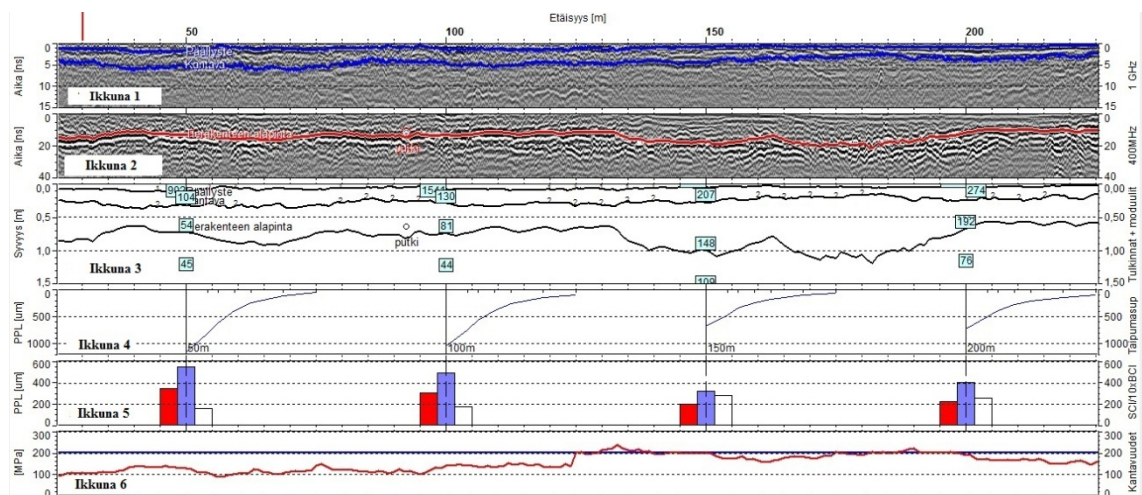
taalivideokuvattiin. Kuvaus tehtiin CamLink -ohjelmaa hyödyntäen. Videoinnin avulla dokumentoitiin kadun kunto mittaushetkellä.

Maatutkauksen jälkeen alihankkija toteutti pudotuspainolaitemittaukset siten, että mitauspisteiden väli oli 50 m. PPL-mittauksia tehtiin 100 m:n välein per kaista, jolloin tiedot yhdistämällä katurakenteen mitauspisteiden väliksi saatiin 50 m.

Kun kaikki mittaukset oli suoritettu, syötettiin kaikki kerätty tieto Road Doctor Pro –ohjelmaan. Maatutkauksen molempien antennien keräämä tieto, CamLinkistä saatu videointi sekä paikkatieto, jonka avulla saatiin tarkasti kohdistettua maatutkatiedot kartalle ja koordinaatistoon. Myös pudotuspainolaitemittauksen tiedot syötettiin ohjelmaan.

6.4 Mittauksista saatujen tulosten purku

Tulosraporttiin kirjattiin projektin mittauksista katukohtaiset pituusprofiilit, joista näkyvät tulkitut kerrosrajapinnat, rakennekerrosten takaisinlasketut E-moduulit sekä PPL-mittaustulokset. Lisäksi tuloksista selvisi nykytilan lähtökantavuus tutkittavalle kadulle. Tulokset koottiin kuvasarjaksi, ja yhtenä kuvaesimerkkinä on kuva 22 (suurennos liitteessä 4). Lisäksi tilaajalle lähetettiin taulukoidut kerrospaksuudet 5 m:n välein.



Kuva 22 Lempäälän projekti, valitun kadun tulospöytä (Roadscanners 2008)

Kuvassa 22 on Lempäälän esimerkiksi valitusta kadusta saatuja tuloksia. Kuvassa on kuusi ikkunaa, joista jokainen kuvaa eri tuloksia samasta kohdasta. Yläotsikossa näkyy

etäisyys mittauspisteen alusta loppua kohti. Ikkunoiden oikealla ja vasemmalla puolella on ikkunakohtaisia määritteitä tutkituista tuloksista.

Ikkuna 1

Ikkunassa 1 on ilmavasteantennista tulkittu luotausprofiili. Tutkadatasta heijasteina nähtävät rajapinnat on poimittu tulkitsemalla päällystekerroksen sekä kantavan kerroksen rajapinnat sinisin viivoin. Ensimmäisen ja kolmannen ikkunan kuvista nähdään, että päällysteen paksuus vaihtelee 50–100 mm:n välillä. Paalukohtaiset tarkemmat arvot asiakas voi tarkistaa tulosteesta saatavasta taulukosta, johon kerrosten paksuudet on laskettu 5 m:n välein. Kuvasta ja edellä mainitusta taulukosta voidaan tarkastella myös kantavan kerroksen paksuutta halutussa kohdassa. Esimerkiksi paalulla 50 m kantavan kerroksen alapinta on noin 300 mm:n syvyydellä, ja päällysteen paksuus on noin 10 mm. Kun päällysteen paksuuden vähentää kantavan kerroksen luvusta, saadaan kantavan kerroksen paksuus eli noin 200 mm.

Ikkuna 2

Toisessa ikkunassa on maavasteantennin tutkakuva. Maavastedatasta on punaisella viivalla tulkittu katurakenteen alapinnan heijasteraja. Myös kadulla oleva putki näkyy luotausprofiilissa selkeästi, joten se on merkitty myös tulostekuvaan.

Ikkuna 3

Kolmannessa ikkunassa näkyvät katurakenteen rakennekerrosten tulkinnat yksinkertaistettuna. Tutkadata on piilotettu ja mittayksikkö on muutettu metreihin, jotta kerrosten paksuuksia on selkeämpi tarkastella. Kuvasta nähdään, että koko rakenteen paksuus vaihtelee puolesta metristä metriin. Samaan kuvaan on merkitty myös pudotuspainolaitemittauksessa mitatut eri kerrosten E-moduuliarvot. Kuvassa näkyvät luvut kuvaavat eri rakennekerrosten takaisinlaskennalla laskettuja moduuleja.

Ikkuna 4

Neljännän ikkunan kuvaajat esittävät pudotuspainolaitemittauksen avulla saatuja taipumasuppiloita 50 m:n välein tehdyissä mittauspisteissä. Periaatteena on, että mitä suurempi maksimitaipuma on, sitä heikompi rakenne kohteessa on. Rakenteen heikkouden voi aiheuttaa esimerkiksi huonolaatuinen rakennemateriaali tai pehmeä pohjamaa. Ikkunassa 4 olevista taipumasuppiloista voidaan todeta, että maksimitaipumat vaihtelevat

600 μm ja 1000 μm :n välillä. Kuvasta tulkittuna saadaan siis viitteitä, että rakenteessa voi olla ongelmia. Tarkempaa tietoa saadaan laskemalla taipumasuppiloparametreja.

Ikkuna 5

Viidennessä ikkunassa on taipumasuppilosta laskettuja parametreja, joiden avulla kuvataan kadun eri rakennekerrosten kuntoa. Punaiset pylväävät ovat SCI-parametreja, siniset ovat BCI-parametreja ja valkoiset pylväävät kuvaavat E2-kantavuutta. BCI-parametri on kerrottu kymmenellä, jotta skaalaus on sama ja parametri saadaan esitettyä samassa kuvassa SCI-parametrin kanssa.

Esimerkissä olevan kohteen SCI-arvot vaihtelevat noin 200–350 μm :n välillä. Karkeaa luokittelua noudattamalla arvojen tulisi olla alle 150 μm , jotta pintakantavuus olisi hyvä. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että kohteessa olevan päällysteen ja sitomattoman kantavan kerroksen jäykkyys on heikentynyt ja tyypin 1 urautumisen riski on suuri. Pohjamaan kantavuutta kuvaava BCI-arvo vaihtelee esimerkkikohteessa noin 30 ja 55 μm :n välillä. Karkean luokittelun perusteella arvojen tulisi olla alle 20 μm , jotta pohjamaan kantavuus olisi hyvää. Kohteen mitattujen arvojen perusteella voidaan todeta, että arvot ovat keskimääräisesti huonoja ja viittaavat siihen, että kohteessa on urautumistyyppin 2 riski ja muita mahdollisia kantavuuteen liittyviä ongelmia.

Ikkuna 6

Alimmassa ikkunassa on sinisellä viivalla piirretty kadun laskennallinen tavoitekantavuus. Esimerkkikohteessa koko katurakenteen tavoitekantavuudeksi on asetettu 200 MPa. Punainen viiva kuvaa mittauksista laskettua nykyistä kantavuutta. Kuvasta nähdään, että nykyinen kantavuus on riittävä vain paaluväleillä 125–150 m ja 175–200 m. Kaikissa muissa kohdissa kantavuus on riittämätön.

Mittauksista tehtyjen tulkintojen pohjalta voidaan todeta, että kadun rakenteissa on vaurioita. Kun kadun rakenteen korjaustoimenpiteitä lähdetään suunnittelemaan, on huomioitava se, että valittujen korjaustoimenpiteiden jälkeen saavutetaan koko kadun osalta tavoitekantavuus. Odemarkin menetelmän avulla voidaan suorittaa tarkempia laskentoja rakennekerrosten E-moduuleista ja siten saadaan luotettava tieto siitä, että onko kadun heikko osa pohjamaa vai rakennekerrokset. Korjausmenetelmän valinnassa kannattaa huomioida tavoitekantavuuden alittavien osuuksien määrä. Katuosat voidaan korjata eri menetelmin, jos välit ovat sopivan mittaisia.

7 ROVANIEMEN KAUPUNGIN PROJEKTI

7.1 Yleistä Rovaniemen projektista

Rovaniemen kaupungin projektissa on seurattu pää- ja kokoojaverkon kuntoa säännöllisesti toistuvilla mittauksissa. Lähtötilanne mitattiin vuonna 2000 ja seurantamittauksia on tehty joka toinen vuosi. Uusimmat mittaukset on tehty vuonna 2012, mutta niistä ei ole vielä tehty viimeisintä tulosraporttia. Projekti on toteutettu laajalla analyysipaketilla. Seuraavissa luvuissa projektia avataan tarkemmin toiminnallisen kunnan mittausten ja tulosten osalta.

7.2 Lähtötiedot

Tilaaaja halusi selvittää Rovaniemen kaupungin pää- ja kokoojaverkon rakenteellisen ja toiminnallisen kunnan nykytilan. Roadscanners Oy kehitti vuosina 2000–2001 yhdessä Rovaniemen kaupungin kanssa Street Doctor -menetelmän, jonka avulla voidaan analysoida katuverkon rakenteellista ja toiminnallista kuntoa. Analyysitekniikalla saatiin tarkka kuva lähtötilanteesta. Tilaaajan kanssa jatketaan yhteistyötä ja joka toinen vuosi suoritetaan pää- ja kokoojaverkon osalta uraisuus- ja epätasaisuusmittaukset. Mittaukset on toistettu vuosina 2002, 2004, 2006, 2008, 2010 ja 2012. Vuonna 2006 tilaaaja halusi laajentaa mitattavien katujen määrää siten, että mukaan tutkimuksiin otettiin keskustan alueiden lisäksi myös Saarenkylä.

Mittaustulosten perusteella on ollut mahdollista laskea katujen tasaisuuden ja uraisuuden kehitystrendejä. Eli käytännössä on selvitetty, kuinka nopeasti päällysteet ovat urautuneet ja millainen uudelleenpäällystystarve kaduilla lähitulevaisuudessa on. Mittausten jälkeen tehdyissä tulosraporteissa esitellään mittausten tulokset ja vertaillaan uusia mittaustuloksia aiemmin mitattujen tulosten kanssa.

7.3 Käytetyt mittausmenetelmät

Tasaisuus- ja uramittauksissa mittauslaitteena on joka kerta käytetty RoadMaster -kalustoa. Kuvassa 23 on esitetty seurantamittauksissa käytetty RoadMaster -kalusto. Kuvassa olevan auton etuosaan on kiinnitetty palkki, jossa on 11 ultraäänianturia. Antureiden avulla mitataan urasyvyys. Auton oikeaan takapyörään on kiinnitetty kiihtyvyyssanturi, jolla saadaan mitattua tasaisuusarvoja.

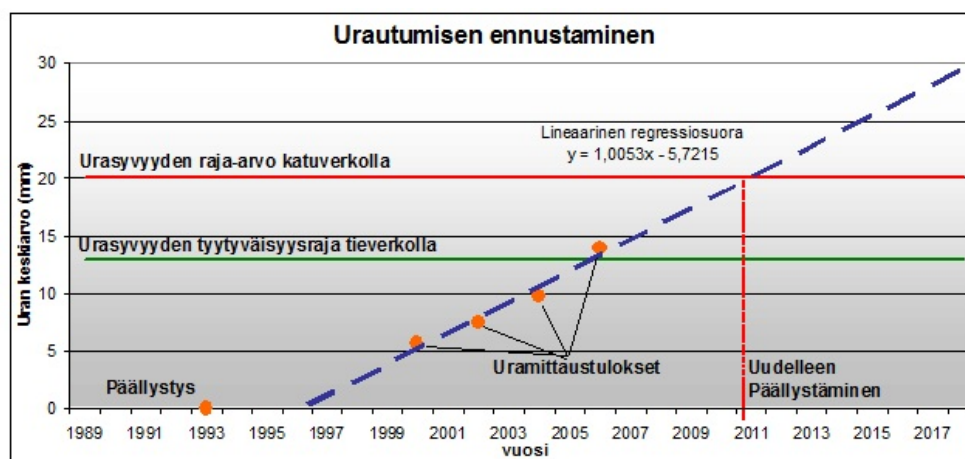


Kuva 23 RoadMaster mittauskalusto (Roadscanners Oy 2011)

Vuoden 2010 mittausten tulokset analysoitiin ja kuntotilan kehittymistä mallinnettiin uutta Road Doctor Designer -ohjelmistoa käyttäen. Ohjelmiston avulla voidaan analysoida tasaisuusarvojen (IRI) ja uraisuusarvojen (URA) kehittymisnopeutta. Lisäksi tulosten perusteella voidaan laskea ennalta määriteltujen raja-arvojen pohjalta jäljellä oleva katurakenteen elinikä.

Kestoikäennusteiden laskentaan lähtötietoina on käytetty kadun viimeistä päällystysvuotta sekä eri vuosilta kerättyjä uramittauksia. Laskennassa Rovaniemen projektissa on käytetty 20 m:n välimatkaa ja urasyvyyden raja-arvona on 20 mm. Kun lähtöarvot syötetään Road Doctor Designeriin, laskee ohjelmisto tiejaksolle urautumismallin siten, että se sovittaa lineaarisen regressiosuoran mittausarvojen kautta kuvaajaan. Sovitetun suoran pohjalta lasketaan keskimääräinen urautumisen kasvunopeus sekä määritetään päällysteen uusimisvuosi.

Kuvassa 24 on malli elinikäanalyysistä uramuuttujan osalta. Uramittaustulokset on piirretty kuvaajaan pisteinä, ja sinisellä katkoviivalla on esitetty lineaarinen regressiosuora. Urasyvyyden raja-arvo 20 mm on kuvassa punaisella piirretty viiva. Raja-arvon viiva leikkaa lasketun suoran vuoden 2011 kohdalla, eli kuvan kadun osalta uudelleenpäällystystarve on ajankohtainen silloin.



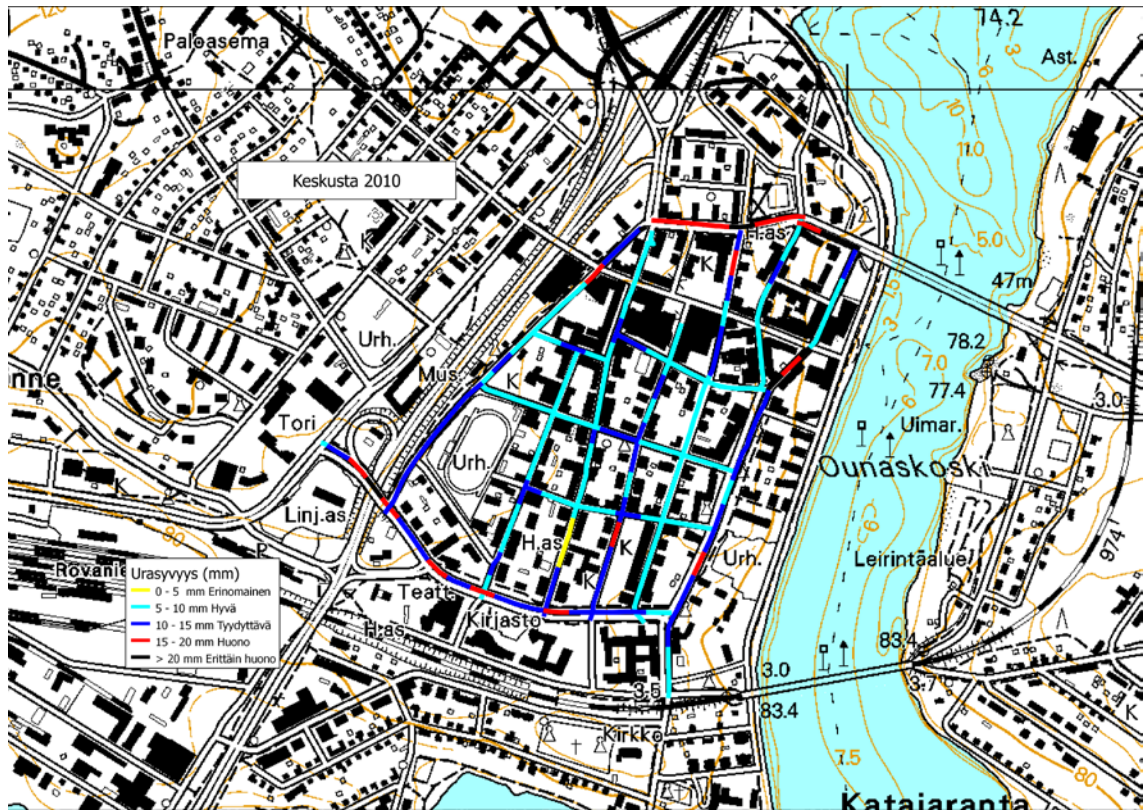
Kuva 24 Katupäällysteen elinikäanalyysi uramittausten perusteella (Roadscanners Oy 2011)

7.4 Mittauksista saatujen tulosten purku

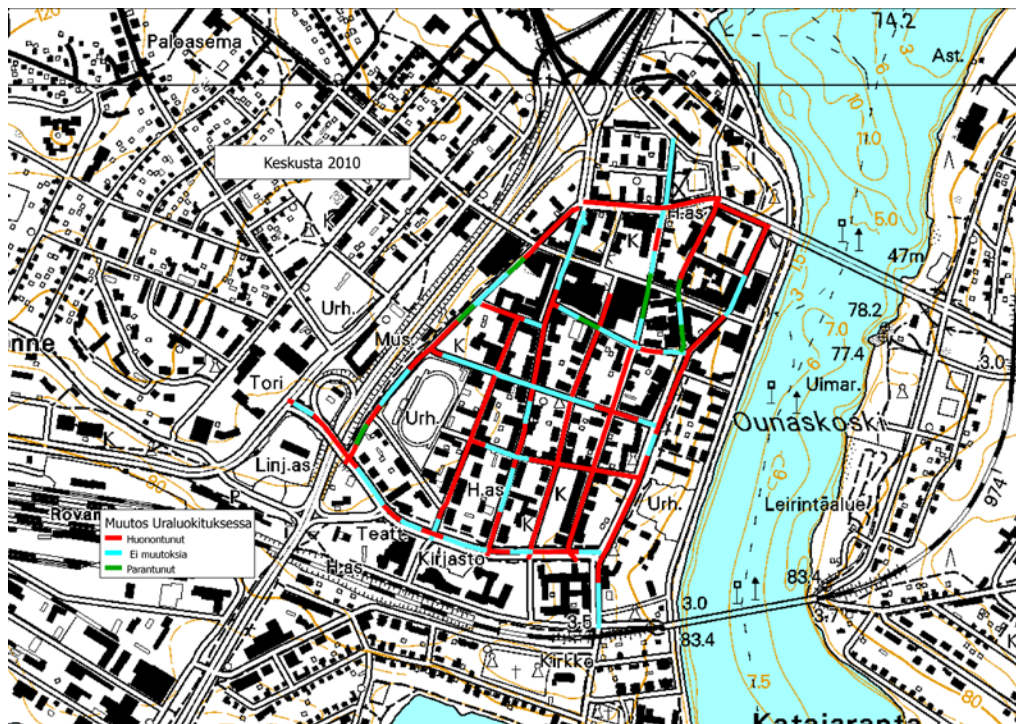
Toiminnallisen kunnan osalta mittauksista tehdään joka kerta raportti, jossa esitetään uusimmat mittaustulokset. Viimeisimpiä mittauksia verrataan aiempiin tuloksiin, ja muutokset esitetään karttakuvien ja tekstiselostuksen avulla. Rovaniemen mittaukset sijoittuvat laajalle alueelle, joten mittaukset on jaoteltu kaupunginosittain tarkasteltaviin kokonaisuuksiin. Kaikista kokonaisuuksista tehdään tuloskuvat, joissa esitetään viimeisimmän mittauksen tuloksina saadut urasyvyudet ja epätasaisuus. Tuloksia verrataan aiempiin mittauksiin ja raportissa esitetään kuvana urasyvyyksien muutokset verrattuna edellisiin mittauksiin sekä urautumisnopeuden mahdollinen muutos. Epätasaisuudesta esitetään oma muutoskuva aiempiin mittauksiin verrattuna sekä lisäksi tasaisuuden osalta tehdään kestoennustekuva.

Rovaniemen kaupungin keskusta on ollut yksi mitattava kokonaisuus. Alla olevassa kuvassa 25 on esitetty vuonna 2010 mitatut urasyvyudet. Kuvassa näkyy vasemmalla selitteet eri värikoodeille. Keskimääräisesti kuvasta nähdään, että alueen kadut kuuluvat hyvään tai tyydyttävään kategoriaan urasyvyyden osalta. Kuvassa 26 on esitetty

urasyvyyden muutokset, kun on verrattu vuoden 2010 ja 2008 mittaustuloksia. Kuvasta nähdään, että urasyvyydet ovat muuttuneet monin paikoin huonompaan suuntaan. Keskustan alueella on vilkas liikenne, ja se näkyy urautumisessa. Linja-autoliikenteen määrä tietyillä katuosuuksilla on suurta, ja se selittää tiettyjen katuosuuksien deformatiivisuuden. Yleisesti kuvista voidaan huomioda, että monin paikoin katujen risteyskohdissa urasyvyydet ovat suuria ja urasyvyydet kasvavat aiempiin mittauksiin verrattaessa.

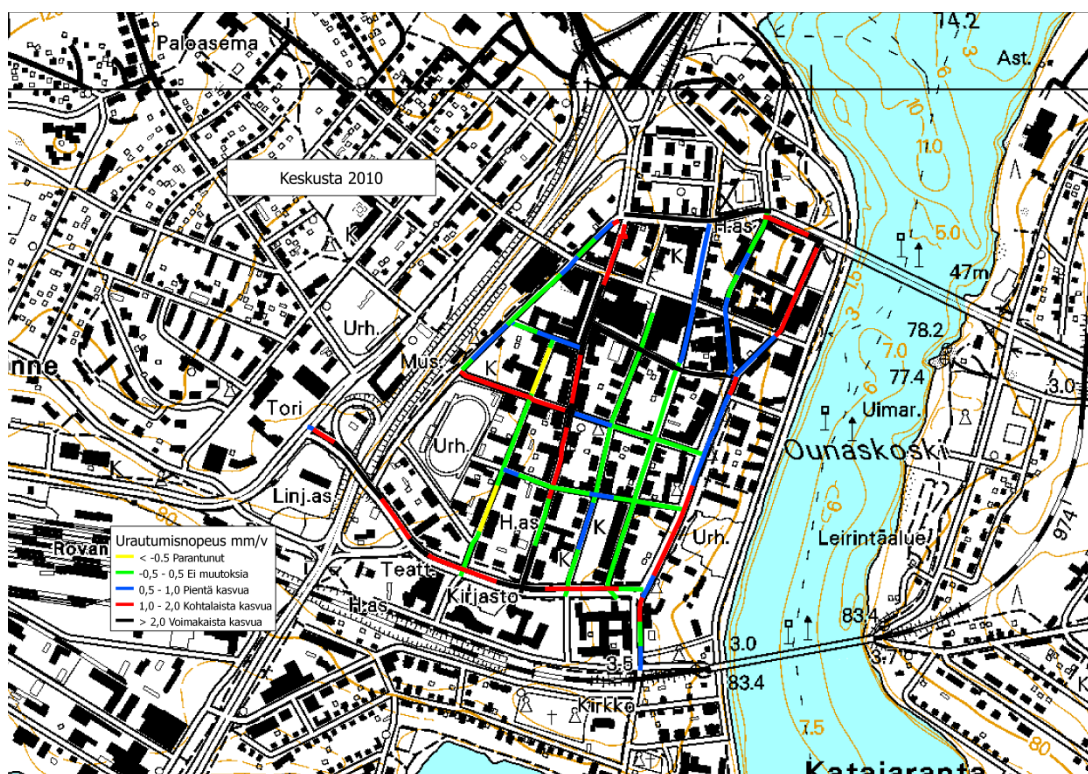


Kuva 25 Urasyvyydet keskustan alueella vuonna 2010 (Roadscanners Oy 2011)



Kuva 26 Urasvyyden muutokset verrattaessa vuoteen 2008 (Roadscanners Oy 2011)

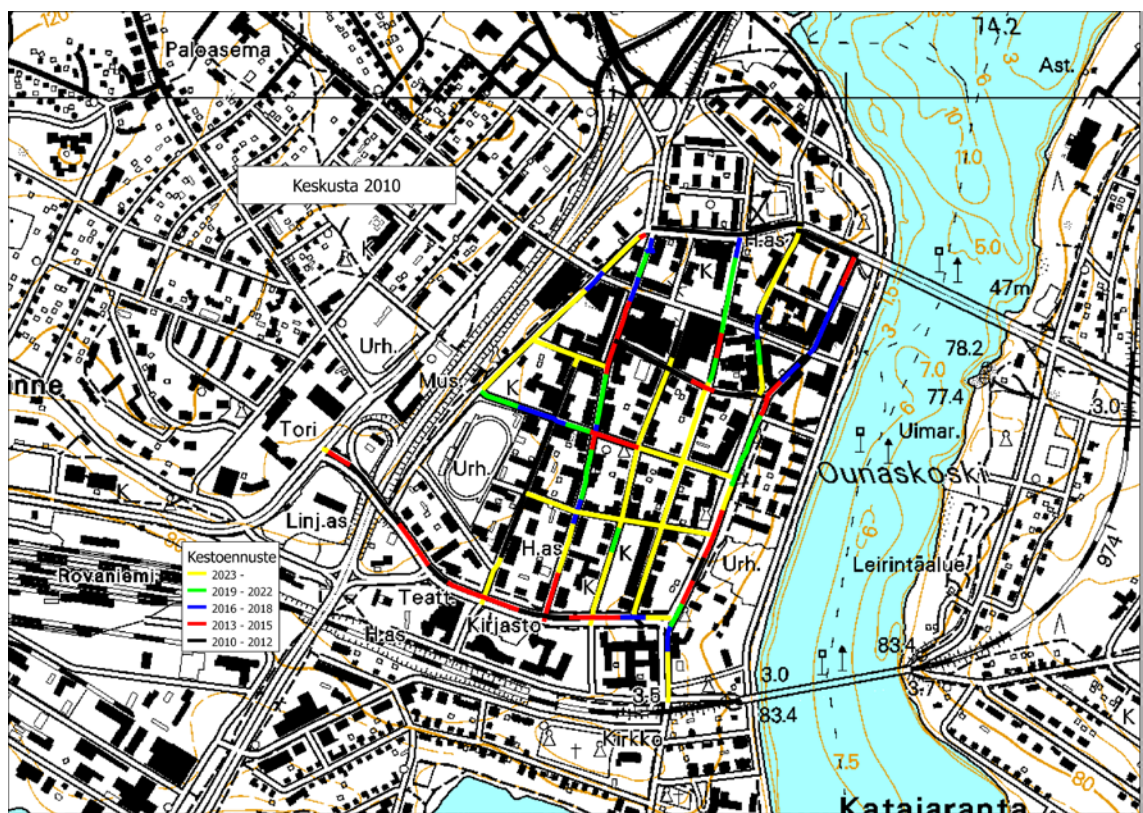
Urautumisnopeudesta on esitetty tuloksissa oma kuva. Urautumisnopeutta tutkitaan millimetreissä vuotta kohti. Kuvan 27 perusteella nähdään, että urautumisnopeus on pysynyt keskustan sisäalueella pääosin samanlaisena, mutta keskustaa reunustavien katujen urautumisnopeus on kasvanut kohtalaisesti tai voimakkaasti.



Kuva 27 Urautumisnopeus vuonna 2010 esimerkkikuva (Roadscanners Oy 2011)

Tasaisuusmittausten osalta esitetään samanlaiset kuvat kuin urautumisesta on esitetty. Eli kuvien 25 ja 26 mukaisesti esitetään tasaisuusmittausten tulokset ja muutokset edellisiin mittauksiin verrattuna. Rovaniemen kaupungin projektissa tasaisuusmittausten osalta tuloksissa täytyy huomioida, että mittaukset tehdään vilkasliikenteisellä alueella, jossa nopeusrajoitus on alhainen. Lisäksi mitattavat kadut ovat lyhyitä. IRI-mittauksista saatavat tulokset voivat näistä syistä olla virheellisiä. Tulosten teossa tulee olla huolellinen ja tulosten esittämisessä tulee huomioida mittausten aikana tehdyt visuaaliset havainnot. Keskusta-alueen havaintoja ovat esimerkiksi korotettujen suojateiden runsas määrä sekä Rovakadun mukulakivipäällyste. Havaintojen pohjalta voidaan selittää epätasaisuutta kyseisissä kohdissa.

Tuloksista laaditaan kestoennuste, jonka perusteella voidaan arvioida tulevaisuuden uudelleenpäällystyksen ja muiden korjaustoimenpiteiden ajankohtaa. Kuvassa 28 on esitetty vuoden 2010 mittausten pohjalta laadittu urakasvun perusteella tehty kestoennuste. Mustalla kuvatut kadut keskusta-alueella ovat välittömän uudelleenpäällystyksen tarpeessa.



Kuva 28 Kestoennuste urautumismittausten pohjalta (Roadscanners Oy 2011)

8 TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä hyödynnetään jatkuvasti enenevässä määrin väylien kunnossapidossa ja laadunvalvonnassa. Tekniikan kehittyessä myös mittauksissa käytettävät laitteet ja menetelmät kehittyvät. Jo nyt käynnissä oleva trendi tulee siirtämään mittaukset tulevaisuudessa 3D-maailmaan.

Nykyisellään yleisimmin käytössä olevalla 2D-maatutkaluotausmenetelmällä saadaan mitattua korkeintaan kahta linjaa kerralla. Mittauksia tehdään yksi per ajokaista eli koko ajoradasta yhteensä kaksi linjaa, ellei tilaaja erikseen muuta pyydä. Yhden linjan mittauksesta saadaan tietoa vain linjan kohdalta, jolloin linjan ulkopuolelle jäävällä kaatuosuudella voi olla erilaisia pitkittäissuuntaisia ja pistemäisiä ongelmakohtia. Tuloksissa ongelmakohdat eivät näy, ellei niihin ole erikseen kiinnitetty huomiota videoinnin ja mittauksessa tehtävien lisähuomautusten tarkasteluissa. Maatutkaus yhdeltä linjalta ajokaistaa kohden antaa yleisesti ottaen kuitenkin sen verran luotettavaa perustietoa ja menetelmä on kustannuksiltaan edullinen, että useimmiten tilaajat tyytyvät tilaamaan vain yhden linjan ajokaistaa kohden.

Perinteisen 2D-maatutkausmenetelmän rinnalle on kehitetty moniantennitekniikka eli 3D-maatutkaluotausmenetelmä, joka mahdollistaa jopa 31 vierekkäisen linjan mittaamisen samanaikaisesti. 3D-menetelmän avulla saadaan mittausaineistoa koko mittauskaistan leveydeltä ja siten kohteesta voidaan tehdä 3-ulotteisia malleja. Uuden menetelmän avulla saadaan poistettua 2D-mittauksen heikkous eli pistemäisten ja pitkittäissuuntaisten ongelmakohtien näkyminen tulosraporteissa. Maatutkamittausmenetelmää käytetään tulevaisuudessa esimerkiksi maanalaisten rakenteiden selvityksessä. 3D-mittauksia voidaan hyödyntää erityisesti kohteissa, joissa tarvitaan tarkkaa tietoa rakenteesta myös poikkisuunnassa.

Maatutkamittauksissa laiteviat ovat yleisiä mittausten viivästyminen tai epäonnistumisen syitä. Laitevikojen syntymistä voitaisiin ehkäistä huoltamalla laitteet säännöllisesti käytön jälkeen sekä säilyttämällä niitä asianmukaisesti. Usein mittauslaitteisto asennetaan ajoneuvon mittausten alussa ja mittauksen päätyttyä laitteet irrotetaan ja viedään säilytykseen. Laitteiston kunto erityisesti johtojen osalta voisi säilyä parempana pidempään, jos mittauskalusto olisi jatkuvasti asennettuna ajoneuvon. Samalla voitaisiin ke-

hittää laitteiden säänsuojausta sekä laitteissa tarvittavien johtojen sijoittelua siten, että ne kuluisivat vähemmän. Koska maatutkauksen käyttö rajoittuu sulaan ja kuivaan aikaan, on mittauksen suorittamisaika rajallista. Mittauksia saataisiin tehtyä enemmän ja tehokkaammin, jos laitevikoja saataisiin vähennettyä.

Mittauksen aikana käytetään tällä hetkellä kahta kannettavaa tietokonetta, jotka tallentavat mitattavan datan. Tietokoneiden tehot ovat kehittyneet viime vuosina huomattavasti ja kehitystyötä voitaisiin ohjelmistopuolella jatkaa siten, että yhdeltä kannettavalta tietokoneelta voitaisiin hallita sekä tutkalaitteita että GPS- ja videokuvauslaitteita samanaikaisesti. Yhden koneen käytöllä poistettaisiin mittauksen aikainen riski, jossa toinen mittausväline käynnistetään liian myöhään tai sammutetaan liian aikaisin. Jos ohjelmistot saataisiin synkronoitua keskenään, voitaisiin yhdellä napin painalluksella saada kaikki laitteet käynnistymään ja sammumaan kerralla. Mitattavien kohteiden tallennus koko mittausväliltä paranee myös silloin, jos nykyisin käytössä olevat ohjelmistot käynnistetään jo ennen aloituspistettä ja sammutetaan vasta loppupisteen jälkeen. Mittausdatan käsittelyvaiheessa voidaan poistaa alusta ja lopusta mittauskohteeseen kuulumaton tieto.

Laserkeilaus on ainetta rikkomaton mittausmenetelmä, joka on suuressa murrosvaiheessa tällä hetkellä. Tulevaisuudessa menetelmää hyödynnetään esimerkiksi ympäristön tarkoissa mittauksissa. Nykyisin laserkeilausta tehdään vielä usein paikaltaan mittaavilla maalaserkeilaimilla. Kynnys siirtyä käyttämään kalliimpaa mutta tarkempaa mobiililaserkeilainlaitteistoa on vielä suuri, koska mittaustulosten tarkkuuden erot ovat vielä niin pieniä. Mobiililaserkeilaimen käyttökohteita tutkitaan koko ajan, sekä sen tuomat uudet mahdollisuudet katumittauksissa kasvavat koko ajan. Monille tilaajille on vielä helpompaa ladata Maanmittauslaitoksen tarjoamaa ilmaista laserkeilausaineistoa, jolla saadaan pääpiirteittäin tieto tarvittavasta kohteesta, kuin lähteä maksamaan tarkemmasta laserkeilauksesta. Ilmasta kuvattu laserkeilausaineisto antaa perustietoa ja suurimmat virhepisteet on poistettu, mutta esimerkiksi palvelurajapinnoilta ei aineistoa ilmaiseksi saa. Asiakkaiden ja laserkeilauspalvelua tuottavien yritysten tulisi keskustella enemmän, jotta oikeanlaista ja tarpeeksi tarkkaa tietoa saataisiin tuotettua.

Laserkeilausmittauksella saatuja pistepilviä hyödynnetään sekä uusien väylärakenteiden suunnittelussa että vanhojen rakenteiden kunnon seurannassa. Pistepilven pohjalta tehtävä 3D-mallinnus mahdollistaa kohteiden havainnollisemman esittämisen. Mobiili-

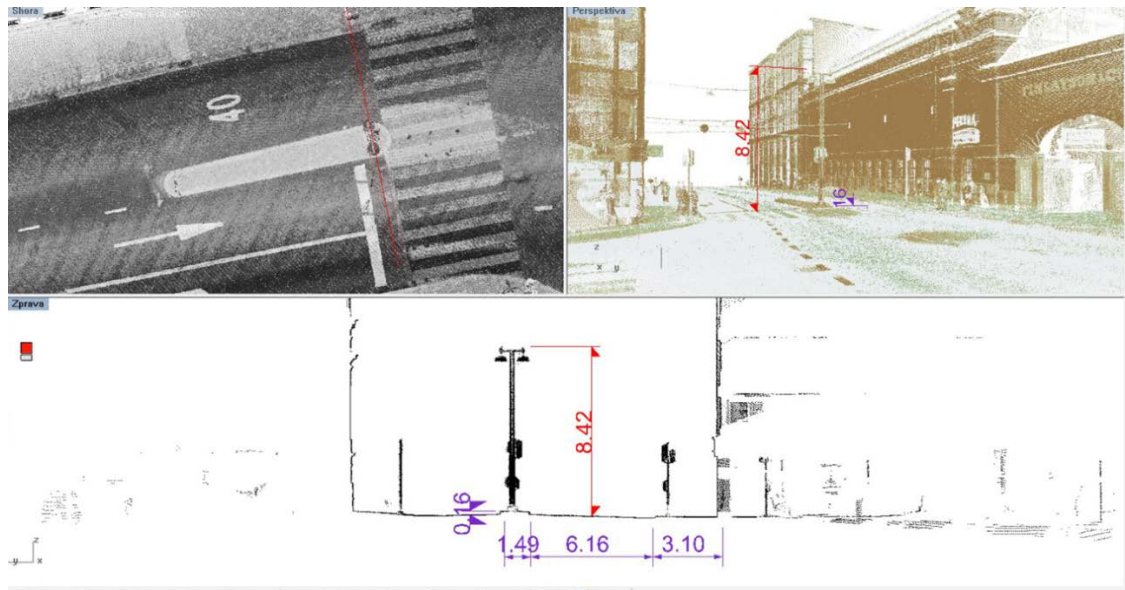
laserkeilainten tarkkojen pistepilvien avulla voidaan mallintaa katunäkymä hyvinkin tarkasti, kun virheelliset pisteet poistetaan. Esimerkkinä pistepilven pohjalta tehty 3D-katunäkymä on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29 Katunäkymä mallinnettuna laserkeilauksesta saadun pistepilvitiedon avulla (Roadscanners Oy 2012)

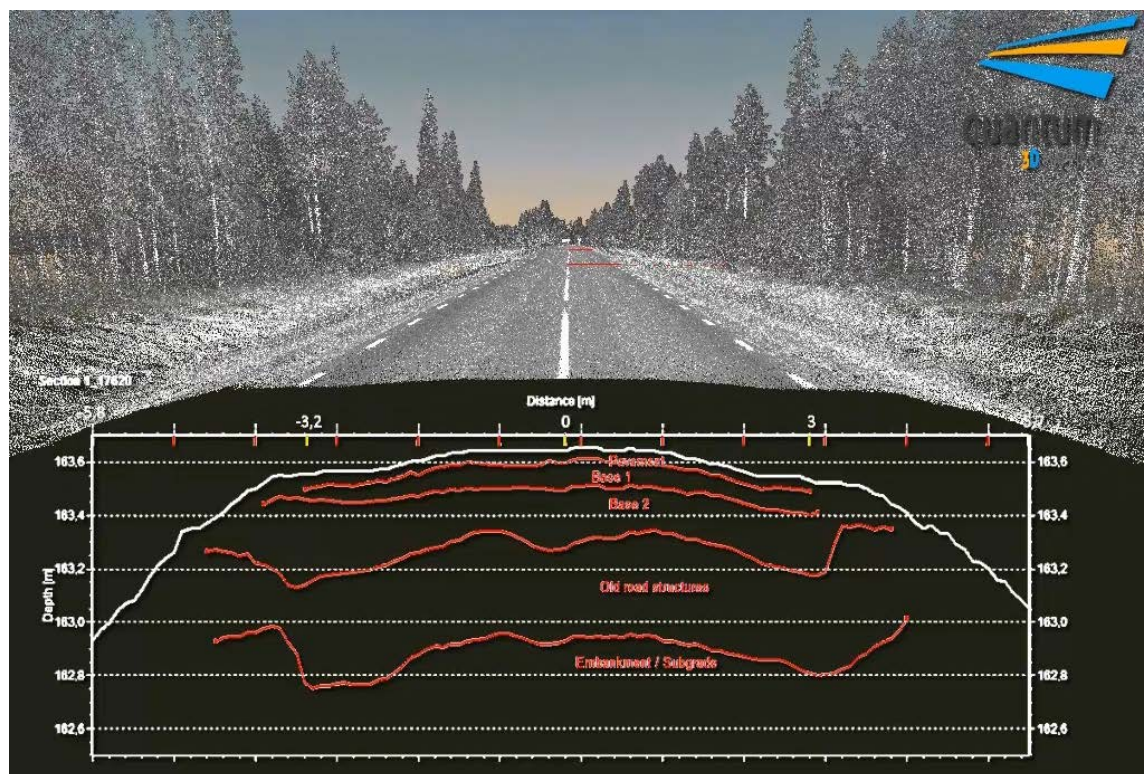
Kohteiden suunnittelussa voidaan 3D-malliin istuttaa esimerkiksi uusien suunnitelmien mittoja, jolloin kuvasta nähdään tarkemmin, miten uudet suunnitelmat sopivat olemassa olevaan rakenteeseen. Kuvassa 30 on havainnollistettu, millaisia kuvia voidaan menetelmää hyväksikäyttäen tuottaa. Kuvien tuottamisen ongelmana tällä hetkellä on useiden koordinaattijärjestelmien käyttö. Jotta suunnitelmat saadaan sovitettua pistepilviaineistoon, tulee aineistojen olla samassa koordinaattijärjestelmässä. Ongelmaa ei kuitenkaan synny, jos tehdään vasta havainnekuvia, jolloin kuvien ei välttämättä tarvitse olla mittakaavassa. Suositeltavaa kuitenkin on, että kaikki esitettävät kuvat ovat mittakaavassa,

jotta havainnekuvasta saadaan mahdollisimman realistinen kuva.



Kuva 30 3D-mallinnus, johon on yhdistetty suunniteltuja tulevien rakenteiden mittoja (Roadscanners Oy 2013)

Laserkeilauksella tehtävistä pistepilvimittauksista saadaan tulevaisuudessa laskettua urakarttoja, jotka voidaan esittää kuvissa. Myös erilaiset ainetta rikkomattomien mittausmenetelmien yhdistelmäkuvat tulevat yleistymään jatkossa. Esimerkiksi kuvan 31 tyyllisiä kuvia tullaan todennäköisesti käyttämään havainnekuvina.



Kuva 31 3D-malli ympäristöstä ja rakennekerrokset (Roadscanners Oy 2013)

Ainetta rikkomattomissa menetelmissä mittausten paikannus on tärkeä osa mittauksia. Nykyisin käytössä olevat menetelmät ovat suhteellisen tarkkoja, mutta jotta mittausmenetelmien kehittymisestä saataisiin kaikki hyöty irti, tulee paikannusmenetelmien tarkkuuden kehittyä entisestään. Esimerkiksi pudotuspainolaite- ja maatumkamittausten tulosten tarkastelussa täytyy kiinnittää erityistä huomiota siihen, että mittaukset suoritetaan samalta linjalta. Tarkemman paikannuksen avulla pystyttäisiin paremmin asettamaan linjat kohdakkain ja tulosten tarkkuus paranisi.

Yleisesti tulevaisuuden mittaukset tullaan suorittamaan uusilla, jatkuvasti kehittyvillä mittausmenetelmillä. Mittaukset tulevat tapahtumaan useammilla antureilla ja 3D-menetelmät tulevat olemaan entistä suuremmissä roolissa. Uudet menetelmät, kuten kehittyneet 3D-kiikkyvyysanturit tulevat yleistymään.

Viimeisten vuosikymmenten aikana on opittu ymmärtämään, että väylien kuntoa tulee ylläpitää ja tarkkailla. Jotta näin voidaan tehdä, tulee ymmärtää kunnan seurannan ja monitoroinnin tärkeys. Seuraamalla väylien rakenteellista ja toiminnallista kuntoa säännöllisesti, voidaan ennakoita ja reagoida nopeasti. Kustannuksiltaan kalliimmat mittaukset kuten 3D-maatutkaus verrattuna 2D-maatutkukseen antavat usein huomattavasti laajemmin tietoa ylläpidettävästä kohteesta. Mahdollisesti tarvittavat lisätutkimukset ja korjaustoimenpiteet voidaan kohdentaa ongelmakohtiin, jolloin kokonaiskustannuksissa saadaan säästettyä. Pitkällä aikavälillä ennakoinnin ja oikeanlaisen reagoinnin avulla voidaan väylien elinikää jatkaa useita vuosia eteenpäin ja samalla säästetään merkittävästi kustannuksissa.

LÄHTEET

Belt, J., Kolisoja, P., Alatyppö, V. & Valtonen, J. 2006. Tierakenteen rappeutuminen ja kunnan ennustaminen. Oulun yliopiston rakentamisteknologian tutkimusryhmän julkaisuja 2.

Bohn A. The history of Falling Weight Deflectometer (FWD).

Cronvall, T., Kråknäs, P. & Turkka, T. 2012. Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 41/2012. Helsinki: Liikennevirasto.

Dawson, A. & Kolisoja, P. 2006. Managing rutting in low volume roads. Executive summary. Roadex III project.

InfraRYL. 2010. Rakennustieto.

InfraRYL. 2012. Rakennustieto.

Joala, V. 2006. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Leica Nilomark Oy, Espoo.

Kasari A. 2012. Oppimateriaali. Päällystetekniikka. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere.

Katu 2002. 2003. Kadunrakennuksen tekniset ohjeet. Suomen kuntatekniikan yhdistys ry.

Kähkönen, A. 2005. Verkkotason taipumamittausten tarveselvitys. Helsinki: Tiehallinto.

Maijala, P. & Saarenketo, T. 2000. Johdanto maatutkamenetelmän historiaan, fysikaalisiin perusteisiin ja sovelluksiin. Maatutkarengas Ry:n 10-vuotisjuhlaseminaari. Kuopio: Maatutkarengas ry.

Matintupa, A. 2010. Raportti. Laserskannerin ja lämpökameran käyttö kelirikko- ja kuivatussuunnittelukohteilla. Testit Ranuan ja Sodankylän hoitourakka-alueilla. Tampere: Roadscanners Oy.

Matintupa, A. 2011a. Laatu- ja turvallisuussuunnitelma. Pirkanmaan ja Uudenmaan ELY-keskusten tierakenteen parantamiskohteiden suunnittelu. Pirkanmaa: ELY-keskus.

Matintupa, A. 2011b. Artikkelit. Laserskannerin ja lämpökameran käyttö kelirikko- ja kuivatussuunnittelukohteilla. Roadscanners Oy.

Matintupa, A. Rakennustekniikan DI. 2013. Haastattelu 16.1.2013. Haastattelija Lång, K. Tampere.

Matintupa, A. & Saarenketo, T. 2011. New survey techniques in drainage evaluation. Laser scanner and thermal camera. Roadex IV.

- Onninen, H. 2001. Palvelutasomittaus (PTM) tien rakenteen parantamisen suunnittelussa. Espoo: VTT-yhdyskuntatekniikka.
- PANK-4122, 2008. Asfalttipäällysteen tyhjättila, päällystetutkamenetelmä. PANK Ry/Laboratoriotoimikunta.
- ROADEX 2001-2011. eLearning-paketti. Luettu 17.2.2013.
<http://www.roadex.org/>
- Roadscanners Oy, 2008. Esite. Ohjelmistotuotteet.
- Roadscanners Oy, 2012. Laatukäsikirja. Rovaniemi.
- Roadscanners Oy, 2013. Road Doctor® CamLink. Luettu 17.2.2013.
<http://www.roadscanners.com/index.php/software-2/road-doctor-cam-link>
- Ropponen, S. & Pulkkinen, K. Koneäöllä paljon mahdollisuuksia teiden ylläpidossa ja hoidossa. Tie & Liikenne, lehtiarkisto 4/2009, 9-12.
- Ruotoistenmäki, A. 2005. Kuntotiedon käyttö tie- ja katuverkon ylläpidon päätöksenteossa. Tiehallinnon selvityksiä 7/2005. Helsinki: Tiehallinto.
- Saarenketo, T. 1999. Road analysis, an Advanced Integrated Survey Method for Road Condition Evaluation.
- Saarenketo, T. 2000. Maatutka tietutkimuksissa, historiaa ja nykypäivää. Maatutkarengas ry: n 10-vuotisjuhlaseminaari. Kuopio: Maatutkarengas ry.
- Saarenketo, T. 2006. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys. PhD thesis. University of Oulu.
- Saarenketo, T. Filosofian tohtori. 2008. Luento. MPR-5240 Tien rakenteen parantaminen ja kunnossapito. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.
- Saarenketo, T. 2009a. Lämpökameran käyttö kuivatustutkimuksissa. Kittilän testitutkimukset 2007. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 15/2009. Rovaniemi: Tiehallinto.
- Saarenketo, T. 2009b. Kuivatusanalyysit päällystetyillä ja sorateilla. Menetelmäkuvaus, Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 40/2009. Helsinki: Tiehallinto.
- Suominen, T. 2009. Laserkeilauksesta apua 3D –mallintamiseen. Tierakennusmestari, lehtiarkisto 04/2009, 44-47.
- Saarenketo, T. & Maijala, P. 2004. Rakenteen parantamissuunnittelua edeltävät maatutkatutkimukset ja tulosten esitystapa – menetelmäkuvaus. Helsinki: Tiehallinto.
- Spoof, H. & Petäjä, S. 2000. Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus). Espoo: VTT-yhdyskuntatekniikka.

Varin P, Rakennustekniikan DI. 2012. Haastattelu 11.1.2013. Haastattelija Lång, K. Tampere.

LIITTEET

Liite 1a. Katujen luokittelu liikenneteknisen merkityksen mukaan (InfraRYL 2010.)

Katuluokka	Kuvaus	Liikennemäärä, ajon./vrk
1	Erittäin raskaasti liikennöity moottori- tai pääkatu (ajokaistoja 2 + 2)	> 30 000
2	Raskaasti liikennöity moottori- tai pääkatu (ajokaistoja 2 + 2)	10...30 000
3	Pääkatu, kokoojakatu tai vilkasliikenteinen kerrostaloalueen asuntokatu (ajokaistoja 1 + 1)	2 500...10 000
4	Asuntokatu tai pientaloalueen kokoojakatu, raskaiden ajoneuvojen pysäköintialueet	500...2 500
5	Pientaloalueen asuntokatu, huoltoliikenteen väylät, henkilöautojen pysäköintialueet	10...500
6	Jalkakäytävät, pyörätiet, puistotiet; ei ajoneuvoliikennettä	

Liite 1b. Pohjamaan kantavuusluokitus (InfraRYL 2010.)

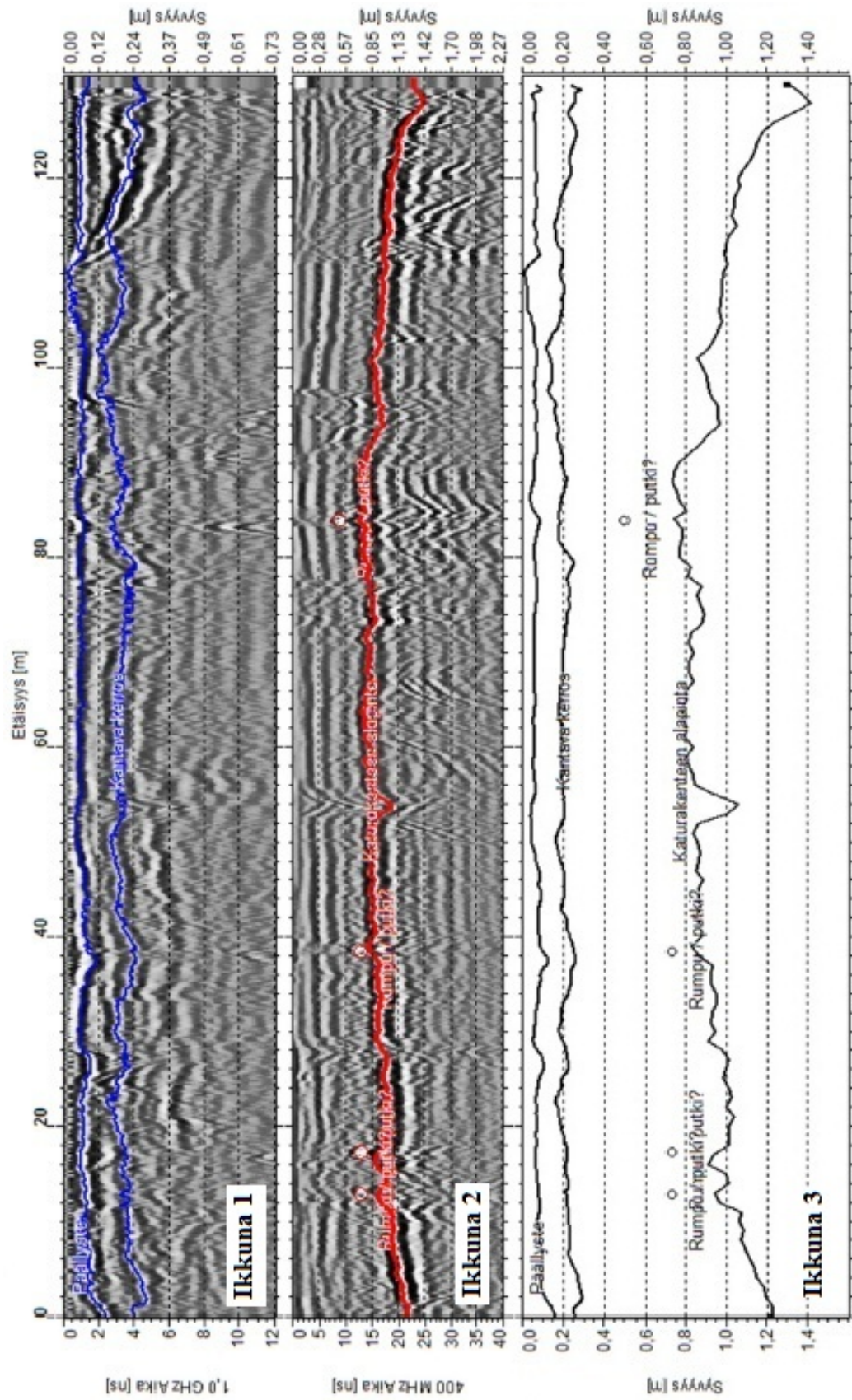
Maalaji	Tarkennus	Lyhennys	Luokka
Kallio	kallio louhe ¹⁾ murske ¹⁾	Ka Lo M	A
Kivet ¹⁾		Ki	A
Sora		Sr	B
Soramoreeni	routimaton routiva ²⁾	rton SrMr SrMr	C E (F) ⁴⁾
Hiekka	routimaton karkea routimaton keskik. routimaton hieno routiva keskik. routiva hieno	rton kaHk rton keH krton hHk keHkh Hk	C D D (E) ⁴⁾ E E (F) ⁴⁾
Hiekkamoreeni	routimaton routiva ²⁾	rton HkMr HkMr	D (E) ⁴⁾ E (F) ⁴⁾
Siitti Siittimoreeni		Si SiMr	F (G ⁴⁾ , E ⁵⁾
Savi	kuivakuori (h ≥ 1 m) sitkeä (Su ≥ 25 kN/m ²) ³⁾ pehmeä (Su < 25 kN/m ²) ³⁾	kuivak. Sa Sa Sa	E F (E) ⁵⁾ G
Lieju Turve		Lj Tv	G
Kantavuus	A = 300 MN/m ² B = 200 MN/m ² (150...280) C = 100 MN/m ² (70...150) D = 50 MN/m ² (35...70) E = 20 MN/m ² (15...35) F = 10 MN/m ² (5...15) G = 5 MN/m ²		

Alusrakenteen kantavuus arvioidaan normaalisti pohjamaan maalajiin perusteella. Jos pengertäytteen paksuus on vähintään 1 m, käytetään pengertäytteen kantavuusluokkaa. Jos pengertäytteen paksuus on alle 1 m, alusrakenteen kantavuus voidaan laskea, kun E-moduuliksi valitaan pengertäytteen kantavuusluokkaa vastaava kantavuus. Myös muut alusrakenteen pinnassa olevat varsinaista pohjamaata paremmin kantavat maakerrokset rinnastetaan tässä suhteessa pengertäyteeseen.

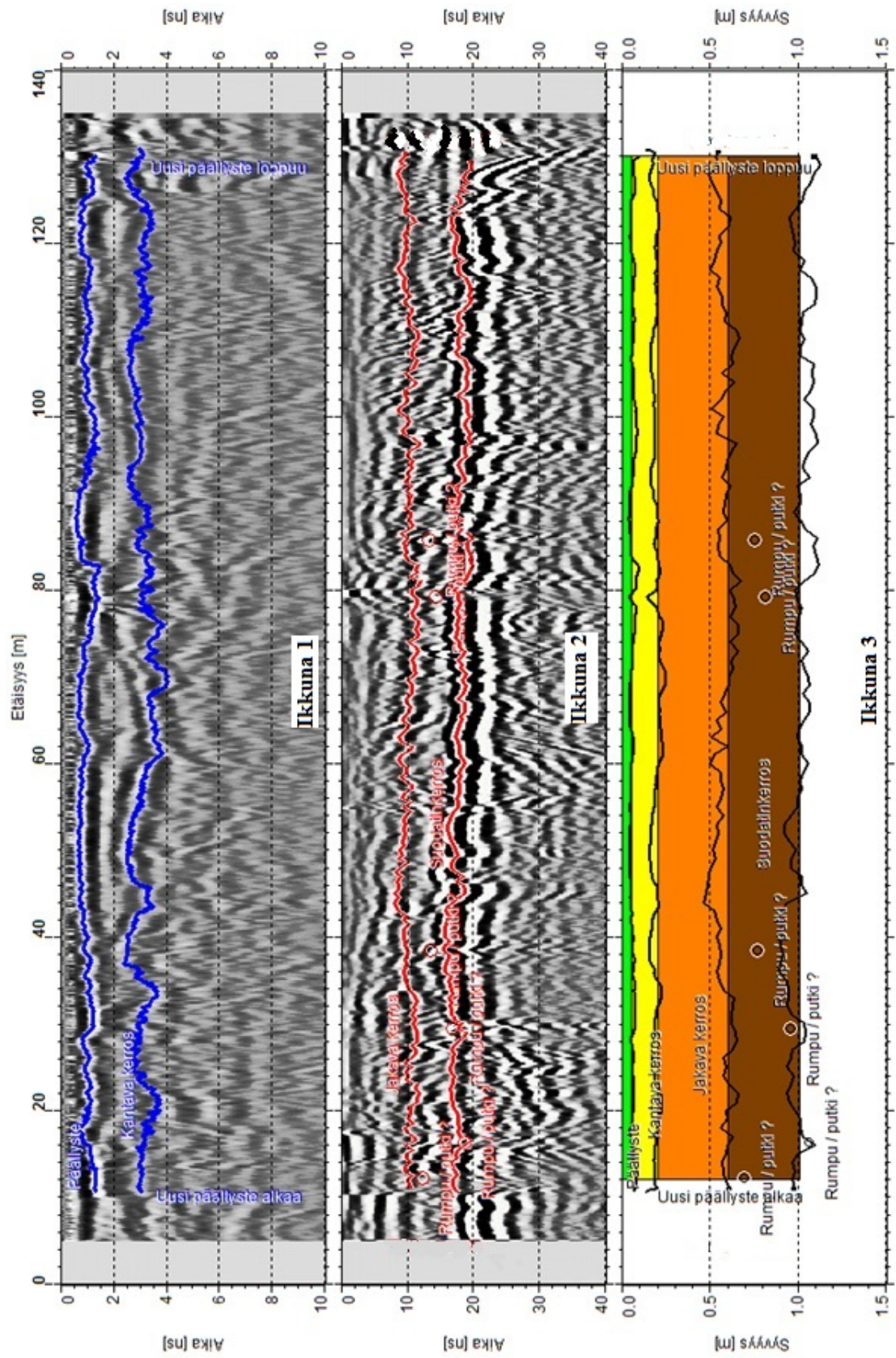
Huomautukset

- ¹⁾ Routiva murske sekä routivaa maata sisältävä louhe ja kivet rinnastetaan vastaavaan routivaan maalajiin.
- ²⁾ Kantavuudeksi voidaan valita 35 MN/m², jos kyseessä on kuiva penger tai jos hienoainespitoisuus on enintään 20 % ja paikka ei ole märkä (ks. huomautus 4).
- ³⁾ Siipikairauksella todettu suljettu leikkauslujuus.
- ⁴⁾ Suluissa olevaa kantavuusluokkaa käytetään, kun maa-aines on märkää lopullisessa alusrakenteessa eli pohjaveden etäisyys alusrakenteen pinnasta on alle 1 m tai paikkaan kerääntyy pintavesiä.
- ⁵⁾ Penkereessä kuivana.

Liite 2. Tampereen kaupungin projektin ensimmäisen mittauksen tulostulokset.



Liite 3. Tampereen kaupungin projektin laadunvarmistusmittausten tulostäky.ä.



Liite 4. Lempään projektin tulostusnäky.

