

Pertti Virtala  
Pauli Alanaatu

## SMA-päällysteen lajittumavirheiden mittaaminen

Purkauma ja bitumin pintaan nousu





Pertti Virtala, Pauli Alanaatu

# SMA-päällysteen lajittumavirheiden mittaaminen

Purkauma ja bitumin pintaan nousu

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2017

Liikennevirasto  
Helsinki 2017

*Kannen kuvat: Pauli Alanaatu, Destia Oy*

Verkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-349-1

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 029 534 3000

**Pertti Virtala ja Pauli Alanaatu: SMA-päällysteen lajittumavirheiden mittaaminen.** Liikennevirasto, kunnossapito-osasto. Helsinki 2017. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2017. 56 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-349-1.

**Avainsanat:** päällysteet, tiet, virheet, lajittumat

## Tiivistelmä

Uusilla päällysteillä havaitaan päällysteen lajittumisesta aiheutuvia pinnan virheitä, joita kutsutaan bitumin pintaan nousuksi ja purkaumiin johtaviksi rakeisuuslajittumiksi. Kohdat, joissa bitumia on noussut pintaan, ovat tyhjätilaltaan pieniä, sideainepitoisuudeltaan suuria ja pintakarkeudeltaan pieniä. Tällaiset kohdat ovat sileitä ja joissain keliolosuhteissa myös liukkaita. Vastaavasti sellaiset kohdat, joissa tyhjätila on suuri ja sideainepitoisuus pieni, ovat usein karkeita ja niissä on ikään kuin puuttuvia kivirakeita.

Molempia ilmiöitä on mahdollista mitata palvelutason mittauslaitteella käyttämällä tiheällä mittausvälillä saatavaa karkeusinformaatiota. Standardissa (EN 13473) määritettyä makrokarkeustunnuslukua on useissa tutkimuksissa yritetty käyttää päällysteen lajittumavirheiden mittaamiseen. Tässä työssä tutkittiin päällysteen lajittumiin liittyvien laboratoriotutkimusten tulosten yhteyttä toisaalta pinnan mitattuun karkeuteen, ja toisaalta maastossa havaittuihin lajittumiin ja näiden kautta haettiin mittausmenetelmää päällysteen lajittumavirheiden mittaamiseen. Kirjallisuus selvityksen avulla haettiin maailmalla tutkittuja tai käytössä olevia mittausmenetelmiä. Helpon toteutettavaksi todettiin pistelasertekniikalla tuotettava päällysteen pinnan makrokarkeus, MPD.

Bitumin pintaan nousun ja purkaumiin mittaustuloksia verrattiin maastossa havaittuihin tosimittoihin. Bitumin pintaan nousun tosimittoina oli 35 kpl 3x3 m<sup>2</sup> suuruisia alueita, joiden tosimitto määritettiin silmämääräisesti päällysteestä otetuista valokuvista. Kutakin mittausmenetelmää tai tunnuslukua verrattiin tosimittoihin, ja mittausmenetelmän käyttökelpoisuutta arvioitiin saatujen tulosten perusteella. Vertailussa oli kaksi erilaista mittausmenetelmää (A ja B) sekä neljä niiden avulla tuotettua tunnuslukua (A, B, C ja D). Menetelmä A perustui PTM:n makrolaserhavaintoihin 1x1 m<sup>2</sup> suuruisina pinta-aloina. Menetelmä B perustui PTM:n kaikkien pintaprofiilia mittaavien antureiden makrokarkeusarvoihin 0,1x0,2 m<sup>2</sup> suuruisina pinta-aloina. Tunnusluvut B-D laskettiin mittausmenetelmän B makrokarkeuksien keskiarvoista ja hajonnoista painottamalla niitä erisuuruusin painokertoimin. Bitumin pintaan nousua kuvasi kunkin mittausanturin vaikutusalueen muodostama pinta-ala silloin kun makrokarkeuden arvo alitti kalibroinnissa määritetyn raja-arvon. Parhaita tunnuslukuja bitumin pintaan nousun mittaamiseen olivat mittausmenetelmällä B tuotetut tunnusluvut B ja D, joiden tasoero tosimittoihin nähden oli lähes nolla ja korrelaatio 98 %. Tunnuslukujen toistettavuutta tutkittiin 17 km pituisen testimittauksen perusteella mittaamalla kohteet kahteen kertaan. Tunnusluvun B toistomittauksen korrelaatiot olivat välillä 92 %-99 %.

Päällysteen purkautumia sisältäviä tosimitkohteita oli 17 kpl niin ikään 3x3m<sup>2</sup> suuruisina pinta-aloina. Mittausmenetelmiä ja tutkittuja tunnuslukuja oli kaksi, A ja B. Mittausmenetelmät olivat samat kuin edellä bitumin pintaan nousun suhteen, mutta purkautunut pinta-ala laskettiin kriittisen raja-arvon ylittävien anturihavaintojen avulla. Raja-arvot kalibroitiin kummallekin mittausmenetelmälle erikseen minimoimalla niiden eroa tosimittaan. Tosimittavertailun perusteella tunnusluku B oli huomattavasti parempi kuin tunnusluku A. Tunnusluvun B keskimääräinen tasoero tosimittaan oli 0,1m<sup>2</sup> ja niiden välinen korrelaatio oli 93%. Tunnusluvun B mittausmenetelmän resoluutio oli kolmen mittauslinjan takia liian huono. Toistettavuutta tutkittiin 17 km pituisen testimittauksen perusteella mittaamalla kohteet 2 kertaa.

Sekä bitumin pintaan nousulle että purkaumalle löydettiin tarkka ja toistettava mittausmenetelmä.

Tutkimuksen perusteella suositellaan otettavaksi jatkokehitettäväksi ja käyttöön-otettavaksi pistelasertekniikkaan perustuva mittausmenetelmä. Jatkotutkimusta tarvitaan erityisesti siihen, miten tunnusluvun laskemisessa käytettävät raja-arvot riippuvat päällystetyypistä.

**Pertti Virtala och Pauli Alanaatu: Mätning av segregering av ny beläggning.** Trafikverket, drift och underhåll. Helsingfors 2017. Trafikverkets undersökningar och utredningar 1/2017. 56 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-349-1.

## Sammanfattning

Two huvud fenomenas av segregering av ny beläggning är blödning och upprivning. Blödning inträffar när ytan har för mycket bitumen, är hålrumsvolymen för låg och mängden bindemedel är hög eller konsistens av beläggningen är låg. Dessa ytor är släta och ibland kan vara hala. Upprivning sker när tomrumförhållandet är högt och mängden bindemedel är låg. Dessa ytor är grova.

Båda fenomenen är möjliga att mäta med mätutrustning som bygger på point-laserteknik som producerar texturinformation. Rådata bör dock omfatta flera mätpunkter över ytan. Makrotextur (presenterade i standard EN 13473) används ofta för att mäta segregationen i beläggningen. I denna studie resultaten från laborietest av 12 prover jämfördes med strukturen på beläggningen och de iakttagelser som gjorts inom området.

Two olika tester användes vid kalibrering och godkända mätmetoder för blödning och upprivning av en beläggning. I det första testet var ett tröskelvärde kalibrerad till MPD att representera blödningen område på 35 observationer av 3x3 m vardera. Two mätmetoder testades. Metod A använde 3 makro textur sensorer av hög varvtalsvakten (Profilograph vara Greenwood Engineering Inc.) och metod B används 3 makro textur sensorer och 17 lågfrekventa sensorer (16 kHz). Data för lågfrekventa sensorer korrigerades dynamiskt med hjälp av data från högfrekventa lasrar 5 och 13 och de lågfrekventa lasrarna 18 och 19. Ett tröskelvärde för MPD kalibrerades genom att minimera skillnaden mellan det verkliga måttet på blödning, och den uppmätta blödande området. 35 observationer (3x3 m prover) med en 10cmx20cm upplösning användes. Fyra index formulerades. Index A representerade mätresultatet med metod A och index B, C och D representerade mätmetoden B. Index B var det genomsnittliga värdet av MPD, index C var standardavvikelsen för MPD och index D en viktad kombination av dessa. Kalibrerade tröskelvärden var 0,75 mm för index A, 0,66 mm för index B och 0,33 mm för index C. De bästa index för att representera mätning av blödningen var index B och D. Det systematiska skillnaden av index B och det verkliga måttet var 0 och korrelationen var 98%. Indexet B valdes för att användas senare. Det andra testet var en repeterbarhet test med 17 km av upprepad mätning. Korrelation mellan den första och andra mätningen av index B var mellan 92% och 99%.

Ett liknande test studie gjordes för mätning av upprivning område. Two mättnings metoder var A och B som presenterades ovan. Two index, A och B, beräknades. Ett tröskelvärde kalibrerades genom att minimera skillnaden mellan det uppmätta värdet och det sanna värdet för 17 prover av 3x3m område. De kalibrerade tröskelvärdena var 1,94 för index A och 1,75 för index B. Indexet B var närmare den verkliga måttet med systematisk skillnad på 0,1 m<sup>2</sup> och korrelation av 93%. Repeterbarheten av index B testades på ett liknande sätt än gjordes med blödningsindex. Korrelation mellan de första och andra körningar varierade från 94% till 100 %.

Enligt studien en rimlig bra mätmetod hittades för båda fenomenen (blödning området och upprivning område) av segregering av nya beläggningar. Tröskelvärdena kalibrerades bara till en beläggningstyp (Split Mastix Asphalt 16). Ytterligare mer studie rekommenderas att hitta korrekta värden för andra typer av beläggningar också.

**Pertti Virtala and Pauli Alanaatu: Measuring the segregation of new pavement.** Finnish Transport Agency, Maintenance Department. Helsinki 2017. Research reports of the Finnish Transport Agency 1/2017. 56 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-349-1.

## Summary

Two main phenomenas of segregation of new pavement are bleeding and ravelling. Bleeding occurs when the surface has too much bitumen, the void volume is too low and the amount of binder is high or texture of the pavement is low. These surfaces are smooth and sometimes they can be slippery. Ravelling occurs when the void ratio is high and the amount of binder is low. These surfaces are rough.

Both phenomena are possible to measure with measurement devices based on point-laser technology producing texture information. However the raw data should cover several measurement points over the surface. Macro texture (presented in the standard EN 13473) is often used to measure segregation in pavement. In this study results of laboratory tests of 12 samples were compared to the texture of pavement and to the observations made in the field.

Two different tests were used in calibrating and validating the measurement methods for bleeding and raveling of a pavement. In the first test a threshold value was calibrated to the MPD to represent the bleeding area of 35 sample observations of 3x3 m each. Two measurement methods were tested. Method A used 3 macro texture sensors of high speed monitor (Profilograph by Greenwood Engineering Inc.) and method B used 3 macro texture sensors and 17 low-frequency sensors (16 kHz). The data of low frequency sensors were corrected dynamically using the data from high frequency lasers 5 and 13 and the low frequency lasers 18 and 19. A threshold value for the MPD was calibrated by minimizing the difference between the true measure of bleeding area and the measured bleeding area. 35 observations (3x3 m samples) with a 10cmx20cm resolution were used. Four indexes were formulated. Index A represented the result of measurement method A and indexes B, C and D represented measurement method B. Index B was the average value of MPD, index C was the standard deviation of MPD and index D was a weighted combination of those. Calibrated threshold values were 0,75 mm for index A, 0,66 mm for index B and 0,33 mm for index C. The best indexes to represent the measurement of bleeding were indexes B and D. The systematic difference of index B and the true measure was 0 and the correlation was 98 %. Index B was selected to be used later. The second test was a repeatability test with 17 km of repeated measurement. Correlation between the first and second measurement of index B was between 92 % and 99 %.

A similar test study was made for the measurement of raveling area. Two measurement methods were A and B as was presented above. Two indexes, A and B, were calculated. A threshold value was calibrated by minimizing the difference between the measured value and the true value for 17 samples of 3x3m area. The calibrated threshold values were 1,94 for index A and 1,75 for index B. The index B was closer to the true measure with systematic difference of 0,1 m<sup>2</sup> and correlation of 93 %. The repeatability of index B was tested in a similar way than was done with the bleeding indexes. Correlation between the first and second runs varied from 94 % to 100 %.

According to the study a reasonable good measurement method was found for both phenomena (bleeding area and raveling area) of the segregation of new pavement. The threshold values were calibrated to one pavement type only (SMA 16). A further study is recommended to find correct values for other pavement types as well.



# Esipuhe

Työssä kehitettiin uusien päällysteiden lajittumavirheiden mittausta.

Työn on tilannut Liikennevirasto ja sitä on ohjannut Katri Eskola. Työn on toteuttanut Destia Oy, jossa projektipäällikkönä on toiminut Pertti Virtala ja asiantuntijana Pauli Alanaatu. Poranäytteet on ottanut Juha-Matti Vainio Roadmasters Oy:stä, ja ne on tutkinut Sami Similä Mitta Oy:stä.

Helsingissä syyskuussa 2017

Liikennevirasto  
Kunnossapidon ohjaus ja kehittäminen

# Sisällysluettelo

1	JOHDANTO .....	10
2	TAVOITE.....	11
3	KIRJALLISUUSELVITYS LAJITTUMAVIRHEIDEN TUNNUSLUVUISTA .....	12
3.1	Lajittumavirheet.....	12
3.1.1	Bitumin pintaan nousu .....	13
3.1.2	Purkauma .....	14
3.2	Lajittumavirheiden mittaus.....	14
3.2.1	Visuaalinen havainnointi .....	14
3.2.2	Säteilytiheysmittari.....	14
3.2.3	Sand Patch –testi.....	15
3.2.4	Lämpökamera.....	15
3.2.5	Pistelasertekniikka .....	16
3.2.6	Viivalasertekniikka .....	20
4	ILMIÖN TARKASTELU OLEMASSA OLEVISTA MITTAUSTIEDOISTA .....	23
5	PÄÄLLYSTENÄYTTEIDEN TUTKIMINEN VALITUILTA KOHTEILTA .....	25
5.1	VT 1 Kehä III-Veikkola .....	25
5.1.1	Näytteiden otto .....	25
5.1.2	Näytteiden tulokset.....	27
5.1.3	Näytteiden makrokarkeus vs. näytetulokset .....	28
5.1.4	Yhteenvedo näytetutkimuksista .....	30
5.2	Lämpökamerakohteet vuonna 2013 .....	31
5.2.1	VT 1 tieosat 26 ja 27 .....	31
5.2.2	VT 3 tieosa 139.....	32
5.2.3	VT 4 tieosa 364 .....	33
5.2.4	Yhteenvedo.....	34
6	TUNNUSLUKUJEN MITTAAMISEN JA LASKENNAN MÄÄRITTÄMINEN .....	35
6.1	Bitumin pintaan nousu .....	35
6.1.1	Mittausperiaate.....	35
6.1.2	Tunnusluvut.....	35
6.1.3	Mittauksen suhde tosimitaan .....	36
6.1.4	Toistettavuus.....	39
6.2	Purkauma .....	40
6.2.1	Mittausperiaate.....	40
6.2.2	Tunnusluvut.....	41
6.2.3	Tosimitta .....	42
6.2.4	Toistettavuus.....	43
7	PILOTOINTI.....	45
7.1	Lämpökamerakohteet .....	45
7.1.1	VT 1 – VT 3 – VT 4 .....	45
7.1.2	Kehä III osa 4 .....	49

8	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	51
8.1	Kirjallisuusselvitys .....	51
8.2	Näytetutkimukset uudelta päällysteeltä .....	52
8.3	Suljetun pinnan tunnusluku .....	53
8.4	Avoimen pinnan tunnusluku.....	54
8.5	Jatkotutkimusten tarve.....	54
	LÄHTEET .....	56

# 1 Johdanto

Maanteiden päällystystöissä voi tapahtua päällystemassan lajittumista aiheuttavia virheitä eri työvaiheissa: Massan valmistuksessa, kuormauksessa, kuljetuksessa ja levityksessä. Näitä tekijöitä nykyisellä urakointimenettelyllä tilaajan on mahdotonta valvoa. Siksi on tarvetta kehittää mittareita, joilla lajittumista aiheutuvia virheitä voidaan yksiselitteisesti mitata valmiilta päällysteeltä. Tällä hetkellä lajittumat arvioidaan vain silmämääräisen tarkastelun perusteella, mitä ei voida nykytilanteessa enää pitää riittävänä menettelynä.

## 2 Tavoite

Tällä työllä tavoiteltiin seuraavia asioita:

- Tunnusluvun ja mittausmenetelmän kehittäminen lajittumasta aiheutuvalle bitumin pintaan nousulle
- Tunnusluvun ja mittausmenetelmän kehittäminen purkaumiin johtaville rakeisuuslajittumille
- Lajittumia selittävien juurisyiden kartoittaminen
- Uusien tunnuslukujen pilotointi vuosina 2016–2017 tehtävillä päällystyskohteilla

## 3 Kirjallisuusselvitys lajittumavirheiden tunnusluvuista

### 3.1 Lajittumavirheet

Asfalttipäällysteen lajittumavirheitä on ainakin seuraavia tyyppejä:

- Rakeisuudesta johtuvat lajittumavirheet
- Lämpötilasta johtuvat lajittumavirheet
- Asfalttimassasta johtuva lajittuminen

Lajittuminen jaetaan kirjallisuudessa usein kahteen luokkaan, massalajittumaan ja lämpölajittumaan (Stroup-Gardiner & Brown 2000). Massaa voidaan pitää lajittuneena, kun rakeisuuskäyrä muuttuu normaaliarvoista joko liian paljon hienoainesta sisältäväksi tai liian karkeaksi. Jos massassa on liian paljon karkeaa kiviainesta, päällysteen pinnasta tulee avoin ja tyhjätila kasvaa. Tällöin myös tyypillisesti sideainepitoisuus on alhainen. Tämän kaltainen päällyste on altis vaurioille ja siksi lajittumia, joissa rakeisuuskäyrä on siirtynyt karkeaksi, pidetään haitallisina päällysteen kestoajan kannalta. Jos taas massa sisältää liikaa hienoainesta, päällysteen sideainepitoisuus on tyypillisesti normaalia korkeampi, tyhjätilat pieniä ja pinta tasainen. Tällöin päällyste on alttiimpi urautumiselle. (Willoughby ym. 2001.) Lämpölajittuma määritellään kirjallisuudessa päällysteeseen muodostuvina ympäröivää päällystettä kylmempinä kohtina, joissa yleensä valmiin päällysteen tiheys on alhaisempi ja tyhjätilat suuria. Yleisimpiä syitä kylmempien alueiden muodostumiselle ovat kuorma-auton lavalla massan pintaan syntyvä muuta massaa kylmempi kuori, lavan reunoilla nopeammin jäähtyvä massa sekä levittimen suppilon laiduille jäävä massa. Tämä kylmempi massa päättyy levittimestä päällysteeseen sekoittumatta kuumemman massan kanssa, jolloin kylmemmät kohdat jäävät valmiiseen pintaan. Sellaiset massalajittumat, joissa rakeisuuskäyrä on liian karkea, voidaan havaita päällysteessä kylmempinä kohtia, sillä karkearakeisessa päällysteessä pinta on avoimempi ja näin myös jäähtyminen on nopeampaa. (Stroup-Gardiner & Brown 2000.) [9]

Rakeisuudesta johtuvia lajittumavirheitä syntyy kun valmiissa asfalttipäällysteessä on normaalista poikkeava määrä hienoaineksia ja ne syntyvät massanvalmistuksen, kuljetuksen tai levityksen aikana. Lajittumavirheitä syntyy suuren tyhjätilan ja alhaisen bitumipitoisuuden mahdollistaessa massan epätasaisen jäähtymisen. Se aiheuttaa kosteusvaurioita ja kestävytyteen vaikuttavia ilmiöitä kuten väsymisvaurioita, purkamaa ja reikien muodostumista.[9].

Hienoaineksesta johtuva lajittumavirhe syntyy kun päällysteessä on matala tyhjätila ja korkea bitumipitoisuus, mikä aiheuttaa mm. urautumista. [9].

Laboratoriokokeissa on selvitetty, että päällysteen lajittuma on luokiteltavissa neljään luokkaan seuraavasti [8]:

- Ei lajittumaa:
  - Tyhjätila vaadittavalla alueella.
  - Jäykkyys vähintään 90 % tavoitellusta arvosta.
  - Sideainepitoisuus  $\pm 0,3$  %:n rajoissa vaaditusta.

- Lievä lajittuma:
  - Tyhjätila 0–4 % yli sallitun.
  - Jäykkyys 70–90 % tavoitellusta.
  - Jos rakeisuuslajittumaa, niin ainakin yhdellä seulalla kiviaines vähintään 5 % karkeampaa ja sen seurauksena ja vastaavasti sideaineessa 0,3–0,75 % vajuus.
  
- Selvä lajittuma:
  - Jäykkyys 30–70 % tavoitteesta.
  - Tyhjätilaa liikaa 2–6 %.
  - Jos rakeisuuslajittumaa, niin ainakin kahdella seulalla kiviaines vähintään 10 % karkeampaa ja sen seurauksena ja vastaavasti sideaineessa 0,75–1,3 % vajuus.
  
- Vakava lajittuma:
  - Jäykkyys <30 % tavoitellusta.
  - Tyhjätila vähintään 4 % liikaa.
  - Jos rakeisuuslajittumaa, niin ainakin kolmella seulalla kiviaines vähintään 15 % karkeampaa ja sen seurauksena ja vastaavasti sideaineessa vähintään 1,3 % vajuus.

Päällystystyön virheillä on vaikutusta karkeuteen. Seuraavat työvirheet lisäävät karkeuden vaihtelua:

- suhteutusvirhe
- bitumin laatuvirheet
- kiviaineksen raekokopoikkeamat
- massan jäähtyminen kuljetuksen aikana
- tuotantokatkokset – levitin pysähtyy/pysähtelee
- päällystystyön aikaiset lämpötilaerot
- jyräyksen epätasaisuus

### 3.1.1 Bitumin pintaan nousu

Bitumin pintaan noususta on kyse silloin, kun päällysteessä on sellaisia sileitä kohtia, joissa sideainepitoisuus on suuri, tyhjätila pieni ja makrokarkeus pieni. Tällaisissa kohdissa kitka on alhainen. Ilmiö on palautumaton, ts. kesän aikana pintaan nousut bitumi ei poistu talven aikana muualla kuin nastarenkaiden käyttöalueilla, joilla ne vähintäänkin karhentuvat nastarenkaiden vaikutuksesta.



Kuva 1. Esimerkki bitumin pintaan noususta (Destia Oy 2016).

### 3.1.2 Purkauma

Päällysteessä esiintyvä rakeisuuslajittuma johtaa purkaumaan, joka on yksi päällysteen kuntoon liittyvä vaurio, jota esiintyy sekä uusilla päällysteillä että vanhoilla päällysteillä. Uusilla päällysteillä purkaumaa esiintyy päällystyön yhteydessä syntyvien lajittumavirheiden takia. Lajittumavirhe on yleensä kaksitahoinen; bitumin pintaan nousun kohdalla bitumia on liikaa ja rakeisuuslajittuman kohdalta sitä puuttuu. Purkauman pääsiallisina syinä ovat liian alhainen sideaineen määrä ja kivi-rakeiden puuttuminen tai irtoaminen. Purkauma näkyy silmämääräisesti karkeampana pintana ja se tuntuu ajettaessa epätasaisempana ja meluisampana päällysteenä.



Kuva 2. Esimerkki purkaumasta (Destia Oy 2016).

## 3.2 Lajittumavirheiden mittaaminen

### 3.2.1 Visuaalinen havainnointi

Purkaumia ja bitumin pintaan nousua voidaan havaita tarkastelemalla päällysteen pintaa visuaalisesti. Visuaalisten havaintojen perusteella on todettu, että purkaumaa esiintyy sellaisissa kohdissa, missä päällysteen karkeudessa on epäjatkuvuuskohtia. Karkeudeltaan epäjatkuvista kohdista tehtyjen Sand Patch tulosten on havaittu korreloivan hyvin visuaalisten havaintojen kanssa. [8]. Bitumin pintaan nousu on visuaalisesti helpompi havaita. Valo heijastuu siitä eri tavalla kuin normaalista päällysteestä.

### 3.2.2 Säteilätiheysmittari

Päällysteen karkeutta on yritetty mitata myös vierivällä säteilätiheysmittarilla. Sen oletuksena on, että päällysteen tiheys olisi purkaumakohdissa pienempi. Mittaus perustuu säteilällä havaittavaan tiheyden muutokseen. Tällaisia mittareita ovat esimerkiksi Seaman Nuclear ja Troxler -mittarit.

Tiheyden on todettu muuttuvan eri lajittumien asteilla. Tiheyden perustuvilla mittaustekniikoilla on todettu olevan vaikeuksia tunnistaa purkaumia juuri sen eri vakavuustasoilla. Mittaustekniikan on todettu sopivan pituussuuntaisen tiheysprofiilin muodostamisessa, jonka avulla voidaan kohdistaa tarkemmat mittaukset selvästi lajittuneisiin kohtiin. [8].



### 3.2.3 Sand Patch -testi

Purkauman mittaamiseen on käytetty Sand Patch -testiä, joka on määritetty mm. standardeissa SS-EN 13036-1, 2001 ja ASTM E965. Testausmenetelmän mukaan testin tarkkuus on noin 1 % mitatusta karkeudesta millimetreinä. [7]. Sand Patch -testi on kuitenkin mittausmenetelmänä hidas ja edellyttää liikennejärjestelyjä. Testin karkeustulos (MTD=Mean texture Depth) lasketaan kuluneen hiekan tilavuuden ja levitysalueen lävistäjän avulla seuraavalla kaavalla [7]:

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (1)$$

Sand Patch testin yhteys pistelasertekniikalla mitattuun makrokarkeuteen on seuraava [7]:

$$ETD = 0.2 + 0.8 * MPD \quad (2)$$

missä ETD=estimoitu karkeuden syvyys (mm) ja MPD on makrokarkeus (mm).

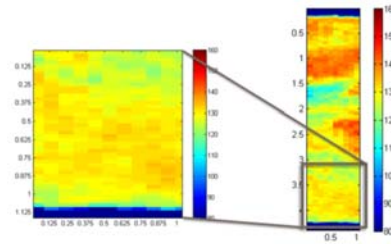
### 3.2.4 Lämpökamera

Lämpökameran toiminta perustuu lämpösäteilyn eli sähkömagneettisen säteilyn mittaamiseen, jonka aallonpituus on infrapuna-alueella. Kaikki kohteet, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nolapisteen, lähettävät lämpö- eli infrapunasäteilyä. Lämpökamera toimii lämpösäteilyn vastaanottimena, joka mittaa kuvattavan kohteen pinnasta luonnostaan lähtevää lämpösäteilyä. Lämpökamera muuttaa kohteen lämpösäteilyn lämpötilatiedoksi, josta lämpökuva muodostetaan digitaalisesti. [9]

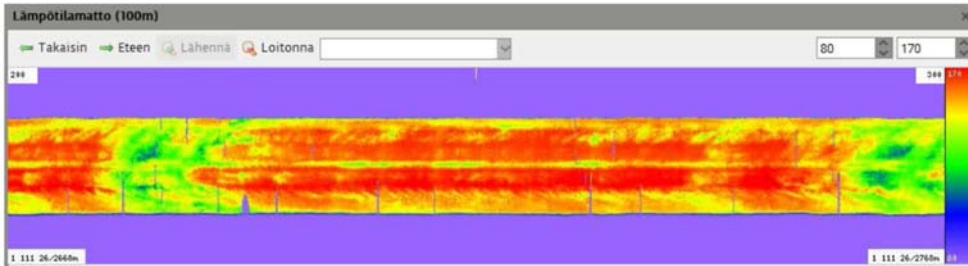
Lämpökameralaitteisto koostuu vastaanottimesta, näytöstä, tietokoneesta, muistista sekä tarvittaessa myös paikannuslaitteistosta. Lämpökuva esitetään värien avulla siten, että yksi väri vastaa yhtä lämpötilaa. Yleensä sinisen sävyillä esitetään kylmemmät alueet ja punaisen sävyillä kuumemmat alueet. Lämpökameran resoluutio vaikuttaa mitattavan alueen kokoon sekä asennusetäisyyteen mitattavasta kohteesta. Esimerkiksi levittimen takaosaan katon rajaan asennetulla lämpökameralla voidaan mitata koko kaistan leveydeltä yhdellä mittauksella. Lämpökameran tarkkuus on parhaimmillaan jopa 0,02 astetta. [9].



Kuva 8. Levittimen perään kiinnitetty lämpökamera (Nevalainen 2013).



Kuva 23. Esimerkkikuva Matlab -ohjelmalla laaditusta lämpötilamatosta.



Kuva 32. VT1: Esimerkkikuva lämpötilamatosta (Roadscanners Oy 2014).

Kuva 3. Lämpökamera lajittumavirheiden mittaamisessa [9].

Lämpökameralla voidaan mitata päällysteen lämpötilaeroista johtuvia lajittumia. Infrapunakuvaa pystytään tuottamaan koko kaistan leveydeltä. Kuvan resoluutio kuitenkin heikkenee, jos mittausnopeus on liian suuri (>80 km/h). Paras tarkkuus saavutetaan alle 60 km/h mittausnopeuksilla [8].

Lämpökamerakuvaus soveltuu erittäin hyvin tehtäväksi päällystystyön yhteyteen, koska sillä saadaan valvottua levitetyn päällysteen lämpötilaeroja ja sillä saadaan siten reaaliaikaista informaatiota mahdollisiin lajittumavirheisiin johtavista tilanteista. Lämpökameran soveltamisesta päällysteen lajittuman arvioinnissa on käsitelty enemmän Niklas Nevalaisen diplomityössä [9].

### 3.2.5 Pistelasertekniikka

Pistelaser-tekniikka on nopeiden kuntomittausten yleisin päällysteiden ominaisuuksien mittaustekniikka. Päällysteiden karkeustietoon perustuva lajittumaa voidaan mitata siis lähes kaikilla markkinoilla olevilla mittauslaitteilla (riippuen siitä minkä verran ja minkä tyyppisiä mittausantureita niissä on). Eräitä markkinoilla olevia laitteita on lueteltu seuraavassa taulukossa.

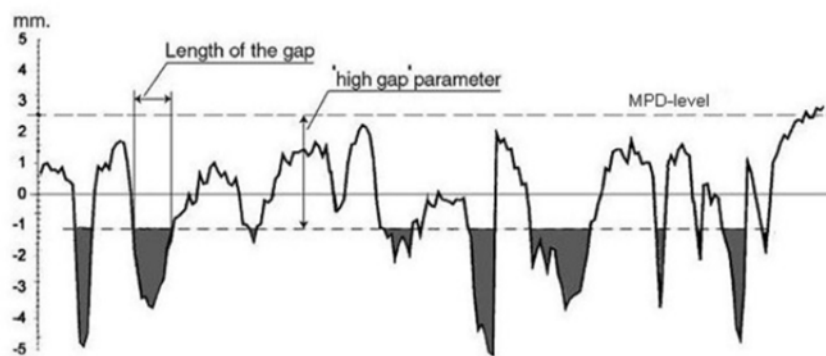
Taulukko 1. Eräitä markkinoilla olevia pistelaserlaitteita [13].

Product Name	Laser Sensors	Structure
Dynatest - Road surface profiler (RSP)	1-21 (Standard 11)	Vehicle mounted
Greenwood - Profilo-graph System	Up to 25	Standard vehicle
ARAN (Automatic road analyzer)	1-3	Special vehicle
WDM-HSTM (High speed texture system)	Up to 3	Two wheeled trailer
ARRB-MLP (Multi laser profiler)	Standard 13 (Expandable)	Vehicle mounted
ROSAN (Road surface analyzer)	1-3	Vehicle mounted

Taulukossa esitetyjä laitteita oli tutkittu ja ROSAN (Road surface analyzer) oli todettu käyttökelpoisimmaksi päällysteen lajittumien mittaamiseen (2002) [13]. Johtopäätöksen perusteluina ei ollut niinkään laite vaan lajittumien laskenta-algoritmit. Dynatestin ja Greenwoodin laitteet sisälsivät enemmän mittaavia antureita, ja ne olisivat siten vähintään yhtä hyviä, elleivät jopa parempia, kun niiden mittaustuloksia käsitellään yhtä hyvillä tunnuslukujen laskenta-algoritmeilla.

### 3.2.5.1 Stoneaway

Mittaustekniikan lisäksi merkittävä osa on purkaumatunnusluvun laskenta-algoritmi. Ooijen (2004) kehitti ns. ”Stoneaway”-algoritmin päällysteen purkauman mittaamiseen huokoisia asfalttipäällysteitä varten. Algoritmilla tuotetaan tieto, joka kuvaa montako kiveä metriä kohti on irronnut päällysteestä (%/m). Periaatteena on, että jos päällysteestä puuttuu kiviä, niin se näkyy tavalla tai toisella päällysteen karkeudessa. Mallissa on kaksi parametria, jotka ovat kuvan 4 mukaisesti puuttuvan kiven tilan korkeus ja väli. Purkauman vakavuus on määritetty puuttuvan materiaalin prosenttiosuutena. Purkautuneeksi alueiksi tunnistetaan pituussuuntaisesta profiilista ne kohdat, joiden pituus ja syvyys ovat suuria. Parametreillä ”greatgap” ja ”highgap” säädellään mitkä kohdat tulkitaan purkautuneiksi kohdiksi. [2] .



Kuva 4. ”StoneAway”-algoritmi (Ooijen et al 2004).

Stoneaway-algoritmia sovellettiin TRL:n toimesta Englannissa tavallisimpien kuumapäällysteiden purkaumien tunnistamisessa (Wright 2004). Tunnistamiseen tarvittavat parametrit kuitenkin jouduttiin kalibroimaan uudelleen.[3].

Myöhemmin mittaustekniikkaa kehitettiin kattamaan poikkisuunnassa 25 kpl 16 kHz pistelaserantureita, jolloin päällysteen pinnasta saatiin kokonaisvaltaisempi kuva kuin pelkkien kolmen mittauslinjan tiedoista (McRobbie & Furnes 2008). Mittausjärjestelmää on myöhemmin kehitetty siten, että kustakin pistelaserista tuotetaan tieto pituussuunnassa 6 mm välein.

Mittausmenetelmän yksi edelleen kehittämisen kohde on ollut saada menetelmä riippumattomaksi päällystetyypistä. Pistelasereiden mittaustieto suodatettiin 2.5–100 mm aallonpituusalueelle liian lyhyiden ja liian pitkien aallonpituuksien eliminoinniseksi. Suodatetusta datasta laskettiin karkeudelle RMS-arvo (RMST) kullekin 100 mm matkalle. Sen jälkeen niistä laskettiin jakaumat 10 m ja 100 m matkoille. Paikallisten (10m) arvojen vertailu laajempiin arvoihin (100 m) mahdollisti poikkeavien 10 m jaksojen tunnistamisen. Tällä saavutettiin se, että algoritmi kalibroiti itsestään kohdekohtaisesti.

Algoritmissa oli kolme parametria:

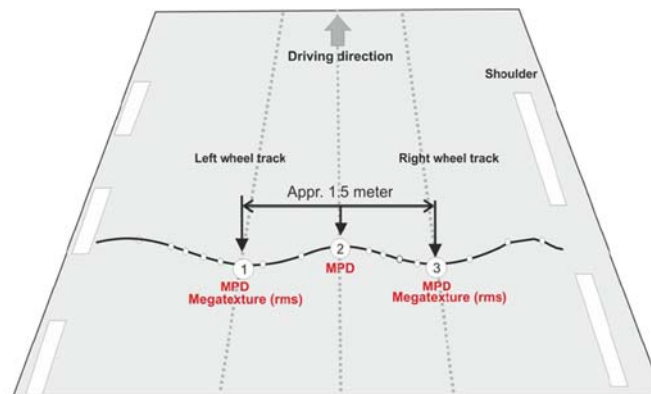
- *Korrelaatio*: Kun paikallisten arvojen jakauman korrelaatio oli poikkeava laajemman alueen arvojen jakaumasta, se oli merkinä poikkeavuudelle ja päinvastaisessa tapauksessa vastaavasti ei.
- *Karkeussuhde*: Paikallisten ja laajemman alueen karkeusarvojen jakaumista laskettiin keskiarvo ja 90 % piste, joiden erotuksista laskettiin suhde, joka ilmaisee milloin paikallisten purkautuneiden alueiden karkeusjakauman hännät ovat leveämmät kuin laajemman alueen karkeusjakaumien hännät.
- *Poikkisuunnan vaihtelu*: Kolmas lähestymistapa on verrata laserantureiden tulosten vaihtelua poikkisuunnassa. Kunkin laseranturin kaikkia 10m RMST-arvoja verrattiin koko 10 m alueen RMST-jakauman keskiarvoon. Yli 1,5-kertaiset
- positiiviset erot tulkittiin purkautuneiksi kohdiksi.
- *Yhdistetty tunnusluku*: Edellä esitetyistä kolmesta tunnusluvusta tuotettiin yhdistetty tunnusluku ja näin pystyttiin eliminoimaan tietyt yksittäiseen tunnuslukuun liittyneet ongelmat.

### 3.2.5.2 Makrokarkeus

Yksi päällysteen lajittumavirheiden mittaamisen menetelmä on makrokarkeus (MPD). Makrokarkeuden mittaaminen tapahtuu pistelaserhavainnoista yleensä kolmesta eri pituuslinjasta (sisältyy PTM-tietolajeihin). Makrokarkeuden mittausperiaate on määritetty standardissa ISO 13473-1:1997 (E). Makrokarkeuden aallonpituusalue on 0,5–50 mm ja se tulisi mitata korkeataajuisilla, 64 kHz, antureilla. Sen mittaamista on käsitelty yksityiskohtaisemmin julkaisussa ”Päällysteiden pintakarkeuden vaikutus tien käyttäjiin ja tienpitoon, Liikenneviraston selvityksiä 1/2010”.

Makrokarkeuden soveltamista lajittumavirheiden mittaamiseen on selvitetty useissa tutkimuksissa. Eräässä ruotsalaisessa selvityksessä makrokarkeuden käytöstä lajittumavirheiden mittaamiseen on todettu mm. seuraavaa [10]:

- MPD on sopiva uusien päällysteiden laatua ja homogeenisuutta kuvaava tunnusluku.
- Ruotsin Liikenneviraston kuntomittauksissa käytettävän määritelmän mukainen kolmesta eri pituussuuntaisesta linjasta tehtävä mittaus on riittävä kuvaamaan tien tärkeimpien osien ominaisuuksia.
- MPD mitataan kummastakin ajourasta ja niiden välistä.
- MPD:n mittaus ei riipu mittausnopeudesta nopeusalueella 30–70 km/h.
- Yhdelle metrille laskettu keskiarvo on riittävä tieto kuvaamaan päällysteen pinnan rakennetta ja se sopii hyvin kuvaamaan pinnassa olevia vikoja ja homogeenisuutta ja sen mittaamisen toistettavuus on hyvä.
- MPD:n variaatiokerroin (100% $\times$ hajonta/keskiarvo) on hyvä mittari kuvaamaan päällysteen laatua.
- Raja-arvot on valittava kullekin päällystetyypille erikseen.
- Erilaisten päällystetyyppien raja-arvoista tarvitaan enemmän tutkimusta.
- Mittauksen ajoittaminen uuden päällysteen elinkaareissa on tutkimatta.
- Toinen käyttökelpoinen tunnusluku olisi MPDn (MPD Down), jonka laskenta on muuten sama kuin MPD:n, mutta siinä lasketaan karkeutta pinnasta alaspäin olevia mittoja.



Kuva 5. Makrokarkeuden mittaus kolmesta eri linjasta [10].

Lajittumien hallintaan makrokarkeuden avulla on esitetty erilaisia raja-arvoja. Ruotsissa tehdyn selvityksen [11] mukaan raja-arvot ovat taulukon 2 mukaiset. Raja-arvot riippuvat tien nopeusrajoituksesta. Hyväksyttävä arvoalue asettuu tietyn vaihtelualueen keskelle ja sen ala- ja yläpuolella olevat arvot eivät ole hyväksyttäviä (tai hyviä). Pienet makrokarkeuden arvot kuvaavat tilannetta, jossa päällysteessä on bitumin pintaan nousua ja suuret arvot vastaavasti tilannetta, jossa päällysteessä on purkaumaa.

Taulukko 2. Ehdotus makrokarkeuden raja-arvoille [11].

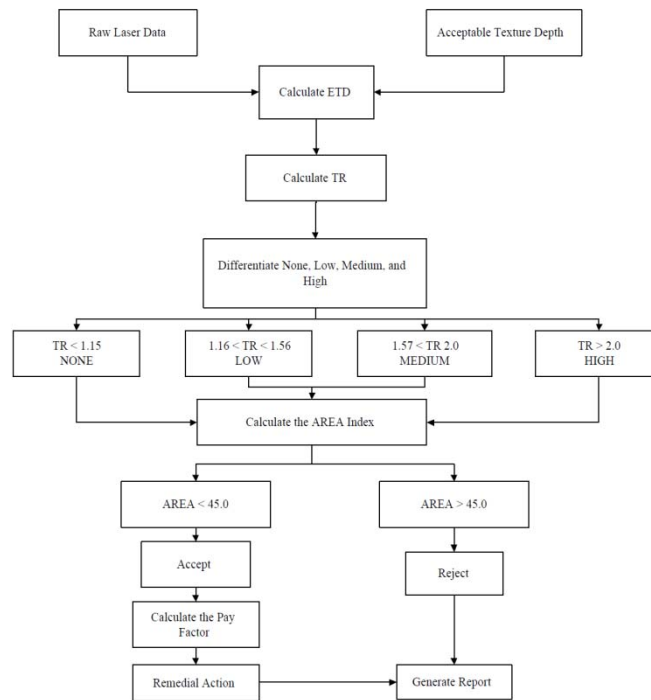
MPD-område i mm	Hast. 90–110 km/h	Hast. 70 km/h	Hast. 30–50 km/h
0–0,30 mm			Dåligt
0,31–0,50 mm		Dåligt	Bra
0,51–0,70 mm	Dåligt	Utmärkt	Utmärkt
0,71–1,00 mm	Utmärkt	Godtagbart	Godtagbart
1,01–1,50 mm	Utmärkt	Dåligt	Dåligt
1,51–2,00 mm	Godtagbart	Dåligt	
2,01–mm	Dåligt		

Yhdysvalloissa New Jersey osavaltiossa tehdyn selvityksen mukainen purkaumien tunnistusalgoritmi on kuvattu kuvassa 6. Purkaumien tunnistus pohjautuu PTM:llä mitattuun makrokarkeuteen, jonka avulla lasketaan ensin karkeuden estimoitu syvyys (ETD) ja sen avulla lasketaan ensin ns. karkeuden suhde ( $TR = \text{Texture ratio}$ ) ja se luokitellaan neljään eri luokkaan. Niiden avulla lasketaan purkautunut pinta-ala painottaen kunkin luokan tuloksia painokertoimilla. Tuloksena saadaan pinta-ala, jolle asetetaan raja-arvoja ja jonka perusteella uusi päällyste joko hyväksytään tai hylätään.

Estimoitu karkeuden syvyys (ETD) lasketaan Sand Patch -menetelmän yhteydessä esitetyllä kaavalla. Karkeuden suhde lasketaan jakamalla purkaumaksi tulkittu ETD-arvo kullekin päällysteelle tyypillisellä, ei purkaumaa sisältävien kohtien ETD-arvolla. Selvityksessä mainitut arvoalueet tyypillisille ei purkaumaa sisältäville kohdille ovat seuraavan taulukon mukaiset:

Taulukko 3. Eri päällystetyypeille tyypillisten karkeuden syvyyden arvoalueet [13].

Surfacing Material	Texture Depth (mm)
Asphalt concrete (fine graded)	0.4 – 0.6
Asphalt concrete (coarse graded)	0.6 – 1.2
Open Graded Friction Course/ SMA	1.5 – 3.5

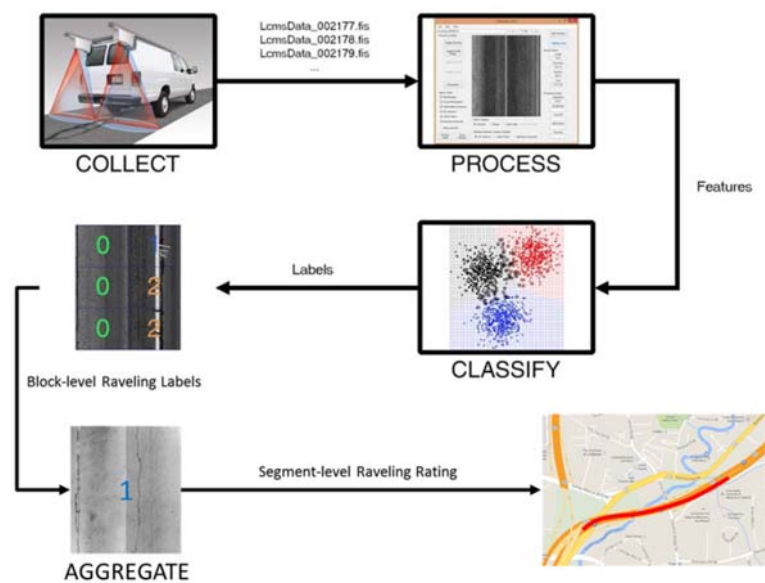
Kuva 6. NJT<sub>xr</sub> käytetty kaavio purkauman laskemiseksi makrokarkeudesta [13].

### 3.2.6 Viivalasertekniikka

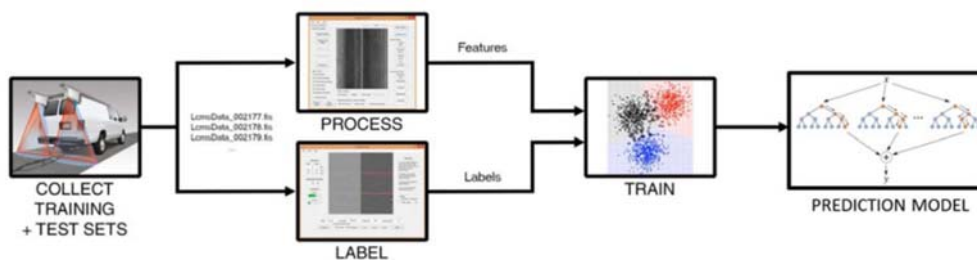
Yhdysvaltalaisen NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) IDEA (Innovations Deserving Exploratory Analysis) ohjelman puitteissa on toteutettu työ, jossa kehitettiin automaattinen mittaus-, tunnistus- ja luokittelumenetelmä päällysteen purkaumien mittaamiseen käyttäen kolmidimensionaalista viivalasermittaustekniikkaa. Työn taustalla olivat kaksi seuraavaa lähtökohtaa:

1. Pistelaser-tekniikkaan liittyvien aiempien selvitysten tuottamat tunnusluvut eivät kattaneet koko kaistan leveyttä, eikä niitä sen takia pidetty tarpeeksi luotettavina.
  - a. Vaikka 3D-havainnointia on käytetty joissakin selvityksissä aiemmin (esim. Mathavan et al. 2014 tai LCMS laitevalmistajan tutkimukset) niitä ei ole kuitenkaan tarpeeksi hyvin validoitu ja ne ovat käsitelleet vain purkaumien tunnistamista, mutta niistä on jäänyt puuttumaan luokittelu (purkaumien vakavuusasteet).
  - b. Purkaumien luokitteluun on kehitetty muita, esim. pistelaser-tekniikkaan perustuvia, periaatteita, mutta niissä on käytetty makrokarkeustietoa sellaisenaan (joko MPD-arvoina tai RMS-arvoina).
  - c. 3D-tekniikan mittaustarkkuuden resoluutiot ovat pystysuunnassa 0,5 mm, poikkisuunnassa 1 mm ja pituussuunnassa 5 mm.
  - d. 3D-mittaustekniikka kattaa koko kaistan leveyden ja tarjoaa uusia mahdollisuuksia purkaumien havainnointiin.

2. Purkauman havainnointiin ja tunnistamiseen on käytävissä kehittyneitä kone-  
näkösovelluksia, joista esimerkkinä ns. Random Forest -menetelmä. Se käsittää  
seuraavat viisi komponenttia:
- Tiedonkäsittelyrutiinit outlierien, ajoratamerkintöjen ja reunapainaumien poistamiseen.
  - Purkaumien havainnointi ja analysointi kuuteen osaan jaetuille 5 m jaksoille.
  - Purkaumien luokittelu Random Forest malleilla ja tunnettujen näytteiden perusteella tehtävä ohjattu opetustekniikka.
  - Purkaumien vakavuuden analysointi.
  - Tulosten yhdistely ja karkeuttaminen pitemmille jaksoille (yleensä 1 maili).



Kuva 7. Purkaumien tunnistamisen vaiheet [5].



Taulukko 4. Mittausmenetelmien kyvystä mitata lajittumaa [8].

Mittausmenetelmä	Massatyypit				Mittauksen syvyys		
	Hienoaines	Tiheä aines	SMA	Muut	Vain pinta	Pinnan alla	Koko päälllysteen syvyys
Visuaalinen havainnointi	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei
Laser anturi	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei
Tiheysmittari	Riippuu rakeisuudesta	Riippuu rakeisuudesta	Kyllä	Riippuu rakeisuudesta	Ei	Kyllä	Ei
Säteilytetty asfaltti & tiheysmittaus	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei
Permeabiliteetti	Ei	Karkea lajittuma	Kyllä	Riippuu rakeisuudesta	Ei	Kyllä	Ei
Maatutka	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei	Kyllä	Kyllä
Lämpökamera	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Kyllä	Yläosa	Ei tiedossa
Seisminen mittari	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei	Kyllä	Ei



## 4 Ilmiön tarkastelu olemassa olevista mittaustiedoista

Ilmiötä tarkasteltiin vuoden 2015 mittausten perusteella. Ensin tarkasteltiin mittauksissa otettujen videokuvien avulla mahdollisia kiinnostavia tieosuuksia. Niitä kerättiin makrokarkeusdata, josta muodostetaan tunnuslukuehdokkaita. Tavoitteena oli saada tuntumaa sille, miten lajittumavirheet voitaisiin tunnistaa.

Alustavaan tarkasteluun valittiin vuonna 2015 mitattuja uusia päällysteitä noin 320 km. Kohteet sijaitsivat Etelä-Suomessa. Taulukossa 5 on esitetty mitattujen kohteiden karkeuksien tieosittaiset keskiarvot ja hajonnat. Makrokarkeudet on laskettu sekä MPD-arvoina että RMS-arvoina. Lisäksi on tuotettu karkeuden suuntaa kuvaava tunnusluku:

$$\text{Suunta} = 100 * (\text{MPD-RMS})/\text{RMS}$$

Uusilla päällysteillä karkeuden suunta on yleensä negatiivinen ja se muuttuu positiiviseksi kun päällyste kuluu.

Makrokarkeuksien keskiarvot olivat suuria valtateillä 1,3 ja 4 sekä Kehä I:llä (mt 101) ja Kehä III:lla (kt 50). Suurimmat makrokarkeuskeskiarvot löytyivät ykköstien tieosilta 6 ja 7 sekä kolmostien tieosalta 137. Pienimmät karkeuskeskiarvot löytyivät valtatieltä 8, kantatieltä 41 ja maanteiltä 192 ja 194.

Karkeuksien tieosakohtainen vaihtelu (hajonta) oli suurinta samoilla kohteilla kuin suuret keskiarvot. Tarkempaan tarkasteluun valittiin seuraavat kohteet:

- VT 1 tieosat 6 ja 7
- VT 8 tieosat 103 ja 119
- VT 4 tieosa 106
- KT 41 tieosa 8
- KT 50 tieosa 2
- MT 101 tieosa 4 ja 5
- MT 192 tieosa 8

Lisäksi tiedettiin, että seuraavilla kohteilla saattoi olla päällysteiden lajittuman kannalta mielenkiintoisia kohtia:

- kt 55 Porvoo 1/1800-1/5400 ja 1/7965-2/5000 (silmämääräisesti rakeisuus lajittumia havaittu heti valmistumisen jälkeen) (SMA)
- kt 55 1/5400-1-7965 (referenssikohde, valmistunut edellisenä vuonna, ei havaittu lajittumia) (SMA)
- Vt7 Ramppi 21715 to 12 (Skarpens, v. 2014 purkautuva ja huono SMA)
- Mt 1430 Ridasjärvi 1403/3/25-3/5110 (AB)
- Vt5 Lusi 5/113/4690-115/1623 (SMA)

Taulukko 5. Uusien päällesteiden karkeuksia.

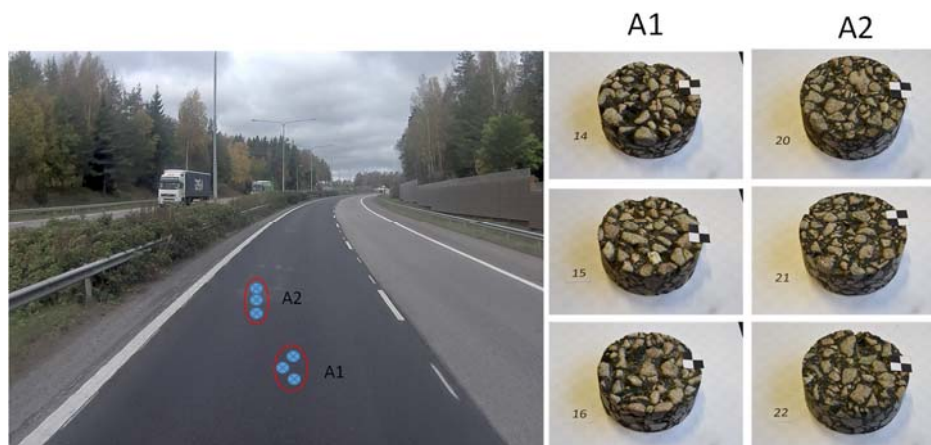
Tie/Osa	Pituus	Makrokarkeus (MPD)						Makrokarkeus (RMS)						Karkeuden suunta (negatiivinen/positiivinen)						Ka		Ka		Ka		Ka		Haj		Ka		Haj					
		Keskiarvo		Keskihajonta		Keskiarvo		Keskihajonta		Keskiarvo		Keskihajonta		Keskiarvo		Keskihajonta		Ka	Ka	Ka	Ka	Haj	Haj	Ka	Ka	Haj	Haj	Ka	Ka	Haj	Haj						
		Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä	Isäntä	Näennä				
1	48321	1.33	1.40	1.39	0.24	0.25	0.27	1.40	1.34	1.40	0.24	0.24	0.23	-5.3%	3.8%	-7.0%	4.4%	5.6%	5.2%	2.57	0.78	0.59	6.32	8.99	30.41	27.44											
6	4446	1.59	1.65	1.73	0.10	0.18	0.15	1.59	1.59	1.73	0.12	0.20	0.16	0.0%	4.2%	0.1%	2.4%	3.8%	1.7%	2.68	0.82	0.70	1.98	1.98	72.08	16.27											
7	5845	1.46	1.26	1.67	0.23	0.16	0.24	1.48	1.31	1.64	0.21	0.15	0.19	-1.4%	-3.9%	1.8%	2.3%	2.4%	3.3%	3.14	1.04	0.70	6.63	14.18	45.40	18.34											
11	3706	1.51	1.82	1.33	0.14	0.23	0.15	1.61	1.62	1.49	0.17	0.20	0.17	-5.6%	12.7%	-10.1%	5.7%	2.8%	5.7%	2.89	0.88	0.61	4.20	4.33	59.64	16.51											
22	13075	1.24	1.37	1.28	0.21	0.23	0.24	1.31	1.28	1.40	0.21	0.18	0.22	-5.0%	7.0%	-8.2%	3.6%	3.6%	3.0%	2.32	0.67	0.55	6.88	3.97	29.94	25.03											
29	5881	1.40	1.49	1.41	0.10	0.08	0.08	1.50	1.42	1.55	0.12	0.07	0.07	-6.6%	4.8%	-9.3%	1.9%	1.5%	1.2%	2.58	0.77	0.61	1.89	2.21	17.92	18.46											
30	8775	1.33	1.45	1.39	0.16	0.11	0.14	1.42	1.40	1.52	0.19	0.09	0.15	-6.4%	3.5%	-8.8%	2.7%	2.2%	1.3%	2.36	0.80	0.60	3.30	3.61	13.35	14.07											
31	5993	1.04	1.00	1.11	0.25	0.33	0.27	1.16	1.02	1.24	0.25	0.28	0.27	-10.6%	-2.8%	-11.2%	4.3%	4.6%	3.2%	2.65	0.70	0.46	18.18	14.13	5.25	8.49											
3	6494	1.43	1.03	1.61	0.17	0.18	0.23	1.40	0.80	1.64	0.19	0.21	0.24	2.8%	31.1%	-1.9%	4.0%	10.0%	2.9%	6.36	0.79	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00											
137	2769	1.38	0.99	1.69	0.16	0.08	0.16	1.34	0.74	1.73	0.17	0.08	0.15	3.6%	35.5%	-2.4%	3.0%	7.1%	1.4%	5.89	0.75	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00											
138	3725	1.47	1.07	1.55	0.17	0.22	0.26	1.44	0.84	1.58	0.19	0.26	0.27	2.2%	29.4%	-1.5%	4.5%	11.4%	4.9%	6.70	0.82	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00											
4	20906	1.34	1.30	1.42	0.17	0.24	0.19	1.35	1.29	1.43	0.19	0.22	0.21	-0.1%	0.5%	-0.1%	5.3%	6.5%	5.2%	2.93	0.84	0.61	7.29	7.49	32.88	15.55											
103	3158	1.27	1.08	1.52	0.17	0.21	0.14	1.32	1.13	1.52	0.16	0.20	0.12	-4.0%	-4.7%	-0.5%	2.3%	2.6%	2.2%	2.65	0.86	0.63	10.74	10.83	24.35	8.97											
104	2842	1.39	1.28	1.41	0.22	0.39	0.18	1.42	1.28	1.44	0.21	0.29	0.18	-8.8%	-0.7%	-1.7%	2.9%	4.9%	2.9%	2.95	0.82	0.59	9.62	11.56	36.38	20.03											
105	2960	1.36	1.18	1.38	0.16	0.13	0.17	1.37	1.21	1.41	0.14	0.12	0.15	-1.5%	-2.8%	-2.5%	1.5%	1.7%	2.2%	2.89	0.90	0.61	7.51	4.93	26.61	10.85											
106	3570	1.48	1.33	1.61	0.14	0.12	0.16	1.49	1.35	1.63	0.14	0.12	0.16	-1.1%	-1.6%	-0.9%	2.4%	4.3%	2.4%	2.97	0.84	0.71	9.32	2.33	45.73	12.77											
107	7375	1.27	1.43	1.31	0.11	0.17	0.14	1.23	1.36	1.29	0.16	0.21	0.20	4.0%	5.8%	2.2%	6.5%	6.9%	7.7%	3.02	0.81	0.56	6.12	3.72	30.80	13.56											
8	67544	0.77	0.82	0.77	0.22	0.21	0.23	0.81	0.86	0.86	0.27	0.21	0.27	-2.9%	-4.6%	-10.8%	7.2%	4.1%	6.6%	3.06	0.61	0.32	42.98	28.44	5.20	10.04											
103	20069	1.23	1.26	1.23	0.09	0.12	0.10	1.37	1.26	1.40	0.10	0.10	0.10	-10.8%	-1.4%	-12.1%	2.9%	2.1%	2.4%	2.94	0.74	0.54	3.98	1.22	26.43	8.40											
107	3508	0.63	0.65	0.61	0.09	0.07	0.09	0.62	0.70	0.66	0.08	0.08	0.11	1.2%	-7.2%	-7.1%	3.0%	2.2%	4.5%	3.19	0.61	0.25	66.26	24.14	0.54	0.43											
108	12209	0.74	0.79	0.76	0.10	0.11	0.11	0.73	0.84	0.83	0.09	0.11	0.12	0.7%	-5.4%	-8.8%	3.1%	2.8%	3.4%	2.92	0.57	0.31	40.91	15.81	1.21	1.38											
109	3010	0.76	0.78	0.73	0.15	0.12	0.09	0.73	0.81	0.78	0.07	0.08	0.08	3.0%	-4.1%	-6.8%	9.8%	7.9%	2.8%	2.86	0.58	0.29	37.91	14.55	1.24	1.94											
110	8434	0.68	0.71	0.68	0.06	0.07	0.07	0.69	0.76	0.75	0.06	0.07	0.07	-0.3%	-7.2%	-8.6%	3.2%	2.4%	4.0%	2.91	0.58	0.28	58.30	13.39	0.32	0.39											
111	6237	0.69	0.72	0.64	0.06	0.06	0.08	0.68	0.77	0.70	0.07	0.05	0.10	1.8%	-6.2%	-8.3%	3.1%	2.0%	5.1%	3.29	0.64	0.26	63.19	17.73	0.36	0.23											
114	8106	0.72	0.84	0.71	0.07	0.08	0.08	0.77	0.89	0.83	0.08	0.09	0.09	-6.6%	-5.3%	-14.2%	3.1%	2.4%	3.1%	2.71	0.55	0.30	19.27	21.09	0.59	0.70											
119	3361	0.65	0.77	0.72	0.12	0.09	0.12	0.63	0.81	0.74	0.11	0.11	0.14	2.8%	-5.1%	-2.8%	5.4%	2.1%	5.4%	4.05	0.79	0.30	69.10	21.89	1.65	1.09											
120	11810	0.62	0.67	0.58	0.07	0.06	0.08	0.66	0.69	0.70	0.08	0.07	0.10	-5.7%	-3.0%	-16.4%	10.0%	5.5%	9.0%	3.25	0.56	0.26	62.67	21.95	2.16	2.25											
9	5981	0.85	1.00	0.83	0.11	0.18	0.15	0.88	0.83	0.89	0.11	0.15	0.16	-3.5%	20.6%	-6.2%	5.1%	6.4%	8.7%	8.43	0.85	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00											
206	5981	0.85	1.00	0.83	0.11	0.18	0.15	0.88	0.83	0.89	0.11	0.15	0.16	-3.5%	20.6%	-6.2%	5.1%	6.4%	8.7%	8.43	0.85	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00											
12	7945	0.90	0.63	0.86	0.14	0.09	0.12	0.94	0.51	0.91	0.11	0.07	0.10	-4.4%	23.2%	-5.4%	4.6%	8.1%	2.9%	5.63	0.75	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00											
203	7945	0.90	0.63	0.86	0.14	0.09	0.12	0.94	0.51	0.91	0.11	0.07	0.10	-4.4%	23.2%	-5.4%	4.6%	8.1%	2.9%	5.63	0.75	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00											
40	16642	0.94	0.96	0.97	0.23	0.22	0.23	0.98	1.00	1.08	0.26	0.21	0.24	-3.7%	-4.0%	-10.6%	3.8%	3.0%	2.8%	2.88	0.67	0.41	25.59	21.58	11.56	14.81											
4	4787	1.24	1.26	1.26	0.12	0.12	0.11	1.33	1.27	1.40	0.15	0.10	0.12	-6.9%	-11.0%	-8.1%	3.0%	2.4%	3.8%	3.21	0.84	0.54	13.87	6.81	32.52	9.82											
5	8696	0.82	0.85	0.86	0.12	0.12	0.15	0.83	0.90	0.96	0.11	0.13	0.16	-1.6%	-5.4%	-10.5%	3.0%	2.4%	3.0%	2.69	0.60	0.37	34.34	17.17	3.19	2.91											
6	3159	0.79	0.82	0.83	0.14	0.08	0.11	0.83	0.86	0.94	0.14	0.09	0.12	-4.8%	-5.1%	-11.6%	3.1%	1.8%	3.4%	2.75	0.59	0.36	40.00	19.41	2.46	2.18											
41	26392	0.52	0.54	0.50	0.12	0.15	0.13	0.54	0.59	0.58	0.15	0.15	0.17	-3.9%	-8.7%	-12.7%	6.2%	4.1%	4.7%	2.58	0.68	0.22	121.27	59.85	0.31	0.47											

## 5 Päälystenäytteiden tutkiminen valituilta kohteilta

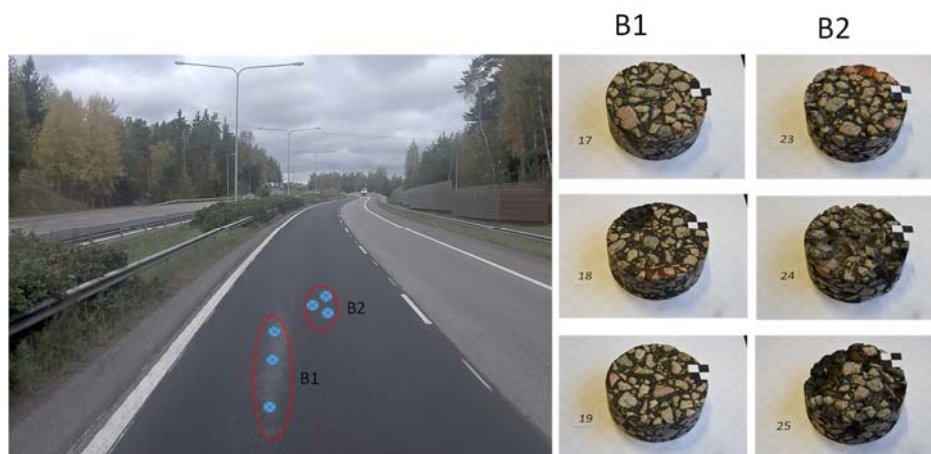
### 5.1 VT 1 Kehä III-Veikkola

#### 5.1.1 Näytteiden otto

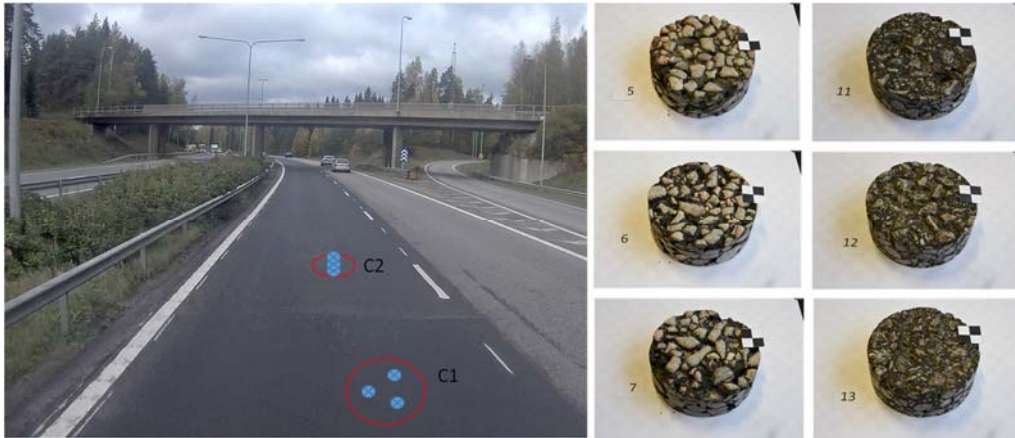
Kohteelta otettiin näytteitä sellaisista kohdista, joissa havaittiin silmämääräisesti päälysteen lajittumia. Niistä tutkittiin tyhjätilat ja rakeisuudet, joita verrattiin alustavan tarkastelun avulla saatuihin tunnuslukuihin. Tavoitteena oli hakea syy-seuraussuhteita päälysteen koostumuksen ja mittaustulosten välille. Kohteelta otettiin kahdeksan sarjaa näytteitä joulukuun viimeisellä viikolla 2015. Näytteet otti Juha-Matti Vainio Roadmasters Oy:stä. Neljä näytettä otettiin sileistä kohdista, kolme karkeista kohdista ja yksi normaalista kohdasta. Näytteiden paikat on esitetty seuraavissa kuvissa 10–14.



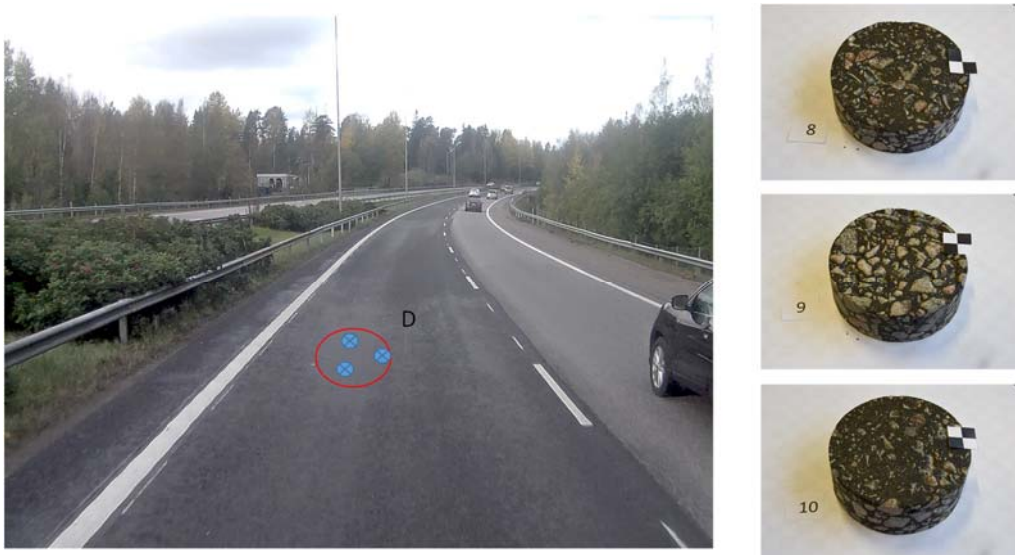
Kuva 8. Näytteet A1(karkea) ja A2 (sileä) valtatiellä 1 tieosalla 6 suunnassa 1 kaistalla 2 kohdissa 3944 m ja 3945 m. A1 kaistan keskeltä 30 cm oikeaan, karkea. A2 kaistan keskeltä 30 cm vasempaan, bitumia noussut pintaan, sileä.



Kuva 9. Näytteet B1 ja B2 valtatiellä 1 tieosalla 6 suunnassa 1 kaistalla 2 kohdissa 4036–4041 m ja 4042 m. Näyte B1 oli kaistan keskeltä 30 cm vasempaan, bitumia noussut pintaan 5 m x 0.2 m alueella, sileä. Näyte B2 oli kaistan keskeltä, karkea.



Kuva 10. Näytteet C1 (karkea) ja C2 (normaali) valtatiellä 1 tieosalla 6 suunnassa 1 kaistalla 2 kohdissa 5328 m ja 5332 m. Näyte C1 oli 2 m ennen saumaa, kaistan keskeltä 30 cm oikeaan, karkea. Näyte C2 oli 2m sauman jälkeen, kaistan keskeltä, normaali.



Kuva 11. Näytteet D valtatiellä 1 tieosalla 7 suunnassa 1 kaistalla 2 kohdassa 3567 m. Näyte D oli kaistan keskeltä 30 cm oikeaan, bitumia noussut pintaan lammikoksi.



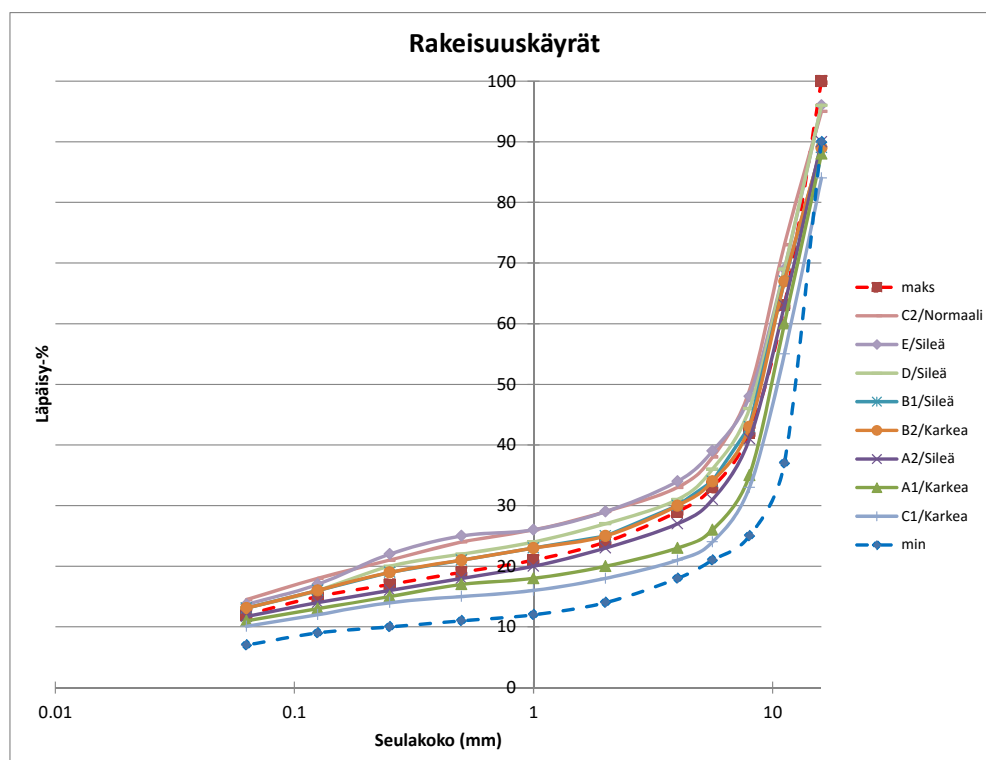
Kuva 12. Näyte E valtatiellä 1 tieosalla 7 suunnassa 1 kaistalla 2 kohdassa 3610 m. Kaistan keskeltä 30 cm oikeaan, bitumia noussut pintaan lammikoksi.

### 5.1.2 Näytteiden tulokset

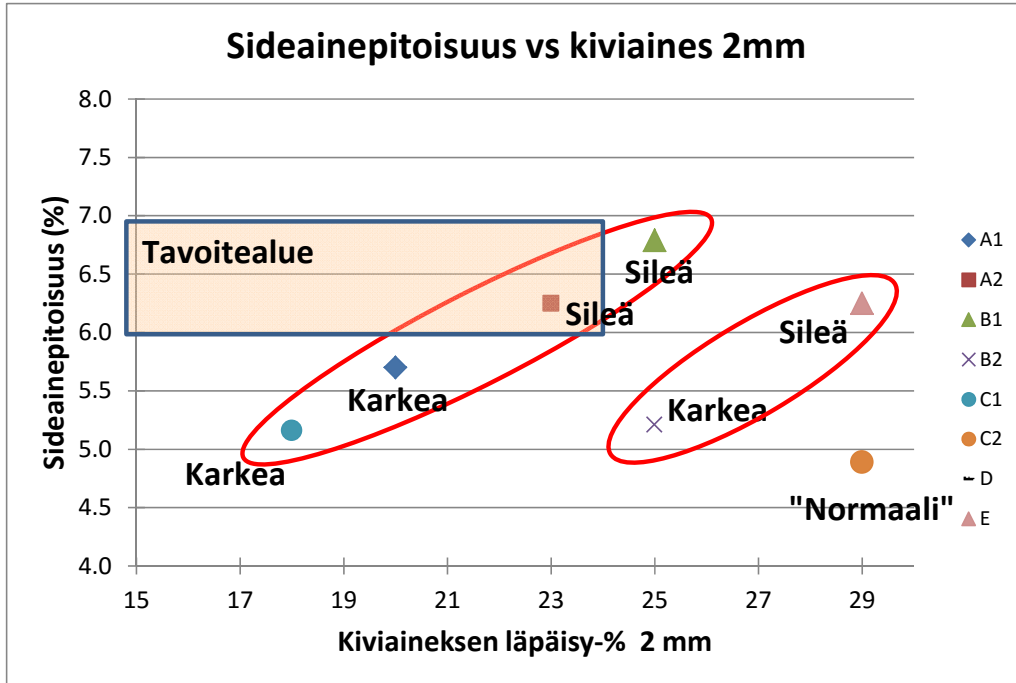
Näytteistä tutkittiin niiden rakeisuudet, tiheydet, tyhjätilat ja sideainepitoisuudet. Tutkimukset teki Mitta Oy. Näytteiden tulokset on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Päälystenäytteistä tutkitut ominaisuudet ja niiden keskeiset tulokset. Poranäytteet A–C ovat osuudelta, jonka toimenpide on tierekisterin mukaan SMA 16/100 LTA ja näytteet D–E osuudelta, jonka toimenpide on SMA16/26 REM.

Näytetutkimusten tulokset			Karkea	Sileä	Sileä	Karkea	Karkea	Normaali	Sileä	Sileä
			1/6/3944/karkea	1/6/3945/sileä	1/6/4036-4041/sileä	1/6/4042/karkea	1.6.5328/karkea	1.6.5332/normaali	1/7/3567/sileä	1/7/3610/sileä
Seulalat	min	maks	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D	E
16	90	100	88	90	89	89	84	95	96	96
11.2	37	63	60	63	67	67	55	73	69	69
8	25	42	35	41	43	43	33	49	46	48
5.6	21	33	26	31	34	34	24	38	36	39
4.0	18	29	23	27	30	30	21	33	31	34
2	14	24	20	23	25	25	18	29	27	29
1	12	21	18	20	23	23	16	26	24	26
0.5	11	19	17	18	21	21	15	24	22	25
0.25	10	17	15	16	19	19	14	21	20	22
0.125	9	15	13	14	16	16	12	18	16	17
0.063	7	12	11	12	13	13	10	15	13	14
Päälysteen tiheys	ilma-vesi	kg/m3	2292	2335	2322	2289	2292	2344	2380	2384
	pintakuiva	kg/m3	2283	2328	2317	2232	2252	2328	2378	2383
	ulkomitta	kg/m3	2188	2300	2265	1994	2054	2273	2332	2375
Massan tiheys		kg/m3	2383	2347	2335	2399	2400	2400	2384	2388
Tyhjätila	ilma-vesi	%	3.8	0.5	0.5	4.6	4.5	2.3	0.2	0.2
	pintakuiva	%	4.2	0.8	0.8	7.0	6.2	3.0	0.2	0.2
	ulkomitta	%	8.2	2.0	3.0	16.9	14.4	5.3	2.2	0.6
Sideainepitoisuus		%	5.7	6.3	6.8	5.2	5.2	4.9	7.0	6.3
Näyte			A1	A2	B1	B2	C1	C2	D	E
Keskiarvo			2.10	0.95	0.39	1.93	2.10	1.22	0.35	0.33
Keskihajonta			0.75	0.38	0.10	0.73	0.62	0.35	0.12	0.10

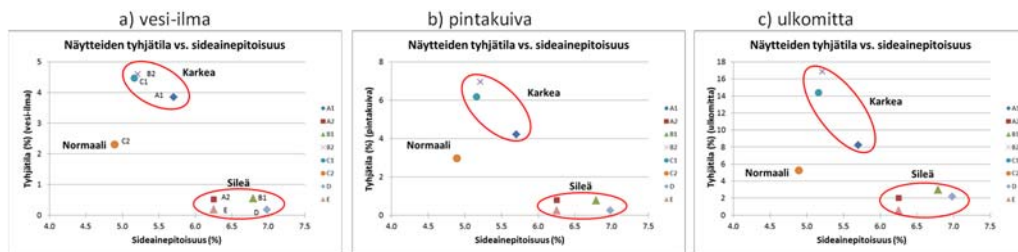


Kuva 13. Näytteiden massojen kiviaineksen rakeisuustulokset.



Kuva 14. Päällystenäytteiden sideainepitoisuus vs. kiviaineksen läpäisy-% 2 mm seulalla. Asfalttinormien mukaisen SMA16-massan koostumuksen ohjealue on merkitty sinisellä suorakaiteella.

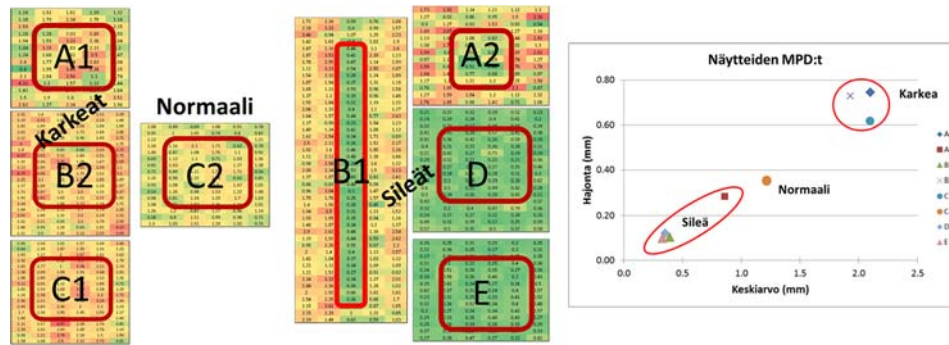
Bitumin pintaan nousukohtia (A2, B1, E ja D) olivat sellaiset kohdat, joissa sideainepitoisuus oli suuri ja tyhjätila pieni. Vastaavasti karkeilta näytteiltä (A1, B2, C1) olivat sellaiset kohdat, joissa sideainepitoisuus oli pieni ja tyhjätila suuri. Normaalkarkeaksi arvioidun kohdan (C2) sideainepitoisuus oli kaikkein pienin, mutta sen tyhjätila oli edellisten luokkien väliltä.



Kuva 15. Näytteiden tyhjätila vs. sideainepitoisuus kolmella eri tyhjätilan mittaamenetelmällä.

### 5.1.3 Näytteiden makrokarkeus vs. näytetulokset

Näytteiden makrokarkeus mitattiin PTM-laitteella. Mittauksista laskettiin makrokarkeuden arvo MPD-arvona. Näytekohtien karkeudet ja karkeusvaihtelut määritettiin ottamalla näytekohdan ympäristöstä karkeusarvojen keskiarvot ja hajonnat käyttäen 10 cm dataa kuvan 16 mukaisesti. Näytteiden ottoalueiden karkeuskeskiarvot ja hajonnat on esitetty kuvan oikeanpuoleisessa osassa. Sen mukaan karkeiden kohtien karkeuskeskiarvot ja hajonnat olivat suuria ja sileiden kohtien vastaavasti pieniä kuten osattiin olettaakin. Pinnan makrokarkeus ja sen vaihtelu liittyivät selvästi siihen, havaittiinko näytekohdissa purkaumaa vai bitumin pintaan nousua.



Kuva 16. Näytteiden makrokarkeus (laskenta punaisten alueiden sisältä).

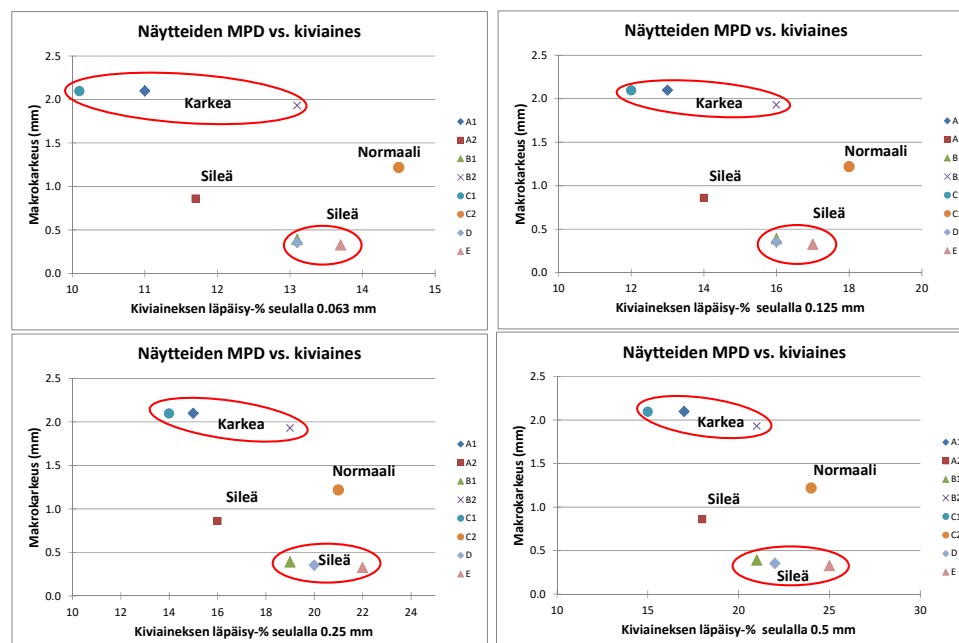
Näytteiden asfalttimassoista tehtiin normaalit kiviaineksen rakeisuustutkimukset. Kiviaineksen hienoaineksen ( $\#0.063\text{mm}$ ) läpäisy-% olivat välillä 10–15 % (Kuva 17). Karkeapintaisilla näytteillä läpäisy-% oli alle 13 ja sileäpintaisilla näytteillä yli 11. Normaalipintaisen näytteen hienoainespitoisuus oli suurin (14,5%).

Seulan  $\#0,125\text{mm}$  läpäisy-% vaihtelivat välillä 12–18 siten, että karkeapintaisilla näytteillä ne olivat alle 16 % ja sileäpintaisilla näytteillä yli 14 % normaalipintaisen näytteen läpäisy-% ollessa suurin eli 18 %.

Seulan  $\#0,25\text{ mm}$  läpäisy-% vaihtelivat välillä 14–22 siten, että karkeapintaisilla näytteillä se oli 19 % ja sileäpintaisilla näytteillä se oli alle 22 %. Normaalipintaisen näytteen läpäisy-% oli 19 %.

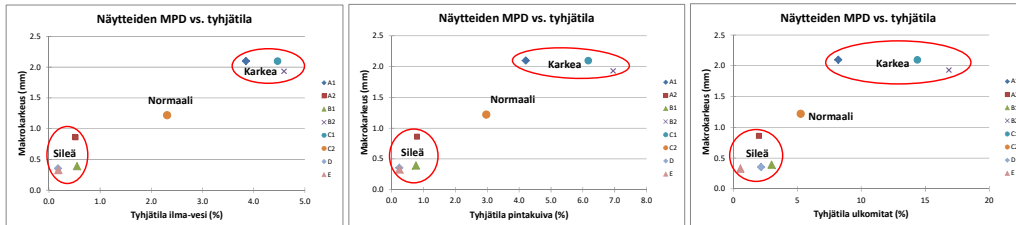
Seulan  $\#0,5\text{mm}$  läpäisy-% vaihtelivat välillä 15–25 siten, että karkeapintaisilla se oli alle 21 % ja sileäpintaisilla näytteillä yli 18 %. Normaalipintaisen näytteen läpäisy-% oli 24 %.

Karkeapintaisien näytteiden hienoainesten läpäisy-% olivat pienempiä kuin sileäpintaisien näytteiden, mutta niiden avulla ei pystytty luokittelemaan näytteitä pinnaltaan sileisiin tai karkeisiin.



Kuva 17. Näytteiden makrokarkeus vs. eräät kiviaineksen ominaisuudet.

Näytteistä otetut tyhjätilat korreloivat makrokarkeuksien kanssa hyvin (Kuva 18). Tyhjätilat oli määritetty kolmella eri periaatteella. Sileiden näytteiden tyhjätilat olivat pieniä ja makrokarkeus alhainen. Karkeiden näytteiden tyhjätilat olivat suuria ja makrokarkeudet korkeita. Makrokarkeuden ja tyhjätilan välinen korrelaatio oli eri tyhjätilan määrittysperiaatteilla (ilma-vesi) 97,2 %, (pintakuiva) 93,2 % ja (ulkomitat) 87,0 %.



Kuva 18. Näytteiden makrokarkeus vs. tyhjätila.

#### 5.1.4 Yhteenveto näytetutkimuksista

Näytetutkimusten perusteella haettiin vastausta siihen, minkälaisia ominaisuuksia erilaisia lajittumavirheitä sisältävillä päällysteillä oli. Näytetutkimuksia päätettiin tehdä sellaisista kohdista, joissa silmämääräisesti havaittiin joko avointa tai suljettua päällysteen pintaa. Näin saatiin kohdistettua näytteiden otto sellaisiin kohtiin, joissa oli päällysteen lajittumia.

Näytteissä oli kolme avointa pintaa edustavaa kohta ja neljä suljettua pintaa edustavaa kohta sekä niiden lisäksi yksi normaalia pintaa edustava kohta. Näytteistä tehtiin seuraavat johtopäätökset:

- Avoin pinta oli silmämääräisen tarkastelun mukaan karkea ja suljettu pinta oli sileä. Avoimen pinnan makrokarkeus ja sen vaihtelu olivat suuria ja sileän pinnan makrokarkeus ja sen vaihtelu olivat pieniä.
- Avoimen päällysteen tyhjätila-% oli suurempi kuin suljetun päällysteen tyhjätila-%.
- Avoimien päällysteiden sideainepitoisuudet olivat pienempiä kuin suljettujen päällysteiden sideainepitoisuudet. Suljettujen päällysteiden sideainepitoisuudet olivat tavoitealueella, mutta avoimien päällysteiden sideainepitoisuudet olivat alle tavoitearvojen.
- Normaalin päällysteen tyhjätila-% oli avoimien ja suljettujen päällysteiden tyhjätila-%:n välissä. Sen sijaan normaalin päällysteen sideainepitoisuus oli pienempi kuin suljetun tai avoimen päällysteen sideainepitoisuus.
- Sileissä päällystenäytteissä oli enemmän hienoaineksia kuin karkeissa päällystenäytteissä. Kiviainesten rakeisuuden avulla ei kuitenkaan pystytty luokittelemaan pintoja sileisiin tai karkeisiin kovin luotettavasti.
- Makrokarkeus ja sen vaihtelu luokittelivat näytteet sileisiin ja karkeisiin paremmin kuin näytteiden laboratoriotutkimusten tulokset. Makrokarkeus oli siten erittäin lupaava mittaustieto päällysteen lajittuman mittaamiseen.

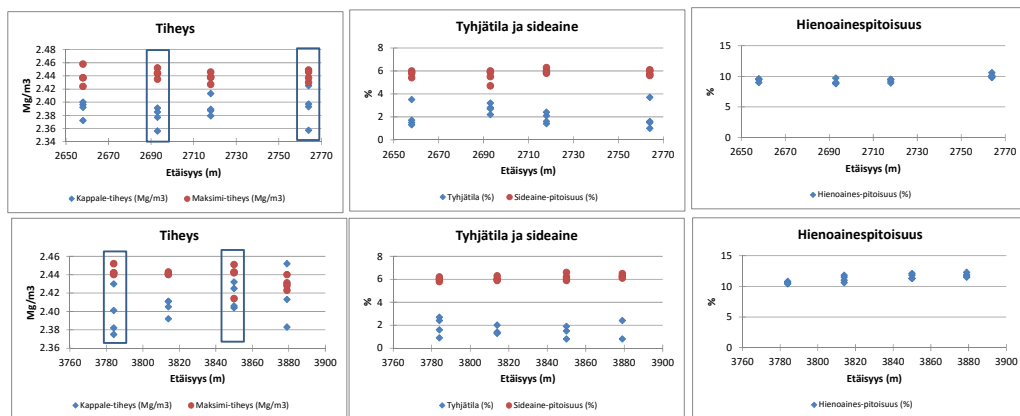
Näytetutkimusten perusteella voitiin todeta, että päällysteen lajittumia sisältävissä kohdissa tyhjätila, sideainepitoisuudet ja hienoainepitoisuudet vaihtelivat ja se oli todettavissa melko hyvin makrokarkeustunnusluvun (MPD) avulla.



## 5.2 Lämpökamerakohteet vuonna 2013

### 5.2.1 VT 1 tieosat 26 ja 27

Valtatiellä 1 sijaitsevan kohteen uudelleenpäällystettävän tieosan pituus oli 8,25 km. Kohde oli 2-ajoratainen ja 4-kaistainen, jonka kaikki kaistat päällystettiin vuonna 2013 SMA 16/100 päällysteellä. Kohteelta otettiin 32 näytettä neljän näytteen sarjoina. Puolet näytteistä oli otettu kuorman vaihtokohdista ja puolet keskeltä [9]. Tulokset on esitetty seuraavassa kuvassa ja taulukossa.



Kuva 19. Poranäytteiden tulokset valtatiellä 4 tieosilla 26 (yläkuvat) ja 27 (alakuvat).

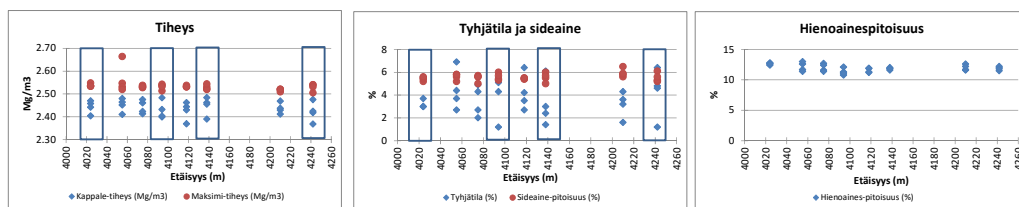
Näytteiden ottokohdalla ei näyttänyt olevan kovin merkittävää vaikutusta näytteiden laboratoriotutkimusten tuloksiin (Kuva 19). Tyhjättila oli hiukan suurempi kuorman vaihtumiskohdissa kuin kuorman keskellä. Sideainepitoisuudessa ero oli sitäkin pienempi ja hienoainespitoisuuksiin ottokohdalla ei ollut mitään vaikutusta.

Taulukko 7. Poranäytteiden tutkimustulokset valtatiellä 1 [9].

Näyte	Tie	Ajorata	Suunta	Kaista	Osa	Etäisyys (m)	Kappale- tiheys (Mg/m <sup>3</sup> )	Maksimi- tiheys (Mg/m <sup>3</sup> )	Tyhjättila (%)	Sideaine- pitoisuus (%)	Hienoaines- pitoisuus (%)	Ottokohta
1	1	1	1	1	26	2658	2.396	2.437	1.7	6.0	9.5	Keskellä
2	1	1	1	1	26	2658	2.400	2.437	1.5	5.9	9.6	Keskellä
3	1	1	1	1	26	2658	2.392	2.424	1.3	5.8	9.5	Keskellä
4	1	1	1	1	26	2658	2.372	2.458	3.5	5.4	9.0	Keskellä
5	1	1	1	1	26	2693	2.391	2.444	2.2	5.9	8.9	Vaihto
6	1	1	1	1	26	2693	2.385	2.452	2.8	5.5	8.8	Vaihto
7	1	1	1	1	26	2693	2.356	2.435	3.2	6.0	9.7	Vaihto
8	1	1	1	1	26	2693	2.377	2.444	2.7	4.7	9.0	Vaihto
9	1	1	1	1	26	2718	2.387	2.438	2.1	6.0	9.2	Keskellä
10	1	1	1	1	26	2718	2.413	2.446	1.4	5.8	8.9	Keskellä
11	1	1	1	1	26	2718	2.389	2.427	1.6	6.3	9.5	Keskellä
12	1	1	1	1	26	2718	2.379	2.438	2.4	5.9	9.5	Keskellä
13	1	1	1	1	26	2764	2.393	2.430	1.5	6.1	10.6	Vaihto
14	1	1	1	1	26	2764	2.425	2.449	1.0	5.7	9.8	Vaihto
15	1	1	1	1	26	2764	2.397	2.437	1.6	6.0	10.1	Vaihto
16	1	1	1	1	26	2764	2.357	2.446	3.7	5.6	10.0	Vaihto
17	1	1	1	1	27	3784	2.375	2.442	2.7	6.0	10.8	Vaihto
18	1	1	1	1	27	3784	2.401	2.440	1.6	6.2	10.7	Vaihto
19	1	1	1	1	27	3784	2.430	2.452	0.9	5.8	10.4	Vaihto
20	1	1	1	1	27	3784	2.382	2.442	2.4	6.0	10.5	Vaihto
21	1	1	1	1	27	3814	2.405	2.440	1.4	6.0	11.0	Keskellä
22	1	1	1	1	27	3814	2.411	2.441	1.3	6.0	10.6	Keskellä
23	1	1	1	1	27	3814	2.411	2.443	1.3	5.9	11.8	Keskellä
24	1	1	1	1	27	3814	2.392	2.441	2.0	6.3	11.5	Keskellä
25	1	1	1	1	27	3850	2.404	2.451	1.9	5.9	11.3	Vaihto
26	1	1	1	1	27	3850	2.432	2.414	-0.7	6.6	12.1	Vaihto
27	1	1	1	1	27	3850	2.425	2.443	0.8	6.2	11.8	Vaihto
28	1	1	1	1	27	3850	2.406	2.442	1.5	6.0	11.3	Vaihto
29	1	1	1	1	27	3879	2.413	2.431	0.8	6.2	11.7	Keskellä
30	1	1	1	1	27	3879	2.452	2.423	-1.2	6.5	11.9	Keskellä
31	1	1	1	1	27	3879	2.430	2.428	-0.1	6.3	12.3	Keskellä
32	1	1	1	1	27	3879	2.383	2.440	2.4	6.1	11.5	Keskellä

### 5.2.2 VT 3 tieosa 139

Valtatiellä 3 kohteina olivat tieosat 136 ja 139, joista tässä käsitellään vain tieosaa 139. Päällystetyyppinä oli niin ikään SMA 16 -massa, mutta massamääränä oli 90 kg/m<sup>2</sup>. Työmenetelmänä käytettiin massapintausta. Kohteen pituus oli 5,22 km. Kohde oli 2-ajoratainen ja 4-kaistainen, ajokaistan leveys oli 4,5 m. Päällystystyö oli käynnissä heinäkuun puolesta välistä elokuun alkuun vuonna 2013 [9].



Kuva 20. Poranäytteiden tulokset valtatiellä 3 (kuorman vaihtokohdat laatikoitu) [9].

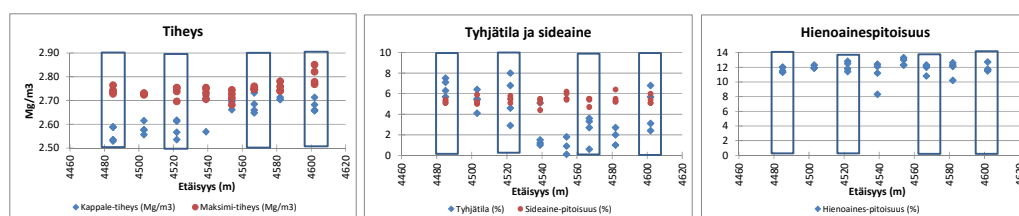
Massan tiheydessä, tyhjätilassa, sideainepitoisuudessa ja hienoainepitoisuudessa ei havaittu merkittäviä eroja näytteiden ottokohtien suhteen (Kuva 20).

Taulukko 8. Poranäytteiden tutkimustulokset valtatiellä 3 [9].

Näyte	Tie	Ajorata	Suunta	Kaista	Osa	Etäisyys (m)	Keppalettiheisyys (Mg/m <sup>3</sup> )	Maksimiheisyys (Mg/m <sup>3</sup> )	Tyhjättila (%)	Sideainepitoisuus (%)	Hienoainespitoisuus (%)	Ottokohta
1	3	1	1	1	139	4024	2.404	2.548	5.6	5.2	12.7	Vaihto
2	3	1	1	1	139	4024	2.442	2.535	3.7	5.4	12.4	Vaihto
3	3	1	1	1	139	4024	2.458	2.534	3.0	5.5	12.8	Vaihto
4	3	1	1	1	139	4024	2.470	2.534	3.0	5.6	12.6	Vaihto
5	3	1	1	1	139	4055	2.452	2.547	3.7	5.2	11.7	
6	3	1	1	1	139	4055	2.464	2.531	2.7	5.6	12.6	
7	3	1	1	1	139	4055	2.480	2.664	6.9	5.8	13.0	
8	3	1	1	1	139	4055	2.410	2.520	4.4	5.8	11.4	
9	3	1	1	1	139	4075	2.413	2.538	4.9	5.0	11.6	
10	3	1	1	1	139	4075	2.461	2.530	2.7	5.7	11.4	
11	3	1	1	1	139	4075	2.475	2.527	2.0	5.6	12.7	
12	3	1	1	1	139	4075	2.423	2.533	4.3	5.6	12.4	
13	3	1	1	1	139	4094	2.399	2.538	5.5	5.3	10.8	Vaihto
14	3	1	1	1	139	4094	2.432	2.543	4.3	5.4	11.3	Vaihto
15	3	1	1	1	139	4094	2.483	2.513	1.2	6.0	12.1	Vaihto
16	3	1	1	1	139	4094	2.403	2.532	5.1	5.7	11.1	Vaihto
17	3	1	1	1	139	4118	2.444	2.531	3.5	5.4	11.9	
18	3	1	1	1	139	4118	2.462	2.532	2.7	5.5	11.9	
19	3	1	1	1	139	4118	2.430	2.538	4.2	5.4	11.2	
20	3	1	1	1	139	4118	2.369	2.531	6.4	5.5	11.3	
21	3	1	1	1	139	4138	2.462	2.522	2.4	6.0	11.6	Vaihto
22	3	1	1	1	139	4138	2.455	2.531	3.0	5.5	11.9	Vaihto
23	3	1	1	1	139	4138	2.484	2.520	1.4	5.7	12.0	Vaihto
24	3	1	1	1	139	4138	2.390	2.544	6.1	5.0	11.8	Vaihto
25	3	1	1	1	139	4210	2.429	2.520	3.6	5.6	12.6	
26	3	1	1	1	139	4210	2.437	2.519	3.2	5.8	11.6	
27	3	1	1	1	139	4210	2.469	2.509	1.6	6.5	11.7	
28	3	1	1	1	139	4210	2.412	2.521	4.3	5.9	12.2	
29	3	1	1	1	139	4242	2.418	2.540	4.8	5.2	11.5	Vaihto
30	3	1	1	1	139	4242	2.424	2.541	4.6	5.3	12.0	Vaihto
31	3	1	1	1	139	4242	2.475	2.505	1.2	6.1	12.2	Vaihto
32	3	1	1	1	139	4242	2.368	2.531	6.4	5.6	11.8	Vaihto

### 5.2.3 VT 4 tieosa 364

Valtatien 4:n kohde oli tieosalla 364 ja sen pituus oli 6,1 km. Päälystetyyppi oli SMA 22-massaa, joten tällä kohteella maksimiraekoko oli muita koekohteita suurempi. Siksi myös massamäärä oli suurempi (120 kg/m<sup>2</sup>), työmenetelmänä oli massapintausta. Kohteella työskenneltiin heinäkuun alusta heinäkuun loppuun. Kohde oli 2-ajoratainen ja 4-kaistainen. Ajokaistan leveys kohteella oli 4 m. Kohteen ohituskaistoja ei päällystetty yhtä pitkältä matkalta [9].



Kuva 21. Poranäytteiden tulokset valtatiellä 4 (kuorman vaihtokohdat laatikoitu) [9].

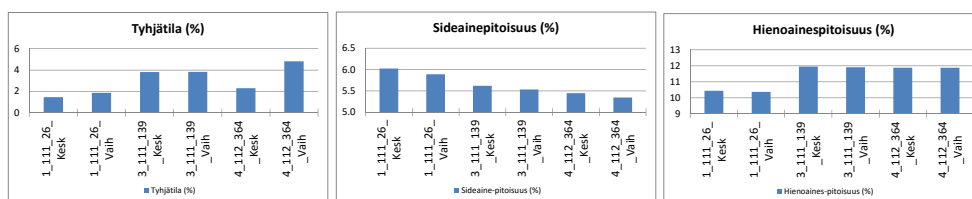
Poranäytteiden perusteella kuorman keskeltä ja vaihtumiskohdista otettujen näytteiden välillä ei näyttänyt olevan kovin suuria eroja (Kuva 21). Matalia tiheyksiä ja korkeita tiheyksiä oli molemmissa ottokohdissa. Kuormanvaihtokohdissa tyhjätila oli hiukan suurempi kuin kuorman keskellä. Sideainepitoisuudessa ja hienoainepitoisuudessa ei havaittu kovin suuria eroja ottokohtien suhteen.

Taulukko 9. Poranäytteiden tutkimustulokset valtatiellä 4 [9].

Näyte	Tie	Ajorata	Suunta	Kaista	Osa	Etäisyys (m)	Kappalettiheisyys (Mg/m3)	Maksimi-tiheys (Mg/m3)	Tyhjättila (%)	Sideainepitoisuus (%)	Hienoainepitoisuus (%)	Ottokohta
1	4	1	1	2	364	4485	2.587	2.743	5.7	5.1	11.3	Vaihto
2	4	1	1	2	364	4485	2.529	2.735	7.5	5.3	12.0	Vaihto
3	4	1	1	2	364	4485	2.535	2.728	7.1	5.4	12.0	Vaihto
4	4	1	1	2	364	4485	2.589	2.764	6.3	5.1	11.5	Vaihto
5	4	1	1	2	364	4503	2.576	2.724	5.4	5.0	11.9	
6	4	1	1	2	364	4503	2.577	2.727	5.5	5.1	11.9	
7	4	1	1	2	364	4503	2.615	2.727	4.1	5.9	12.3	
8	4	1	1	2	364	4503	2.556	2.731	6.4	5.2	11.9	
9	4	1	1	2	364	4522	2.617	2.696	2.9	5.8	12.8	Vaihto
10	4	1	1	2	364	4522	2.613	2.738	4.6	5.5	12.5	Vaihto
11	4	1	1	2	364	4522	2.566	2.752	6.8	5.5	11.8	Vaihto
12	4	1	1	2	364	4522	2.535	2.754	8.0	5.1	11.4	Vaihto
13	4	1	1	2	364	4539	2.568	2.706	5.1	5.5	12.4	
14	4	1	1	2	364	4539	2.720	2.754	1.2	5.4	12.1	
15	4	1	1	2	364	4539	2.704	2.731	1.0	4.4	8.3	
16	4	1	1	2	364	4539	2.708	2.749	1.5	5.1	11.2	
17	4	1	1	2	364	4554	2.694	2.682	-0.5	6.2	13.3	
18	4	1	1	2	364	4554	2.742	2.745	0.1	5.5	12.3	
19	4	1	1	2	364	4554	2.703	2.727	0.9	5.4	12.3	
20	4	1	1	2	364	4554	2.661	2.711	1.8	6.0	13.0	
21	4	1	1	2	364	4567	2.659	2.748	3.3	5.5	12.0	Vaihto
22	4	1	1	2	364	4567	2.648	2.747	3.6	5.4	12.1	Vaihto
23	4	1	1	2	364	4567	2.732	2.748	0.6	5.5	12.3	Vaihto
24	4	1	1	2	364	4567	2.685	2.760	2.7	4.7	10.8	Vaihto
25	4	1	1	2	364	4582	2.714	2.741	1.0	5.5	12.1	
26	4	1	1	2	364	4582	2.782	2.741	-1.5	5.3	12.3	
27	4	1	1	2	364	4582	2.705	2.781	2.7	6.4	10.2	
28	4	1	1	2	364	4582	2.704	2.759	2.0	5.2	12.6	
29	4	1	1	2	364	4602	2.660	2.821	5.7	6.0	11.5	Vaihto
30	4	1	1	2	364	4602	2.656	2.851	6.8	5.1	11.7	Vaihto
31	4	1	1	2	364	4602	2.682	2.768	3.1	5.4	11.7	Vaihto
32	4	1	1	2	364	4602	2.713	2.779	2.4	5.1	12.7	Vaihto

## 5.2.4 Yhteenveto

Lämpökamerakohteiden näytetutkimusten mukaan tyhjätila oli suurempi kuorman vaihtokohdissa kuin keskellä kuormaa. Poikkeuksen tästä teki VT 3 kohde, missä eroa ei havaittu. Sideainepitoisuus vaihteli eri päällystetyypeillä, mutta oli kuorman vaihtumiskohdissa pienempi kuin keskellä kuormaa. Näytteenottokohta ei vaikuttanut hienoainepitoisuuksiin (Kuva 22).



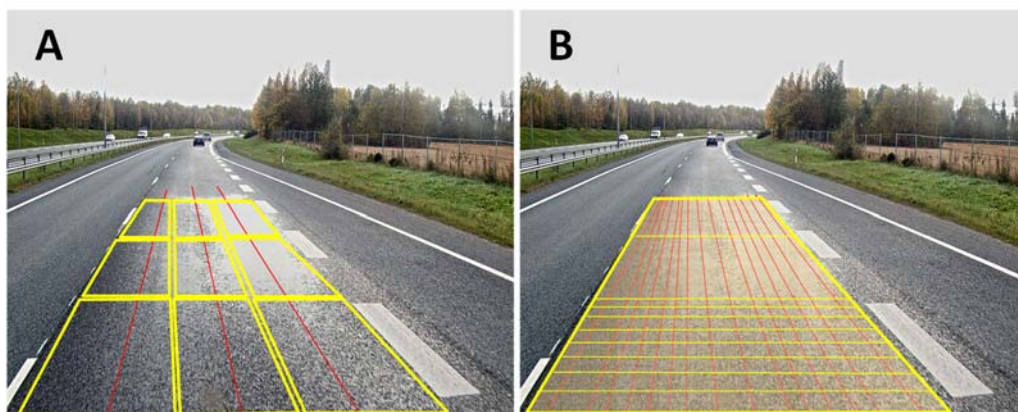
Kuva 22. Lämpökamerakohteiden näytetutkimusten tulokset [9] (Kesk=kuorman keskellä, Vaih=kuorman vaihtumiskohta).

## 6 Tunnuslukujen mittaamisen ja laskennan määrittäminen

### 6.1 Bitumin pintaan nousu

#### 6.1.1 Mittausperiaate

Päällysteen suljetun pinnan eli bitumin pintaan nousun mittaaminen perustui PTM-mittaukseen. Mittaamisessa testattiin kahta mittaamenetelmää. Toinen menetelmä (A) perustui makrolaserantureiden (64 kHz) tuottamaan informaatioon ja toinen (B) perustui kaikkien antureiden tuottamaan informaatioon.



Kuva 23. Mittausmenetelmät A (3 linjaa) ja B (15 linjaa).

Mittaus tapahtuu pituussuunnassa jatkuvana. Menetelmien poikkisuunnassa tapahtuvat erot ovat seuraavat:

- Menetelmässä A mittaus tapahtuu poikkisuunnassa kolmella anturilla siten, että on kolme mittaussinjaa, ajourien keskeltä ja niiden välistä.
- Menetelmässä B mittaus tapahtuu 15+2 anturilla. Reunaviivojen vaikutuksen eliminoimiseksi kahden uloimman anturin (1 & 17) mittaustiedot jätetään käyttämättä, jolloin käyttöön jäävät anturit 2–16. Etupalkin antureiden lisäksi käytetään myös takapalkin kahta anturia, jotka sijaitsevat etupalkin antureiden 5 ja 13 kohdilla.

#### 6.1.2 Tunnusluvut

Välitunnuslukuna bitumin pintaan nousun mittaamisessa käytetään makrokarkeutta (MPD). Makrokarkeus lasketaan kultakin anturilta standardin ISO 13473 mukaisesti. Mittaustavassa B suoritetaan 16 kHz antureille *dynaaminen korjaus*, joka saadaan antureiden 5/18 ja 13/19 tuottamien tulosten suhteiden avulla. Dynaaminen korjaus tarvitaan eri taajuuksilla mitaavien antureiden yhtenäistämiseksi ja MPD:n standardin mukaisuuden säilyttämiseksi. Dynaaminen korjaus voidaan tehdä joko jatkuvana tai tieosakohtaisena.

Tunnusluvun laskentaperiaate mittauksessa A:

- Mittausmenetelmässä A kunkin anturin tulos muunnetaan binäärisiksi tunnusluvuksi (1 tai 0) sen mukaan alittuuko kriittinen raja-arvo vai ei.
- Jos se alittuu, tunnusluku saa arvon 1 ja jos se ei alitu, tunnusluku saa arvon 0.
- Poikkileikkauksessa on kolme metrin levyistä kaistaa, joiden pinta-alat kerrotaan saaduilla binäärisillä luvuilla.
- Lopullinen tunnusluku bitumin pintaan nousulle on saatujen metrin levyisten kaistojen yhteen laskettu pinta-ala kaistan pituusmetriä kohti.

Tunnusluvun laskentaperiaate mittauksessa B:

- Mittausmenetelmässä B pituussuuntaisia kaistoja on 15 kpl.
- Kaistan kokonaisleveys leveys, 3 m, jaetaan 15 osaan antureiden välisiä etäisyyksiä käyttäen ja saadaan kullekin anturille sen vaikutusalue.
- 16 kHz antureille tehdään dynaaminen korjaus.
- Vaikutusalueen perusteella lasketaan vaikutuspinta-ala, joka kerrotaan edellisen menetelmän tapaan binäärisellä tunnusluvulla (1 tai 0) sen mukaan alittuuko kriittinen raja-arvo vai ei.
- Kriittinen raja-arvo kalibroidaan tosimitatestissä siten, että mitatut ja havaitut pinta-alat bitumin pintaan nousulle ovat mahdollisimman yhtenäiset.
- Lopullinen tunnusluku mittausmenetelmälle B oli pintaan nousseen bitumin pinta-ala kymmentä senttiä kohti kunkin anturin vaikutusalueella.

Tunnuslukujen C ja D laskentaperiaatteet:

- Tunnusluku C Lasketaan kuten B mutta keskiarvojen sijasta käytetään hajontoja.
- Tunnusluku D muodostetaan B:n ja C:n yhdistelmänä.

### 6.1.3 Mittauksen suhde tosimitaan

Bitumin pintaan nousun määrän mittaamista verrattiin tosimitaan, joka oli määritetty silmämääräisesti valokuvista. Tosimittaa varten valittiin 35 kohtaa uusilta päällysteiltä valtatieltä 3. Niille määritettiin oheisen kuvan kaltaiset alueet, joilla havaittiin bitumin pintaan nousua. Alueet ruudutettiin 40 cm kokoisiin ruutuihin ja ne käsiteltiin 3 m pituisina kohtina. Kullekin 3 m pituiselle osuudelle määritettiin silmämääräisesti pinta-ala, jolla oli bitumin pintaan nousua.



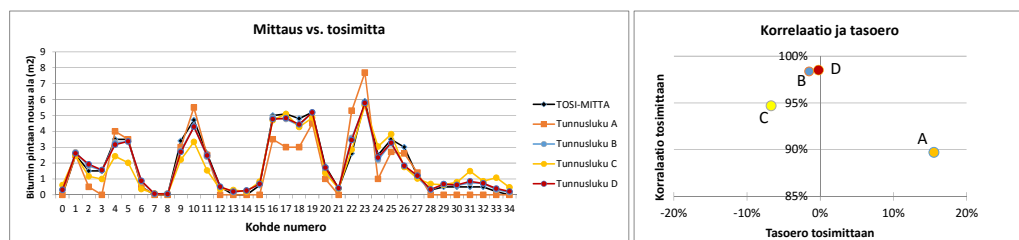
Kuva 24. Esimerkki bitumin pintaan nousun tosimitan määrittämisestä (Destia 2016).

Kummankin mittausmenetelmän tulosta verrattiin tosimitaan laskemalla niiden erotukset tosimitoista. Erotuksista otettiin neliöt ja niiden summaa minimoitiin kriittistä raja-arvoa muuttamalla. Kummallekin mittausmenetelmälle saatiin oma kriittinen raja-arvonsa, jolla virhe tosimitaan minimoitui. Menetelmälle A se oli 0,73 mm ja menetelmälle B 0,66 mm. Menetelmän A mittaustuloksen tasoero tosimitaan oli  $0,3 \text{ m}^2/9\text{m}^2 = 3,4 \%$  ja sen korrelaatio oli 89,7%. Menetelmän B tasoero tosimitaan oli  $0,02 \text{ m}^2/9\text{m}^2 = 0,2 \%$  ja sen korrelaatio oli 98,3%. Menetelmä B oli siten paremman resoluutionsa ansiosta lähempänä tosimittaa kuin menetelmä A. Kriittiset raja-arvot määritettiin SMA 16 päällysteelle. Muita päällystystyyppejä ei tarkasteltu ja siksi ei voida olla varmoja siitä toimisivatko saadut raja-arvot muilla päällystetyypeillä.

Menetelmällä B tasoeron lineaarisuutta mittaava kulmakerroin oli lähempänä ykköstä kuin menetelmällä A. Menetelmä A aliennusti bitumin pintaan nousun pinta-ala tosimitan pienillä arvoilla ja vastaavasti yliennusti sen suurilla arvoilla. Menetelmällä B lineaarisuusvirhe oli pienempi.

Tunnusluvun C vastaavuus tosimitan kanssa oli parempi kuin A:n mutta huonompi kuin B:n. Tunnusluvun D vastaavuus tosimitan kanssa oli paras, mutta vain marginaalisesti ja tunnusluvun B valintaa puolsi sen laskennan yksinkertaisuus.

Johtopäätöksenä tosimitatestistä voitiin todeta, että menetelmä B oli parempi kuin menetelmä A bitumin pintaan nousun mittaamiseen. Jos menetelmää A pidetään tyydyttävänä mittausmenetelmänä, niin menetelmä B on erittäin hyvä mittausmenetelmä. Menetelmän B tunnuslukuista suositeltavin tunnusluku oli B.

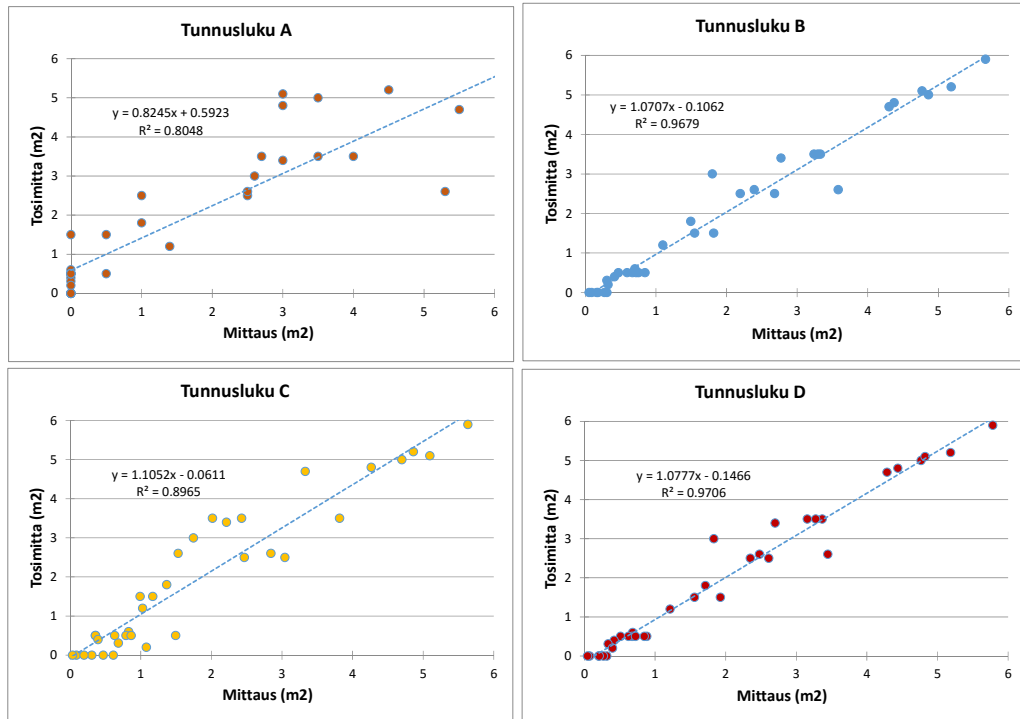


Kuva 25. Bitumin pintaan nousun mittausmenetelmien vertailu tosimitaan.

Taulukko 10. Tosimittatesti menetelmille A ja B.

Ruutu	TOSI-MITTA	Mittaus A			Mittaus B		
		A	ero	ero <sup>2</sup>	B	ero	ero <sup>2</sup>
0	0	0.0	0.00	0.00	0.4	0.38	0.14
1	2.5	2.5	0.00	0.00	2.7	0.24	0.06
2	1.5	0.5	1.00	1.00	1.9	0.43	0.18
3	1.5	0.0	1.50	2.25	1.7	0.17	0.03
4	3.5	4.0	-0.50	0.25	3.3	-0.17	0.03
5	3.5	3.5	0.00	0.00	3.4	-0.08	0.01
6	0.5	0.5	0.00	0.00	0.9	0.38	0.15
7	0	0.0	0.00	0.00	0.1	0.07	0.01
8	0	0.0	0.00	0.00	0.1	0.11	0.01
9	3.4	3.0	0.40	0.16	2.8	-0.61	0.37
10	4.7	5.5	-0.80	0.64	4.4	-0.34	0.12
11	2.6	2.5	0.10	0.01	2.5	-0.13	0.02
12	0.5	0.0	0.50	0.25	0.5	0.00	0.00
13	0	0.0	0.00	0.00	0.2	0.20	0.04
14	0	0.0	0.00	0.00	0.3	0.29	0.08
15	0.6	0.0	0.60	0.36	0.8	0.17	0.03
16	5	3.5	1.50	2.25	4.9	-0.12	0.01
17	5.1	3.0	2.10	4.41	4.8	-0.28	0.08
18	4.8	3.0	1.80	3.24	4.4	-0.39	0.15
19	5.2	4.5	0.70	0.49	5.2	0.00	0.00
20	1.8	1.0	0.80	0.64	1.5	-0.25	0.06
21	0.4	0.0	0.40	0.16	0.5	0.05	0.00
22	2.6	5.3	-2.70	7.29	3.7	1.07	1.15
23	5.9	7.7	-1.80	3.24	5.8	-0.12	0.01
24	2.5	1.0	1.50	2.25	2.3	-0.20	0.04
25	3.5	2.7	0.80	0.64	3.3	-0.19	0.04
26	3	2.6	0.40	0.16	1.9	-1.13	1.27
27	1.2	1.4	-0.20	0.04	1.1	-0.10	0.01
28	0.3	0.0	0.31	0.09	0.4	0.05	0.00
29	0.5	0.0	0.50	0.25	0.7	0.18	0.03
30	0.5	0.0	0.50	0.25	0.7	0.17	0.03
31	0.5	0.0	0.50	0.25	0.8	0.27	0.08
32	0.5	0.0	0.50	0.25	0.8	0.27	0.08
33	0.2	0.0	0.20	0.04	0.3	0.14	0.02
34	0	0.0	0.00	0.00	0.2	0.16	0.03
Keskim	1.95	1.65	0.30	30.9	1.97	0.02	4.4
Korrelaatio		89.7 %			98.3 %		
Raja-arvo	0.727				0.662		





Kuva 26. Tunnuslukujen ja tosimitan väliset korrelaatiot.

Mittausmenetelmällä B saadut makrokarkeuskeskiarvot näyttävät sopivan hyvin yhteen visuaalisten havaintojen kanssa (Kuva 27). Dynaamisesti korjatut MPD-arvot muodostavat puna-viherskaalalla hyvin samanmuotoisia kuvioita kuin mitä valokuvista on havaittavissa.

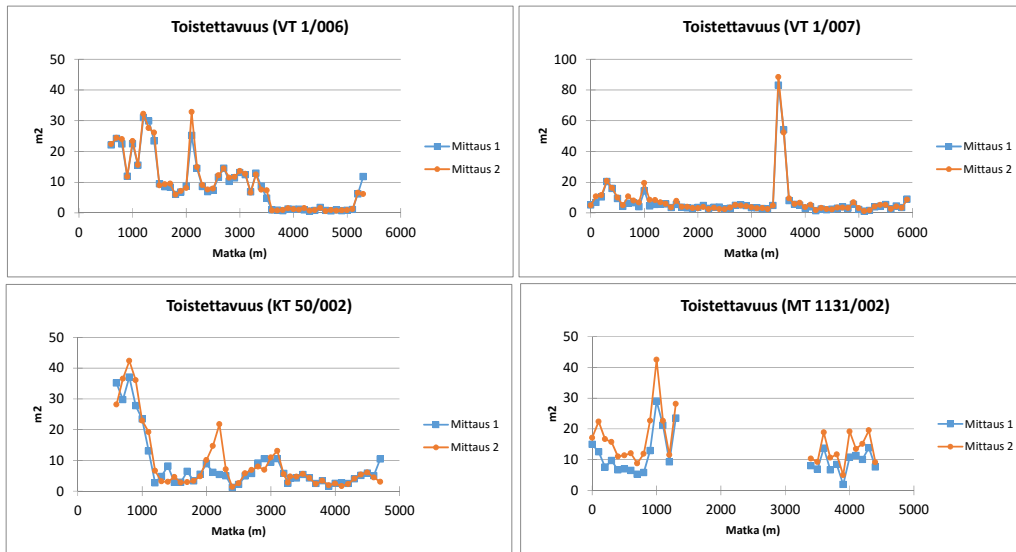


Kuva 27. Esimerkkejä mittausmenetelmällä B saaduista makrokarkeuksista kohdissa, joissa on selvästi bitumia nousut päällysteen pintaan (Destia Oy 2016).

#### 6.1.4 Toistettavuus

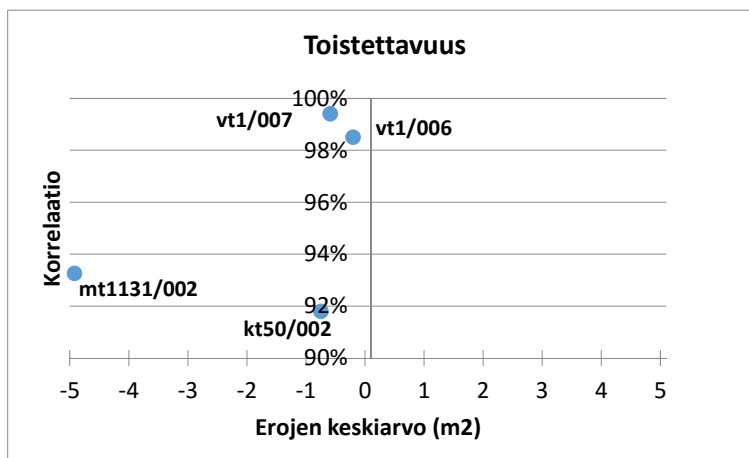
Bitumin pintaan nousun mittaamisen toistettavuutta tarkasteltiin neljältä kohteelta tehtyjen toistomittausten avulla. Kohteet olivat vt1 osat 6 ja 7, kt 50 osa 2 ja mt 1131 osa 2 ja niiden yhteispituus oli noin 17 km. Tunnusluvuksi valittiin tosimitatestissä saatu parempi tunnusluku B, jonka laskennassa käytettiin tosimitatestissä kalibroitua raja-arvoa 0,66 mm. Suljetun pinnan ala summattiin 100 m tarkastelujaksoille.

Suljetun pinnan mittauksen toistettavuus oli graafisina kuvina tarkastellen hyvä (Kuva 28). Toistettavuus oli paras valtatiekohteilla ja huonoin maantiekohteella. Kehä III:n kohteella toistettavuus oli pääosin hyvä muutamaa yksittäistä havaintoa lukuun ottamatta.



Kuva 28. Päällysteen suljetun pinnan mittauksen toistettavuus.

Toistettavuuksien korrelaatiot olivat valtatiekohteilla erittäin hyviä ja muilla kohteilla hyviä (Kuva 29). Maantiellä 1131 mittauskerroilla oli muista poikkeava tasoero, jossa kakkosmittauksessa saatiin keskimäärin 5 m<sup>2</sup> suurempia arvoja kuin ykkösmittauksessa. Muilla kohteilla mittausten välinen tasoero oli alle 1 m<sup>2</sup>.



Kuva 29. Päällysteen suljetun pinnan mittauksen toistokorrelaatiot.

Tulosten perusteella on pääteltävissä, että suljetun pinnan mittaaminen on tarkinta vilkasliikenteisten teiden SMA 16 päällysteillä. Tämä saattaa johtua siitä, että tunnuslukujen kalibrointi tehtiin tosimitattestissä käyttäen valtatieä (vt 3/017).

## 6.2 Purkauma

### 6.2.1 Mittausperiaate

Päällysteen purkautuneen pinta-alan mittaaminen tapahtuu PTM-laitteella. Mittaamisessa testattiin kahta mittausmenetelmää. Toinen menetelmä (A) perustui makrolaserantureiden tuottamaan informaatioon ja toinen (B) perustui kaikkien antureiden tuottamaan informaatioon.

Mittaus tapahtuu pituussuunnassa jatkuvana. Menetelmien poikkisuunnassa tapahtuvat erot ovat seuraavat:

- Menetelmässä A mittaus tapahtuu poikkisuunnassa kolmella anturilla siten, että mittaus tapahtuu ajourien keskeltä ja niiden välistä.
- Menetelmässä B mittaus tapahtuu 15+2 anturilla. Reunaviivojen vaikutuksen eliminoimiseksi kahden uloimman anturin (1 & 17) mittaustiedot jätetään käyttämättä, jolloin käyttöön jäävät anturit 2–16. Etupalkin antureiden lisäksi käytetään myös takapalkin kahta anturia, jotka sijaitsevat etupalkin antureiden 5 ja 13 kohdilla.

Purkauman mittausmenetelmät ja tunnusluvut perustuvat samaan periaatteeseen kuin mitä bitumin pintaan nousun mittaamisesta esitettiin.

### 6.2.2 Tunnusluvut

Välitunnuslukuna päällysteen purkauman mittaamisessa käytetään makrokarkeutta (MPD). Mittaustavassa B suoritetaan 16 kHz antureille *dynaaminen korjaus*, joka saadaan antureiden 5/18 ja 13/19 tuottamien tulosten suhteiden avulla. Dynaaminen korjaus tarvitaan eri taajuuksilla mitaavien antureiden yhtenäistämiseksi ja MPD:n standardinmukaisuuden säilyttämiseksi. Dynaaminen korjaus voidaan tehdä joko jatkuvana tai tieosakohtaisena.

Tunnusluvun laskentaperiaate mittauksessa A:

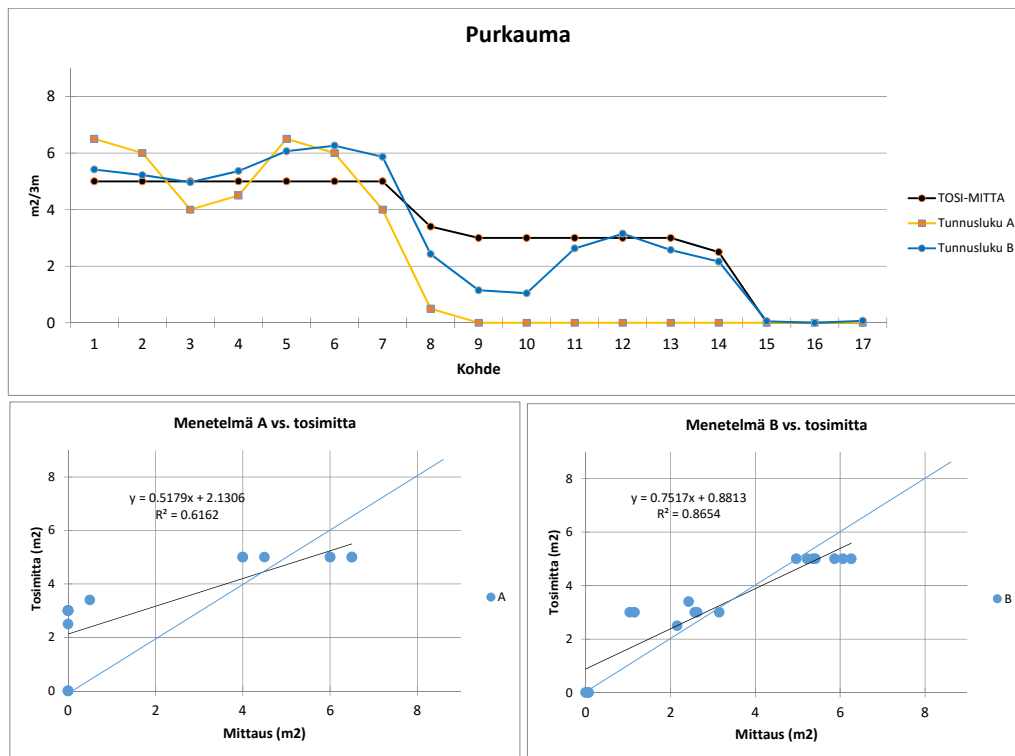
- Mittausmenetelmässä A kunkin anturin tulos muunnetaan binäärisiksi tunnusluvuksi (1 tai 0) sen mukaan ylittyykö kriittinen raja-arvo vai ei.
- Jos se ylittyy, saa tunnusluku arvon 1 ja jos se ei ylity, tunnusluku saa arvon 0.
- Poikkileikkauksessa on kolme metrin levyistä kaistaa, joiden pinta-alat kerrotaan saaduilla binäärisillä luvuilla.
- Kriittinen raja-arvo kalibroidaan tosimitatestissä siten, että mitatut ja havaitut purkautuneet pinta-alat ovat mahdollisimman yhtenäiset (erojen neliöiden summan minimi).
- Lopullinen tunnusluku purkaumalle on saatujen metrin levyisten kaistojen yhteen laskettu pinta-ala kaistan pituusmetriä kohti (joka luonnollisesti summataan pidemmille tarkastelujaksoille tilanteen mukaan).

Tunnusluvun laskentaperiaate mittauksessa B:

- Mittausmenetelmässä B pituussuuntaisia kaistoja on 15 kpl.
- Kaistan kokonaisleveys leveys, 3 m, jaetaan 15 osaan antureiden välisiä etäisyyksiä käyttäen ja saadaan kullekin anturille sen vaikutusalue.
- Vaikutusalueen perusteella lasketaan vaikutuspinta-ala, joka kerrotaan edellisen menetelmän tapaan binäärisellä tunnusluvulla (1 tai 0) sen mukaan ylittyykö kriittinen raja-arvo vai ei.
- Kriittinen raja-arvo kalibroidaan tosimitatestissä siten, että mitatut ja havaitut purkautuneet pinta-alat ovat mahdollisimman yhtenäiset (erojen neliöiden summan minimi).
- Lopullinen tunnusluku mittausmenetelmälle B oli purkautunut pinta-ala kymmentä senttiä kohti (joka luonnollisesti summataan pidemmille tarkastelujaksoille tilanteen mukaan).

### 6.2.3 Tosimitta

Purkauman määrän mittaamista verrattiin tosimitaan, joka oli määritetty silmämääräisesti valokuvista. Tosimittaa varten valittiin 17 kohtaa uusilta päällysteiltä valtatieltä 3. Niille määritettiin oheisen kuvan kaltaiset alueet, joilla havaittiin purkaumaa. Alueet ruudutettiin 40 cm kokoisiin ruutuihin ja ne käsiteltiin 3 m pituisina kohtina. Kullekin 3 m pituiselle osuudelle määritettiin silmämääräisesti pinta-ala, joka oli purkautunut.



Kuva 30. Purkauman mittausmenetelmien suhde tosimitaan.

Kummankin mittausmenetelmän tulosta verrattiin tosimitaan laskemalla niiden erotukset tosimitoista. Erotuksista otettiin neliöt ja niiden summaa minimoitiin kriittistä raja-arvoa muuttamalla. Kummallekin mittausmenetelmälle saatiin oma kriittinen raja-arvonsa, jolla virhe tosimitaan minimoitui (Taulukko 11). Menetelmälle A se oli 1,94 mm ja menetelmälle B 1,75 mm. Menetelmän A mittaustuloksen tasoero tosimitaan oli keskimäärin  $1,1 \text{ m}^2/9\text{m}^2 = 12 \%$  ja sen korrelaatio tosimitaan oli 78,5%. Menetelmän B tasoero tosimitaan oli  $-0,08 \text{ m}^2/9\text{m}^2 = -1\%$  ja sen korrelaatio tosimitaan oli 93%. Menetelmä B oli siten paremman resoluutionsa ansiosta lähempänä tosimittaa kuin menetelmä A. Kriittiset raja-arvot määritettiin SMA 16 päällysteelle. Muita päällystystyyppejä ei tarkasteltu ja siksi ei voida olla varmoja siitä toimisivatko saadut raja-arvot muilla päällystetyypeillä.

Menetelmällä B tasoeron lineaarisuutta mittaava kulmakerroin oli lähempänä ykköstä kuin menetelmällä A. Menetelmä A aliennusti purkauman määrää tosimitan pienillä arvoilla ja vastaavasti yliennusti sen suurilla arvoilla. Menetelmällä B lineaarisuusvirhe oli pienempi (Kuva 25).

Johtopäätöksenä tosimittestistä voitiin todeta, että menetelmä B oli parempi kuin menetelmä A purkauman mittaamiseen. Menetelmä A oli resoluutioltaan liian huono purkauman luotettavaan tunnistamiseen.

Taulukko 11. Tosimittatesti ja raja-arvon kalibrointi purkauman mittausmenetelmille.

Ruutu	TOSI-MITTA	Tunnusluku A			Tunnusluku B		
		A	ero	ero <sup>2</sup>	B	ero	ero <sup>2</sup>
0	5.0	6.5	-1.500	2.250	5.4	0.418	0.175
1	5.0	6.0	-1.000	1.000	5.2	0.220	0.048
2	5.0	4.0	1.000	1.000	5.0	-0.032	0.001
3	5.0	4.5	0.500	0.250	5.4	0.364	0.132
4	5.0	6.5	-1.500	2.250	6.1	1.066	1.136
5	5.0	6.0	-1.000	1.000	6.3	1.264	1.598
6	5.0	4.0	1.000	1.000	5.9	0.868	0.753
7	3.4	0.5	2.900	8.410	2.4	-0.970	0.941
8	3.0	0.0	3.000	9.000	1.2	-1.848	3.415
9	3.0	0.0	3.000	9.000	1.0	-1.956	3.826
10	3.0	0.0	3.000	9.000	2.6	-0.372	0.138
11	3.0	0.0	3.000	9.000	3.2	0.150	0.022
12	3.0	0.0	3.000	9.000	2.6	-0.426	0.181
13	2.5	0.0	2.500	6.250	2.2	-0.340	0.116
14	0.0	0.0	0.000	0.000	0.1	0.054	0.003
15	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.000	0.000
16	0.0	0.0	0.000	0.000	0.1	0.072	0.005
	Keskim	2.24	1.053	4.024	3.20	-0.086	0.735
	Korrelaatio			78.5 %			93.0 %
	Raja-arvo	1.94				1.75	

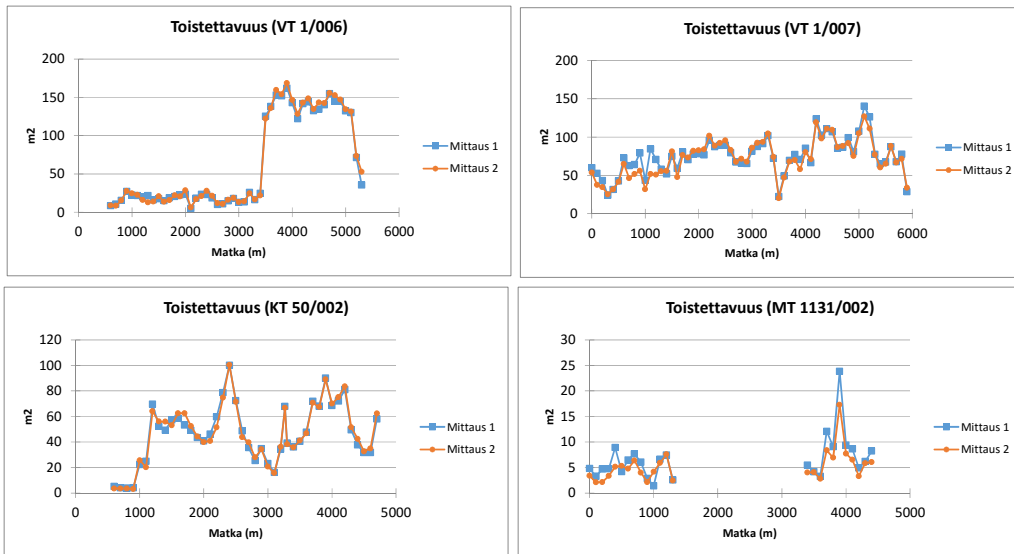


Kuva 31. Esimerkki mittausmenetelmällä B saaduista makrokarkeuksista kohdissa, joissa on selvästi purkautunutta päällystettä (sininen alue) ja bitumia nousut päällysteen pintaan (punaiset alueet) (Destia Oy 2016).

#### 6.2.4 Toistettavuus

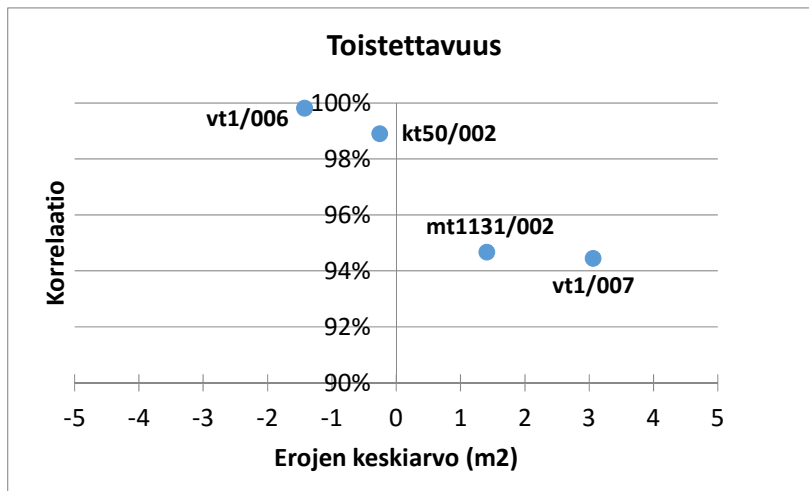
Päällysteen avoimen pinnan mittauksen toistettavuutta tarkasteltiin samojen kohteiden mittauksista, joita käytettiin päällysteen suljetun pinnan mittauksen toistettavuusanalyseissä (VT1 osat 6 ja 7, KT 50 osa 2 ja MT 1131 osa 2). Tunnusluvuksi valittiin tosimitatestissä saatu parempi tunnusluku B, jonka laskennassa käytettiin tosimitatestissä kalibroitua raja-arvoa 1,75 mm. Avoimen pinnan ala summattiin 100 m tarkastelujaksoille.

Avoimen pinnan mittauksen toistettavuus oli graafisina kuvina tarkastellen hyvä (Kuva 32). Toistettavuus oli paras valtatie 1 tieosalla 6 ja huonoin maantiekohteella 1131. Toistettavuudet olivat kuitenkin graafisesti tarkasteltuna hyviä.



Kuva 32. Päällysteen avoimen pinnan mittaamisen toistettavuus.

Toistettavuuksien korrelaatiot olivat valtatieen kuutostieosalla ja Kehä III:n kakkos-  
tieosalla erittäin hyviä ja muilla kohteilla hyvät (Kuva 33). Toistomittausten tasoerot  
olivat muilla kohteilla paitsi valtatieen 1 osalla 7 alle 2 m<sup>2</sup>. Tieosalla 7 tasoero oli hiukan  
suurempi, keskimäärin 3m<sup>2</sup>.



Kuva 33. Päällysteen avoimen pinnan toistomittausten korrelaatiot ja tasoerot.

## 7 Pilotointi

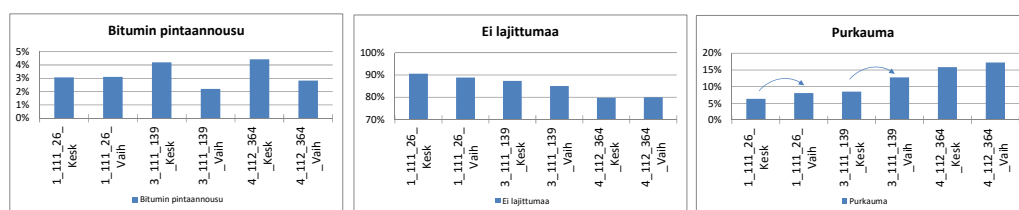
### 7.1 Lämpökamerakohteet

#### 7.1.1 VT 1 – VT 3 – VT 4

Pilottimittauksia tehtiin aiemmin esillä olleille Niklas Nevalaisen diplomityössä esitellyille lämpökameralla mitatuille kohteille. (Kuva 34). Päälysteet olivat mittaushetkellä (lokakuu 2016) noin kolme vuotta vanhoja. Tuloksia tarkasteltiin niistä kohdista, joista oli otettu näytteitä. Näytteet niputettiin kahteen ryhmään ottokohtan mukaan. Lajittumat tunnistettiin samoissa kohdissa kuin näytteet oli otettu, mutta noin viiden metrin matkalta ( $\pm 2,5$  m). Tarkastelussa kiinnosti lähinnä se, vaikuttiko lämpökameralla todettu näytteiden ottokohta lajittumien määriin.

Näytteenottokohta (kuorman vaihtumiskohta vs. kuorman keskeltä) vaikutti bitumin pintaan nousua vähentävästi VT 3 ja VT 4 kohteilla, mutta ei VT 1-kohteella. Ottokohta vaikutti eniten purkauman määriin, ts. purkauman määrä kasvoi kun näytteenottokohta oli kuorman vaihtumiskohdissa verrattuna kuorman keskikohtiin. Tämä havaittiin kaikilla kohteilla.

Kun tarkasteltiin molempia lajittumavirheitä yhdessä muodostamalla lajittumatonta päällystettä sisältävä määrä ”ei lajittumaa”, niin voitiin todeta, että se oli suurempi kuorman keskeltä otettujen näytteiden kohdilla kuin kuorman vaihtumiskohdista otettujen näytteiden kohdilla. Kuorman vaihtumiskohdissa lajittuman osuus oli siis hiukan suurempi kuin kuorman keskellä. Vaihtumiskohtien lajittumavirhe oli pääasiassa purkaumaa. Bitumin pintaan nousun kohdalla osuudet olivat toisinpäin eli sitä oli enemmän kuormien keskikohdissa kuin vaihtumiskohdissa. On kuitenkin huomioitava, että lajittumien mittaus perustui mittaukseen, jolloin päällyste oli jo 3 vuotta vanhaa.

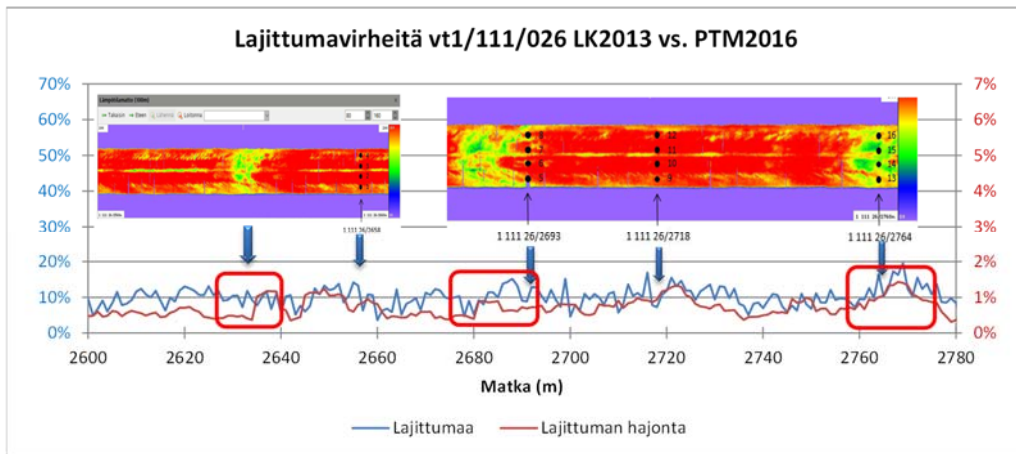


Kuva 34. Lajittumien tunnistus PTM-datasta 2016 lämpökameralla 2013 mitatuilla kohteilla.

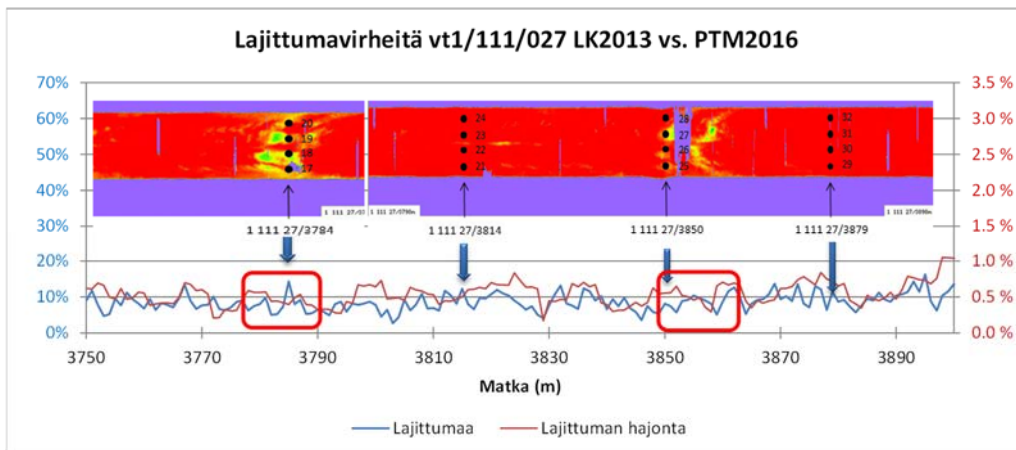
Kuvissa 35 ja 36 on esitetty vuonna 2013 otettuja lämpökamerakuvia [9] ja vuoden 2016 tehtyjen PTM-mittausten avulla laskettu lajittuma valtatieltä 1. Lajittumaan on laskettu sekä bitumin pintaan nousu että purkauma yhteensä pinta-alan prosentteina yhden metrin matkalta. Mitatun lajittuman osuus oli keskimäärin 10 % ja se vaihteli 5–15 % välillä.

Lämpökamerakuvat on sijoitettu ja skaalattu siten, että paalut täsmäyvät vaaka-akselin matkalukemien kanssa. Lämpökamerakuvista nähdään kuormien vaihtumiskohtat, joita oli tieosan 26 kuvassa 3 kpl ja tieosan 27 kuvassa 2 kpl. Tieosalla 26 nähdään, että kuorman vaihtumiskohdassa on selvä kohouma lajittumaosuudessa sekä

sen hajonnassa, mutta muilta osin mitattu lajittuma ei näytä korreloivan lämpökameralla otettujen kuorman vaihtumiskohtien kanssa.



Kuva 35. Lajittumavirheiden osuus  $1 \times 3 \text{ m}^2$  pinta-alasta ja sen  $3 \times 5 \text{ m}^2$  hajonta (PTM2016 /1m data) vs. lämpökamerakuvat (2013) valtatiellä 1 tieosalla 26.



Kuva 36. Lajittumavirheiden osuus  $1 \times 3 \text{ m}^2$  pinta-alasta ja sen  $3 \times 5 \text{ m}^2$  hajonta (PTM2016 /1m data) vs. lämpökamerakuvat (2013) valtatiellä 1 tieosalla 27.

Kuvissa 37 ja 38 on esitetty vuonna 2013 otettuja lämpökamerakuvia [9] ja vuoden 2016 tehtyjen PTM-mittausten avulla laskettu lajittuma valtatieltä 3. Lajittumaan on laskettu sekä bitumin pintaan nousu että purkauma yhteensä pinta-alan prosentteina yhden metrin matkalta. Mitatun lajittuman osuus oli keskimäärin 15 % ja se vaihteli 10-20 % välillä. Ylemmässä kuvassa oli lämpökamerakuvien perusteella kaksi kuorman vaihtumiskohtaa, joiden kummankaan vaikutusta ei mitatusta lajittumavirheestä erottanut.

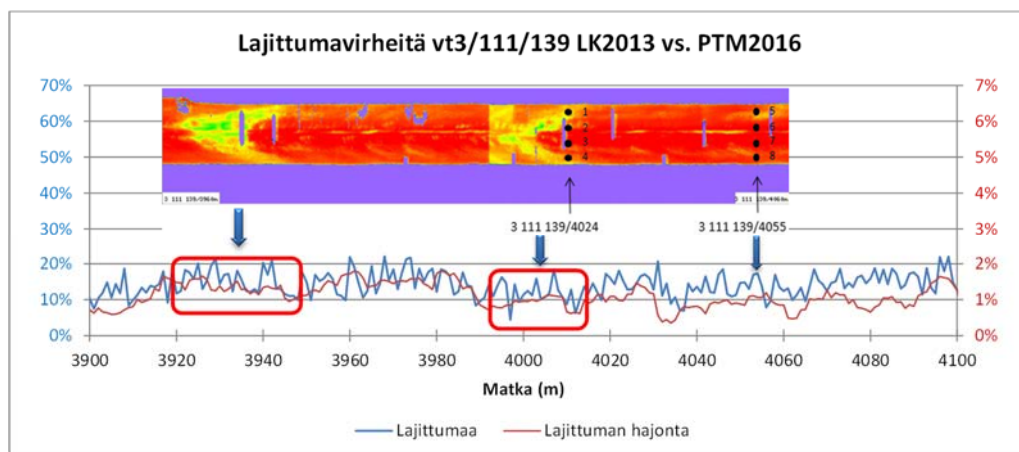
Alemmassa kuvassa oli vastaavasti kaksi kuorman vaihtumiskohtaa eikä niitäkään juuri mitatusta lajittumavirheiden käyrästä erottanut. Ensimmäisessä kuorman vaihtokohdassa (4094 m) lajittuman hajonta oli koholla (yli 1,5 %), joka hiukan indikoi poikkeuksellisista arvoista. Vastaavasti toisessa kuorman vaihtokohdassa (4138 m) lajittuman hajonta oli hyvin matalalla.



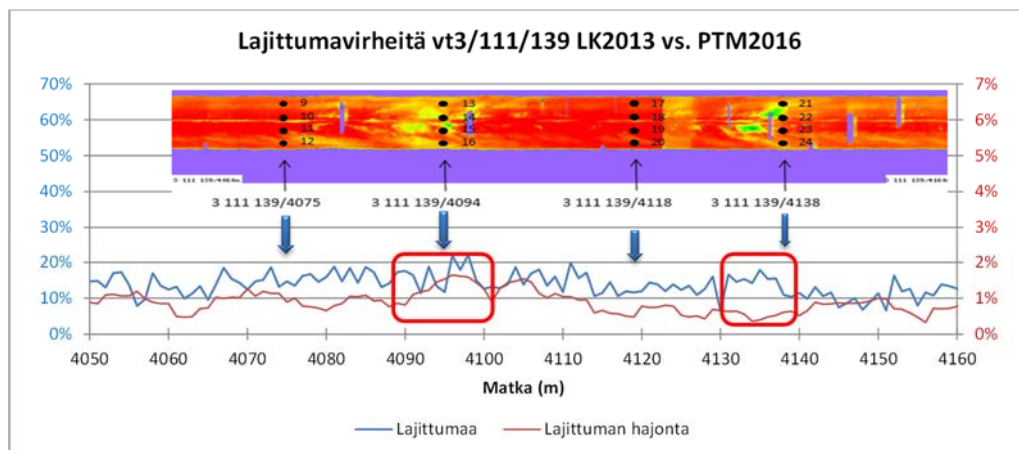
Mitatun lajittuman ja lämpökameralla kuvattujen kuorman vaihtumiskohtien välillä ei havaittu tämän tarkastelun perusteella olevan kovin merkittävää yhteyttä. Sen perusteella joudutaan tekemään jokin seuraavista johtopäätöksistä:

- Vuosina 2013 ja 2016 tehtyjä mittauksia ei voida verrata toisiinsa.
  - Visuaaliset havainnot maastossa tukevat sitä, että päällysteen lajittumavirheet säilyvät useita vuosia ja erityisesti purkaumat jopa kasvavat päällysteen vanhetessa.
- Lämpökameralla todetuissa kuorman vaihtumiskohdissa ei välttämättä synny lajittumavirheitä tai niiden haitallisuutta pystytään jyräyksellä vähentämään.
  - Onko todistettu, että kuorman vaihtumiskohdissa syntyy aina lajittumavirheitä?
- Makrokarkeuden perusteella ei voida mitata lajittumaa.
  - Tämä toteamus on ristiriidassa tämän tutkimuksen yhteydessä tehtyjen tosimitatestien kanssa, joiden perusteella päällysteen lajittumavirheitä juuri voidaan mitata makrokarkeuden avulla.

Epävarmimmaksi kohdaksi jäi keskimmäinen kohta eli ei voida olla varmoja, pitäisikö lämpökameralla todetuissa kuorman vaihtumiskohdissa olla aina lajittumavirheitä.

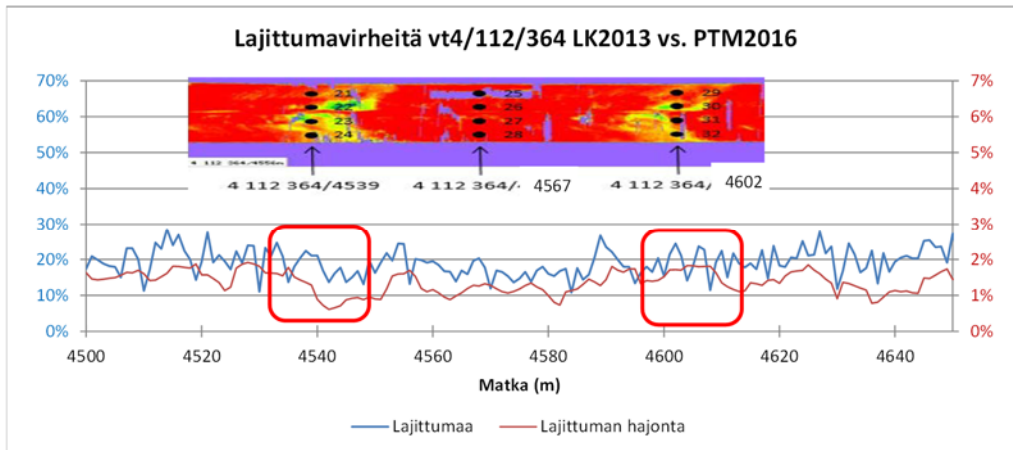


Kuva 37. Lajittumavirheiden osuus  $1 \times 3 \text{ m}^2$  pinta-alasta ja sen  $3 \times 5 \text{ m}^2$  hajonta (PTM2016 /1m data) vs. lämpökamerakuvat (2013) valtatiellä 3 tieosalla 139.



Kuva 38. Lajittumavirheiden osuus  $1 \times 3 \text{ m}^2$  pinta-alasta ja sen  $3 \times 5 \text{ m}^2$  hajonta (PTM2016 /1m data) vs. lämpökamerakuvat (2013) valtatiellä 3 tieosalla 139.

Kuvassa 39 on esitetty vuonna 2013 otettuja lämpökamerakuvia [9] ja vuoden 2016 tehtyjen PTM-mittausten avulla laskettu lajittuma valtatieltä 4. Lajittumaan on laskettu sekä bitumin pintaan nousu että purkauma yhteensä pinta-alan prosentteina yhden metrin matkalta. Mitatun lajittuman osuus oli keskimäärin 15 % ja se vaihteli 10–20 % välillä. Kuvassa oli lämpökamerakuvien perusteella kaksi kuorman vaihtumiskohtaa, joiden kummankaan vaikutusta ei mitatusta lajittumavirheestä erottanut.



Kuva 39. Lajittumavirheiden osuus  $1 \times 3 \text{ m}^2$  pinta-alasta ja sen  $3 \times 5 \text{ m}^2$  hajonta (PTM2016 /1m data) vs. lämpökamerakuvat (2013) valtatiellä 4 tieosalla 364.

Lähteen [9] aineistoon sisältyi myös muita tieosia, mm. eri suuntien kaistat. Mitatun lajittumavirheen  $1 \times 3 \text{ m}^2$  keskiarvot ja liukuvat  $3 \times 5 \text{ m}^2$  hajonnat on esitetty tieosittain ja kaistoittain taulukossa 12. Sen mukaan vt 1 ja vt3 suuntien 1 kaistojen 1 lajittumavirheiden osuudet olivat pienimmästä päästä. Suurempia arvoja olisi löydetty kakkos-suunnista ja kakkoskaistoilta ja erityisesti vt 4:lta (Taulukko 12).

Taulukko 12. Lähteen [9] kaikki kohteet ja niiden vuonna 2016 mitatut lajittumavirheiden keskiarvot (ylempi) ja hajonnat (alempi).

Tie/Osa	Suunta 1			Suunta 2			Keskim.
	K1	K2	Keskim.	1	2	Keskim.	
<b>1</b>	<b>10 %</b>	<b>15 %</b>	<b>13 %</b>	<b>13 %</b>	<b>21 %</b>	<b>17 %</b>	<b>15 %</b>
26	10 %	15 %	13 %	12 %	21 %	17 %	15 %
27	11 %	15 %	13 %	15 %	22 %	18 %	15 %
<b>3</b>	<b>12 %</b>	<b>12 %</b>	<b>12 %</b>	<b>13 %</b>	<b>24 %</b>	<b>18 %</b>	<b>15 %</b>
136	11 %	13 %	12 %	13 %	34 %	23 %	18 %
137	12 %	11 %	12 %	13 %	15 %	14 %	13 %
139	13 %	11 %	12 %	13 %	10 %	12 %	12 %
<b>4</b>	<b>24 %</b>	<b>31 %</b>	<b>27 %</b>	<b>30 %</b>	<b>43 %</b>	<b>36 %</b>	<b>29 %</b>
364	24 %	31 %	27 %	30 %	43 %	36 %	29 %
<b>Keskim.</b>	<b>14 %</b>	<b>17 %</b>	<b>16 %</b>	<b>14 %</b>	<b>24 %</b>	<b>19 %</b>	<b>17 %</b>

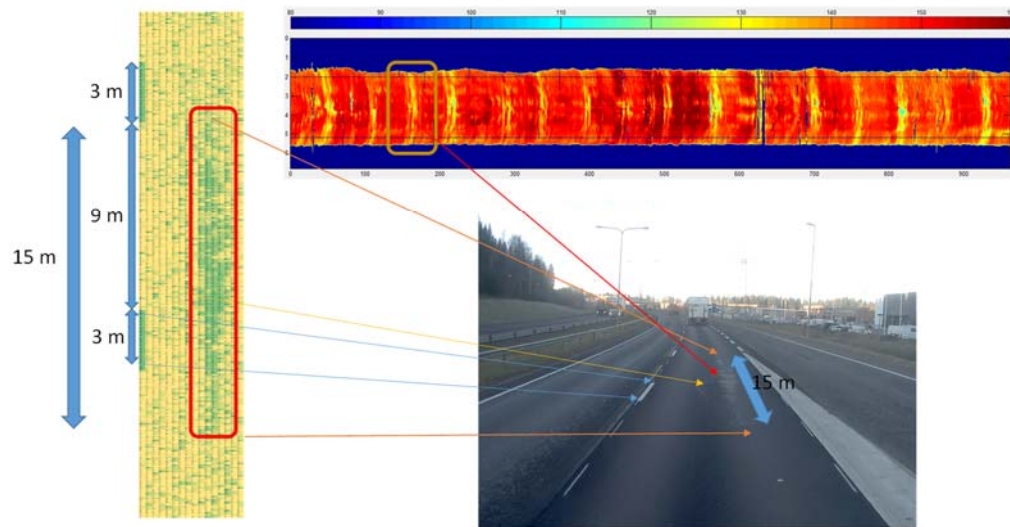
  

Tie/Osa	Suunta 1			Suunta 2			Keskim.
	K1	K2	Keskim.	1	2	Keskim.	
<b>1</b>	<b>0.7 %</b>	<b>1.2 %</b>	<b>1.0 %</b>	<b>1.0 %</b>	<b>1.6 %</b>	<b>1.3 %</b>	<b>1.2 %</b>
26	0.7 %	1.2 %	1.0 %	0.9 %	1.6 %	1.3 %	1.1 %
27	0.8 %	1.2 %	1.0 %	1.2 %	1.7 %	1.4 %	1.2 %
<b>3</b>	<b>0.8 %</b>	<b>0.8 %</b>	<b>0.8 %</b>	<b>0.7 %</b>	<b>1.2 %</b>	<b>1.0 %</b>	<b>0.9 %</b>
136	0.7 %	1.0 %	0.8 %	0.7 %	1.7 %	1.2 %	1.0 %
137	0.7 %	0.7 %	0.7 %	0.7 %	1.1 %	0.9 %	0.8 %
139	0.9 %	0.6 %	0.8 %	0.8 %	0.6 %	0.7 %	0.7 %
<b>4</b>	<b>1.6 %</b>	<b>2.2 %</b>	<b>1.9 %</b>	<b>2.0 %</b>	<b>2.6 %</b>	<b>2.3 %</b>	<b>2.0 %</b>
364	1.6 %	2.2 %	1.9 %	2.0 %	2.6 %	2.3 %	2.0 %
<b>Keskim.</b>	<b>0.9 %</b>	<b>1.2 %</b>	<b>1.1 %</b>	<b>0.9 %</b>	<b>1.5 %</b>	<b>1.2 %</b>	<b>1.1 %</b>

### 7.1.2 Kehä III osa 4

Kehä III (VT 50) tieosa 4 (suunta 2 kaista 1) päällystettiin vuosina 2015 (0-2600) ja 2016 (2600-5900). Päällystykseen yhteydessä tehtiin lämpökamerakuvaus. Kohde oli mitattu PTM:lla vuosina 2015 ja 2016. Kuvassa on lämpökameran kuvaa, jossa näkyy kuormien vaihtumiskohtat kellertävällä värillä. Yksi vaihtumiskohta oli kohdassa 1150-1175 m (Kuva 40). Kuvassa on nähtävissä selvä bitumin pintaan nousukohta, jonka pituus oli noin 15 m. Kohta on tunnistettavissa PTM-datasta vihreänä alueena. Lämpökamerakuva osoitti, että päällystyksessä kuorman vaihtumiskohta oli suunnilleen samassa kohdassa kuin päällysteen lajittuma, mutta se ei kuitenkaan millään tavalla näyttänyt minkä muotoinen tai -suuruinen lajittuma oli. Lisäksi lämpökamerakuva osoitti muita kuorman vaihtumiskohtia säännöllisin välein, mutta niissä ei havaittu silmämääräisesti eikä mittauksilla lajittumavirheitä.

Lämpökamera 50/221/4/1000 – 2000  
MPD 50/221/4/1150 – 1175



Kuva 40. Lajittuman tunnistus PTM-datasta.

## 8 Yhteenveto ja johtopäätökset

### 8.1 Kirjallisuusselvitys

Päällysteen lajittumavirheet ovat melko yleinen ongelma uusilla päällysteillä eikä niiden mittaamiseen ole ollut tarpeeksi hyvää menetelmää. Lajittumavirheet ovat kuitenkin merkittävä päällysteiden laatua heikentävä ominaisuus, joka aiheuttaa mm. puutteellista kitkaa ja kiviainesrakeiden irtoamista, joka puolestaan johtaa lopulta reikien syntymiseen. Lajittumiin johtavaa uuden päällysteen lämpötilavaihtelua on mitattu mm. lämpökameralla ja sillä on todettu olevan yhteys päällysteessä havaittaviin lajittumiin. Sen rinnalle olisi kuitenkin tarve löytää sellainen mittausmenetelmä, joka tuottaisi selkeämmän tiedon lajittumista ja joka ei ole sidottu tehtäväksi päällystystyön yhteyteen.

Tässä työssä oli tavoitteena kartoittaa lajittumia selittäviä juurisyytä ja kehittää mittausmenetelmä päällysteen lajittumasta aiheutuvalle bitumin pintaan nousulle ja purkaumiin johtaville rakeisuus lajittumalle.

Päällysteen lajittumia ja varsinkin purkaumien tunnistamista on tutkittu useissa eri maissa aiemmin. Asfalttipäällysteen lajittumavirheitä on ainakin seuraavia tyyppisiä:

- Rakeisuudesta johtuvat lajittumavirheet
- Lämpötilasta johtuvat lajittumavirheet
- Asfalttimassasta johtuva lajittuminen

Lajittuminen jaetaan kirjallisuudessa usein kahteen luokkaan, massalajittumaan ja lämpölaajittumaan. Massaa voidaan pitää lajittuneena, kun rakeisuuskäyrä muuttuu normaaliarvoista joko liian paljon hienoaainesta sisältäväksi tai liian karkeaksi. Jos massassa on liian paljon karkeaa kiviainesta, päällysteen pinnasta tulee avoin ja tyhjätila kasvaa. Tällöin myös tyypillisesti sideainepitoisuus on alhainen. Tämän kaltainen päällyste on altis vaurioille ja siksi lajittumia, joissa rakeisuuskäyrä on siirtynyt karkeaksi, pidetään haitallisina päällysteen kestoajan kannalta. Jos taas massa sisältää liikaa hienoainesta, on päällysteen sideainepitoisuus tyypillisesti normaalia korkeampi, tyhjätilat pieniä ja pinta sileä ja tasainen. Tällainen päällyste on sateella liukas. Se on myös alttiimpi urautumiselle.

**Lämpölaajittuma** määritellään kirjallisuudessa päällysteeseen muodostuvina ympäröivää päällystettä kylmempinä kohtina, joissa yleensä valmiin päällysteen tiheys on alhaisempi ja tyhjätilat suuria. Yleisimpiä syytä kylmempien alueiden muodostumiselle ovat kuorma-auton lavalla massan pintaan syntyvä muuta massaa kylmempi kuori, lavan reunoilla nopeammin jäähtyvä massa sekä levittimen suppilon laidoille jäävä massa. Tämä kylmempi massa päätty levittimestä päällysteeseen sekoittumatta kuumemman massan kanssa, jolloin kylmemmät kohdat jäävät valmiiseen pintaan. Sellaiset massalajittumat, joissa rakeisuuskäyrä on liian karkea, voidaan havaita päällysteessä kylmempinä kohtia, sillä karkearakeisessa päällysteessä pinta on avoimempi ja näin myös jäähtyminen on nopeampaa.

**Rakeisuudesta johtuvia lajittumavirheitä** syntyy kun valmiissa asfalttipäällysteessä on normaalista poikkeava määrä hienoaineksia ja ne syntyvät massanvalmistuksen, kuljetuksen tai levityksen aikana. Lajittumavirheitä syntyy suuren tyhjätilan ja alhaisen bitumipitoisuuden mahdollistaessa massan epätasaisen jäähtymisen. Se aiheuttaa kosteusvaurioita ja kestävyteen vaikuttavia ilmiöitä kuten väsymisvaurioita, purkaumaa ja reikien muodostumista.

Pääasiallinen lajittumavirheiden mittaamenetelmä on ollut silmämääräinen arviointi. Sen huonona puolena on hitaus. Kirjallisuudessa on lueteltu useita mittaamenetelmiä, joilla päällysteen lajittumia voidaan mitata. Käyttökelpoisia menetelmiä ovat sellaiset mittaamenetelmät, jotka ovat ainetta rikkomattomia ja nopeita suorittaa. Tällaisia ovat lämpökamera, pistelasertekniikka ja viivalasertekniikka. Pisimmälle tutkittu lienee pistelasertekniikka. Ensimmäisiä yrityksiä päällysteen purkauman mittaamiseksi pistelasertekniikalla tekivät Van Ooijen, et al. 2004, Wright, A., 2004 ja myöhemmin Scott, P. et al. 2008 ja McRobbie, S et al. 2008. Yhteistä näille oli, että niissä käytettiin pistelasertekniikalla tehtyjä mittauksia ja karkeusstandardissa (ISO 13473-1:1997) määritettyä makrokarkeuden MPD-tunnuslukua ja ns. ”stoneaway”-tunnuslukua. Tutkimukset keskittyivät purkaumien tunnistamiseen enimmäkseen vanhoilta tai hiljaisilta päällysteiltä. Ongelmaksi koettiin liian harva pisteväli ja päällystetyyppien vaihtelu. Menetelmiä on kehitetty edelleen tihentämällä pisteväliä (25 pistelaseria) tai kehittämällä päällystetyypin tunnistamista.

Myöhemmin W.L.C van Aalst et al. tutki viivalasertekniikan soveltuvuutta päällysteen lajittumien mittaamisessa. Samaa tekniikkaa on tutkittu mm. Georgian osavaltiossa Yhdysvalloissa. Alustavia tutkimustuloksia on julkaistu eri foorumeilla (2015), mutta kehitys näyttää olevan melko alkutekijöissään.

Ruotsissa Lundberg et al. tutki kolmilinjaisen MPD:n soveltuvuutta päällysteen lajittumien mittaamiseen (2010 ja 2011). Sen mukaan yhdelle metrille laskettu keskiarvo oli riittävä tieto kuvaamaan päällysteen pinnan rakennetta ja se sopii hyvin kuvaamaan pinnassa olevia vikoja ja homogeenisuutta ja sen mittaamisen toistettavuus on hyvä.

MPD:n variaatiokerroin (100% $\times$ hajonta/keskiarvo) on myös hyvä mittari kuvaamaan päällysteen laatua. Raja-arvot olisi valittava kullekin päällystetyypille erikseen. Erialaisten päällystetyyppien raja-arvoista tarvitaan enemmän tutkimusta. Mittauksen ajoittaminen uuden päällysteen elinkaareissa on myös tutkimatta.

Kirjallisuusselvityksen tuloksena oli, että pisimmällä päällysteen lajittumien mittaamisessa oltiin pistelasertekniikan ja makrokarkeustunnusluvun käytössä.

## 8.2 Näytetutkimukset uudelta päällysteeltä

Työssä valittiin tarkemmin tarkasteltavaksi valtatie yhden vuonna 2015 päällystetyt osuudet välillä Kehä III-Veikkola. Kyseisellä välillä havaittiin päällysteessä lajittumia, jotka paikannettiin ja joista otettiin poranäytteitä. Poranäytteistä tutkittiin tyhjätilat, sideainepitoisuudet ja kiviaineksen rakeisuus. Lisäksi kohteet mitattiin palvelutasomittarilla ja mittauksista tuotettiin standardinmukaiset MPD-tunnusluvut käyttäen sekä poikki- että pituussuunnassa tiheää raportointiväliä.

Näytteissä oli kolme avointa pintaa edustavaa kohtaa ja neljä suljettua pintaa edustavaa kohtaa sekä niiden lisäksi yksi normaalia pintaa edustava kohta. Näytteistä tehtiin seuraavat johtopäätökset:

- Avoin pinta oli silmämääräisen tarkastelun mukaan karkea ja suljettu pinta oli sileä. Avoimen pinnan makrokarkeus ja sen vaihtelu olivat suuria ja sileän pinnan makrokarkeus ja sen vaihtelu olivat pieniä.
- Avoimen päällysteen tyhjätila-% oli suurempi kuin suljetun päällysteen tyhjätila-%.
- Avoimien päällysteiden sideainepitoisuudet olivat pienempiä kuin suljettujen päällysteiden sideainepitoisuudet. Suljettujen päällysteiden sideainepitoisuudet olivat tavoitealueella, mutta avoimien päällysteiden sideainepitoisuudet olivat alle tavoitearvojen.
- Normaalin päällysteen tyhjätila-% oli avoimien ja suljettujen päällysteiden tyhjätila-%:n välissä. Sen sijaan normaalin päällysteen sideainepitoisuus oli pienempi kuin suljetun tai avoimen päällysteen sideainepitoisuus.
- Sileissä päällystenäytteissä oli enemmän hienoaineksia kuin karkeissa päällystenäytteissä. Kiviainesten rakeisuuden avulla ei kuitenkaan pystytty luokittelemaan pintoja sileisiin tai karkeisiin kovin luotettavasti.
- Makrokarkeus ja sen vaihtelu luokittelivat näytteet sileisiin ja karkeisiin paremmin kuin näytteiden laboratoriotutkimusten tulokset. Makrokarkeus oli siten erittäin lupaava mittaustieto päällysteen lajittuman mittaamiseen.

Näytetutkimusten perusteella voitiin todeta, että päällysteen lajittumia sisältävissä kohdissa tyhjätila, sideainepitoisuudet ja hienoainepitoisuudet vaihtelivat ja se oli todettavissa melko hyvin makrokarkeustunnusluvun (MPD) avulla.

## 8.3 Suljetun pinnan tunnusluku

Suljettua pintaa päätettiin kuvata neljällä eri tunnusluvulla, jotka olivat A, B, C ja D. Tunnusluku A perustui makrokarkeuteen, joka oli mitattu ajourista ja niiden välistä. Makrokarkeudelle haettiin sellainen raja-arvo, jolla 1mx1m suuruisille pinta-aloille tuotetut suljettua pinta-alaa (bitumin pintaan nousu) kuvaavat tunnusluvut korreloivat mahdollisimman hyvin 35 eri tosimitakohdan kanssa. Tosimitakohdat olivat 3 m pituisia pätkiä kattaen kaistan koko leveyden. Raja-arvoksi saatiin 0,77 mm. Korrelaatioksi tosimitan suhteen saatiin 90 % ja keskimääräinen tasoero tosimitaan oli 3,4 %.

Tunnusluku B perustui niin ikään makrokarkeuteen, mutta se oli mitattu ja laskettu tiheämmin. Se mitattiin poikkisuunnassa 17 anturilla ja raportoitiin 10 cm:n välein. Antureiden 2,3,4,6,7,8,10,11,12,14, 15 ja 16 mittaustulos kalibroitiin vastaamaan makrolaserantureita 5 ja 13 ylimääräisten antureiden 18 ja 19 avulla. Päällysteen suljettu pinta-ala laskettiin anturikohtaisten 10 cm MPD-keskiarvojen avulla määrittämällä sellainen raja-arvo, jolla pinta-ala korreloi parhaiten 35 tosimitakohdan kanssa. Raja-arvoksi saatiin 0,66 mm. Korrelaatio tosimitaan oli 98,4 % ja keskimääräinen tasoero tosimitaan oli 0,2 %.

Tunnusluku C oli muuten samanlainen kuin tunnusluku B, mutta se perustui noin 50cmx50cm alalta laskettuun MPD:n hajontaan. Raja-arvoksi saatiin 0,3 mm. Korrelaatioksi tosimitaan nähden saatiin 95 %.

Tunnusluku D oli tunnuslukujen B ja C yhdistelmä, missä B:n paino oli 95 % ja C:n paino 5 %. Korrelaatio tosimitan kanssa oli 98,5 % ja tasoero tosimitaan oli 0%.

Tunnusluku D oli siten tosimitaan nähden paras, mutta jatkotarkasteluun valittiin kuitenkin tunnusluku B, koska sen laskenta oli yksinkertaisempi ja se oli käytännössä lähes yhtä hyvä kuin D.

Bitumin pintaan nousua kuvaavaksi tunnusluvuksi valittiin tiheällä resoluutiolla ja kaikkia antureita käyttävä dynaamisesti korjattu MPD. Sen toistettavuutta testattiin neljällä kokonaispituudeltaan 17 km pituisella kohteella, jotka sijaittivat vt 1 ja kt50 lähimaastossa. Tunnusluvut laskettiin 100 m matkalle. Toistettavuuskorrelaatiot vaihtelivat kohteittain välillä 92-99 %. Lopputuloksena todettiin, että bitumin pintaan nousua kuvaava tunnusluku SMA 16 päällystetyypille oli löydetty.

## 8.4 Avoimen pinnan tunnusluku

Avointa pintaa päätettiin kuvata kahdella eri tunnusluvulla, jotka olivat A ja B. Tunnusluku A perustui makrokarkeuteen, joka oli mitattu ajourista ja niiden välistä. Makrokarkeudelle haettiin sellainen raja-arvo, jolla 1mx1m suuruisille pinta-aloille tuotetut avointa pinta-alaa (purkauma) kuvaavat tunnusluvut korreloivat mahdollisimman hyvin 35 eri tosimitakohdan kanssa. Tosimitakohdat olivat 3 m pituisia pätkiä kattaen kaistan koko leveyden. Raja-arvoksi saatiin 1,94 mm. Korrelaatioksi tosimitan suhteen saatiin 78,5 % ja keskimääräinen tasoero tosimitaan oli 11,7 %.

Tunnusluku B perustui niin ikään makrokarkeuteen, mutta se oli mitattu ja laskettu tiheämmin. Se mitattiin poikkisuunnassa 17 anturilla ja raportoitiin 10 cm:n välein. Antureiden 2,3,4,6,7,8,10,11,12,14, 15 ja 16 mittaustulos kalibroitiin vastaamaan makrolaserantureita 5 ja 13 ylimääräisten antureiden 18 ja 19 avulla. Päällysteen avoin pinta-ala laskettiin anturikohtaisten 10 cm MPD-keskiarvojen avulla määrittämällä sellainen raja-arvo, jolla pinta-ala korreloi parhaiten 35 tosimitakohdan kanssa. Raja-arvoksi saatiin 1,75 mm. Korrelaatio tosimitaan oli 93 % ja keskimääräinen tasoero tosimitaan oli -1 %.

Päällysteen purkaumaa kuvaavaksi tunnusluvuksi valittiin tiheällä resoluutiolla ja kaikkia antureita käyttävä dynaamisesti korjattu MPD. Sen toistettavuutta testattiin neljällä kokonaispituudeltaan 17 km pituisella kohteella, jotka sijaittivat vt 1 ja kt50 lähimaastossa. Tunnusluvut laskettiin 100 m matkalle. Toistettavuuskorrelaatiot vaihtelivat kohteittain välillä 94-100 %. Lopputuloksena todettiin, että purkaumaa kuvaava tunnusluku SMA 16 päällystetyypille oli löydetty.

## 8.5 Jatkotutkimusten tarve

Päällysteen lajittumavirheiden mittaamiseen löydettiin kaksi tunnuslukua, jotka olivat suljettua pintaa, bitumin pintaan nousu, kuvaava tunnusluku ja avointa pintaa, purkauma, kuvaava tunnusluku. Kumpikin tunnusluku tuotetaan mittaamalla samaa indeksiä, MPD, ja luokittelemalla se joko suljettua pintaa kuvaavaksi pinnaksi tai avointa pintaa kuvaavaksi pinnaksi sen mukaan alittuuko vai ylittykö kyseinen tunnusluku raja-arvoihin nähden. Tunnuslukuina ovat suljettua tai avointa pintaa kuvaavat pinta-alat neliöinä tai prosentteina haluttua pituusyksikköä kohti.



Tunnusluvut on kalibroitu SMA 16 päällysteelle, eikä siten voida olla täysin varmoja siitä, toimiiko sama tunnusluku tai samat raja-arvot muilla päällystetyypeillä. Jatkotutkimusta olisi hyvä tehdä ainakin seuraaville asioille:

- Seuraavaksi jatkotutkimuskohteeksi suositellaan tunnuslukujen tuottamisen pilotoimista ja tutkimista myös muilla päällystetyypeillä. Ensimmäinen tutkittava päällystetyyppi on AB-päällyste, mutta myös PAB-päällysteitä tulisi tutkia. Tunnuslukujen mittaamisen toistettavuus lienee todistettu tällä tutkimuksella, mutta sen tosimitatestejä tulisi laajentaa muille päällystetyypeille.
- Muilla päällystetyypeillä tulee todennäköisesti eteen tilanne, missä tarvitaan erilaisia raja-arvoja. Raja-arvojen toimivuutta ja pysyvyyttä eri päällystetyypeillä tulisi tutkia. Sen jälkeen voitaisiin tutkia, millä menetelmillä mittauksista tunnistettaisiin päällystetyyppi ja sille tarvittava raja-arvo. Näin välttäisiin laskennassa päällystetyypin selvittämiseltä.
- Tämän jälkeen voitaisiin tutkia, minkälaisia laatuvaatimuksia eri päällystetyypeille tulisi asettaa. Lajittumia sisältävän alueen osuus tulisi pystyä muuttamaan arvonmuutokseksi ja sen tulisi olla sopivassa suhteessa muiden laatuvaatimusten kanssa.
- Mitattuja tunnuslukuja tulisi validoida maastossa tehtävien vertailujen avulla. Mittaustuloksia tulisi verrata silmämääräiseen tuntumaan useita erilaisia kohteita sisältävällä reitillä.

## Lähteet

1. Distress Identification Manual for The Long Term Pavement Performance Program. Federal Highway Administration. June 2003. USA.
2. Van Ooijen, W., van den Bol, M and Bouman, F. (2004). *High-speed measurement of raveling on porous asphalt*. SURF 2004, 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics, June 6–10 2004, Toronto, Ontario, Canada.
3. McRobbie, S., Furness, G., (2008): *Automated detection of fretting on hot rolled asphalt surfaces*. TRL report PPR 299. TRL Limited, Crowthorne, UK. 2010;
4. Wright, A., Christie, C. (2012): *New Methods for Network Level Automated Assessment of Surface Condition in the UK*. SURF 2012.
5. Detecting Asphalt Pavement Raveling Using Emerging 3D Laser Technology and Macrotexture Analysis. Georgia Department of Transportation. USA. August 2015.
6. W.L.C van Aalst, G.B.Derksen, P.P.M. Schackmann, F.G.M. Bouman, P.Paffen: *Automated Raveling Inspection and Maintenance Planning in The Netherlands*. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) September 15 - 17, 2015, Berlin, Germany.
7. Wambold, J. C., C. E. Antle, J. J. Henry, and Z. Rado. International PIARC *Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements*. Final Report submitted to the Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), State College, PA, 1995.
8. Stroup – Gardiner, M., Brown E.R., “*Segregation in Hot Mix Asphalt Pavements*” National Cooperative Highway Research Program Report 441, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Alabama, 2000.
9. Niklas Nevalainen: *Lämpökamera päällystystöiden laadunvarmistuksessa*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo 2014.
10. Lundberg Thomas: *Kontrollmetod för nya vägbeläggningar*. Makrotextur. VTI notat 35–2012.
11. Lundberg Thomas, Sjögren Leif, Gustafsson Mika, Ihls Anita: *Vägytans makrotekstur och dess variation*. Vägytemätning med mätbil. VTI notat 5-2011.
12. *Päällysteen pintakarkeuden vaikutukset tien käyttäjiin ja tienpitoon*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2010.
13. Meegoda, J.N., Rowe, G.M., Hettiarachi, C.H., Nishantha, B., Sharrock, M.J. (2002): *Correlation of Surface texture, Segregation and Air Voids*. FHWA-NJ-2002-016. Washington, D.C.
14. Scott, P., Fairclough, R., Radband, K., Zohrabi, M., Sanders, P., McRobbie, S., Wright, A. (2008). *Measuring surface disintegration (ravelling and fretting) using traffic speed condition surveys*. 7<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavement Assets (ICMPA). Calgary, Canada.
15. Wright, A., (2004): *The use of surface texture measurements to identify fretting on hot rolled asphalt*. TRL report PR/INN/41/04, TRL Limited, Crowthorne, UK.
16. McRobbie, S., Wright, A., Laquinta, J., Scott, P., Christie, C., James, D. (2010). *Developing new methods for the automatic measurement of ravelling at traffic speed*. 11th International conference on Asphalt Pavements. Nagoya, 2010.
17. ISO 13473-1:1997: Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 1: Determination of Mean Profile Depth.



ISSN-L 1798-6656  
ISSN 1798-6664  
ISBN 978-952-317-349-1

[www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi)

Liik  
enne  
vira  
sto

