

Niko Sekki

PÄÄLLYSTEEN TIIVIYDEN TYÖNAIKAI- NEN MITTAAMINEN

Rakennetun ympäristön tiedekunta

Diplomityö

Huhtikuu 2019

TIIVISTELMÄ

Niko Sekki: Päällysteen tiivyyden työnaikainen mittaaminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2019

Asfalttipäällysteiden laadun merkitys on jatkuvasti kasvanut viime vuosina, minkä myötä laadun todentaminen on yhä tärkeämpää. Ainakin yhtenä tärkeänä päällysteen laadun kriteerinä on pidetty päällysteen tiiviyttä. Nykyisissä tiivyydenmittaustavoissa on havaittu olevan epävarmuustekijöitä, joten uusia menetelmiä kehitetään jatkuvasti. Eräs viime vuosina kehitetty menetelmä hyödyntää asfalttijyriä. Niin kutsutut itsemittaavat asfalttijyrät tuottavat reaaliaikaista tietoa päällysteen pintalämpötilasta, jyrän ylityskerroista sekä päällysteen tiivistymisestä paikkatietoon sidottuna. Uuden teknologian myötä tiivistystyö voidaan dokumentoida ja raportoida.

Tässä diplomityössä tutkittiin aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, aiempia tutkimuksia sekä kenttäkokeen tuloksia. Kenttäkoe järjestettiin kesällä 2018 Mäntsälässä. Kokeiluun osallistui viisi eri jyrätoimittajaa, jotka olivat Bomag, Ammann, Caterpillar, Volvo sekä Hamm.

Koekohteella tehtiin myös erilaisia lisätutkimuksia ja mittauksia, joita verrattiin jyrrien tuottamaan mittausdataan. Kohteelle tehdyt mittaukset olivat: päällystetutkimittaus, tasalaatuisuusmittaus, jatkuva taipumamittaus, lämpökameramittaus sekä päällysteestä otetut poranäytteet, joiden tiiviyttä tutkittiin laboratoriossa.

Kaikista jyristä ei saatu vertailukelpoista mittaustietoa. Tietoa analysoitiin siihen tarkoitetuilla tietokoneohjelmilla sekä Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Korrelaatiota jyrrien mittausarvojen (ICMV) ja kohteella toteutettujen muiden mittausten tulosten välillä ei havaittu ja epäselväksi jäi, mitkä kaikki tekijät vaikuttavat jyrrien mittausarvoon. Arvon määritys- ja laskentatavat vaihtelevat myös valmistajakohtaisesti, joten arvot eivät ole vertailtavissa valmistajien kesken. Itsemittaavien asfalttijyrien muut ominaisuudet havaittiin kuitenkin hyvinkin käyttökelpoisiksi ja uuden jyräteknologian todettiin olevan mainio laadunhallinnan työkalu, joka helpottaa myös jyräkuljettajan työskentelyä.

Avainsanat: Asfaltti, tiiviyys, tiivistäminen, itsemittaava jyrä.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Niko Sekki: The pavement compaction measurement during work
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
April 2019

The importance of the quality of asphalt pavements has grown constantly in recent years, making quality control increasingly important. Traditionally, quality has been measured by measuring the compactness of pavement. The current compaction measurement methods have been found to be inaccurate. Therefore, new methods are constantly being developed. One of these methods developed in recent years utilizes asphalt rollers. The so-called Intelligent Compaction -asphalt rollers provide real-time information on the surface temperature of the paving, number of roller passes, stiffness of the pavement and precise location of the roller. With the help of IC-technology, compaction work can be documented and reported.

In this Master of Science Thesis the relevant literature and previous studies are reviewed. Moreover, the results of the field test conducted for this thesis are presented. The field test was organized in summer 2018 in Mäntsälä. Five different roller suppliers participated in the experiment: Bomag, Ammann, Caterpillar, Volvo and Hamm.

Various additional studies and measurements were also performed on the test site. The results of the tests were compared to the Intelligent Compaction Measurement Value. Measurements made for the new pavement were: ground-penetrating radar measurement, MPD-measurement, traffic speed deflectometer, thermal camera measurement and core samples which air void content was measured in the laboratory.

Not all rollers gave out valid data fit for comparison. The data was analyzed using assorted computer programs and an Excel spreadsheet program. No correlation between the ICMVs and the measurement methods implemented on the test field was found, and the actual definition of ICMV was indefinite. As the results and calculation methods vary between different suppliers, values are not comparable between different manufacturers. However, other properties of IC-asphalt rollers proved to be very useful and new roller technology was demonstrated to be an excellent tool in quality control that also facilitates the work of the roller operator.

Keywords: Asphalt, compactness, compaction, Intelligent Compaction roller.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön aihe sai alkunsa jo alkuvuodesta 2018. Projekti on siis ollut pitkä ja haastava, mutta myös hyvin palkitseva.

Haluan kiittää Väyläviraston Katri Eskolaa, joka mahdollisti tämän diplomityön toteuttamisen. Kiitokset kuuluvat myös Tampereen yliopiston Pirjo Kuulalle ja Pauli Kolisojalle sekä muille tämän työn ohjausryhmään kuuluville henkilöille.

Lopuksi haluan esittää erityiskiitokset perheelleni sekä muille läheisilleni, jotka ovat tukenet ja kannustaneet minua opintojeni aikana.

Tampereella, 25.4.2019

Niko Sekki

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	8
2.	ASFALTTIPÄÄLLYSTEEN TIIVISTÄMINEN JA SEN MERKITYS	9
2.1	Päällystesuunnittelu	9
2.2	Päällysteen tiivistäminen	10
2.3	Päällysteen tyhjättila	14
2.4	Tyhjättilan mittaaminen	17
2.4.1	Poranäytteet	17
2.4.2	Radiometrinen menetelmä	20
2.4.3	Pistekohtaiset menetelmät	21
2.4.4	Päällystetutka	24
3.	ITSEMITTAAVAT ASFALTTIJYRÄT	28
3.1	Yleiskuvaus laitteistosta.....	28
3.2	Itsemittaavien jyrrien toimintaperiaate.....	31
3.3	ICMV- ja in-situ -mittausten vertailu	35
3.3.1	Jyrän mittaussarvo ja radioaktiivinen/ei-radioaktiivinen mittalaite	37
3.3.2	Jyrän mittaussarvo ja poranäytteet	38
3.3.3	Mittaussarvon korrelaatio pudotuspainolaitteen taipumaan.....	39
3.3.4	Mittaussarvon korrelaatio kevyen pudotuspainolaitteen taipumaan	40
3.4	Tiedon prosessointi	42
3.4.1	Tietotyypit.....	42
3.4.2	Veta.....	44
3.4.3	Ammann	45
3.4.4	Bomag.....	46
3.4.5	Caterpillar	47
3.4.6	HAMM	47
3.4.7	Volvo	48
4.	KENTTÄKOEEN TOTEUTUS	52
4.1	Koekohde	52
4.2	Jyrrien tekniset tiedot	54
4.3	Koesuunnitelma	60
5.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	61
5.1	Poranäytteet ja itsemittaavat jyrät	61
5.2	Päällystetutkamittaus	66
5.3	Jatkuva taipumamittaus.....	69
5.4	Lämpökamera- ja tasalaatuisuusmittaus	81
5.5	Käyttäjäkokemukset.....	89
6.	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	90
	LÄHTEET	93

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AA	Avoim asfaltti
AB	Asfalttibetoni
ABK	Kantavan kerroksen asfalttibetoni
ABS	Sidekerroksen asfalttibetoni
ABT	Tiivis asfalttibetoni
A _N	Kiviaineksen kuulamylyarvo
AVCP	(Assessment and Verification of Constancy of Performance) Suoritus- tason pysyvyyden arviointi- ja varmennusjärjestelmän mukainen luokka
BCI	(Base Curvature Index) Jatkuvan taipumamittauksen parametri, joka kuvaa pohjamaan jäykkyyttä
CMV	(Caterpillar and Dynapac Meter Value) Caterpillarin ja Dynapacin ni- mitykset jyrän mittausarvolle
DCP	(Dynamic Cone Penetrometer) kevyt pudotuspainolaite
DOR-laite	Mittalaite, joka lähettää radioaktiivista säteilyä. Käytetään päällysteen tiheyden mittaamiseen
Evib	(BOMAG Vibration modulus) Bomagin nimitys jyrän mittausarvolle
FWD	(Falling Weight Deflectometer), pudotuspainolaite
GPR	(Ground Penetrating Radar) Maatutka
GPS	(Global Positioning System) Maailmanlaajuinen paikallistamisjärjes- telmä
HCQ	(HAMM Compaction Quality) Hammin jyrän tallentaman tiedon tar- kasteluohjelma
HMV	(HAMM Measurement Value) Hammin nimitys jyrän mittausarvolle
Hz	Hertsi = taajuuden yksikkö
IC	(Intelligent Compaction) Tiivistysjärjestelmä, joka sisältää tiivistettä- vän materiaalin jatkuvan mittausarvon tallentamisen, täryn amplitudin ja taajuuden säätämisen työaikana ja paikannusjärjestelmän.
ICMV	(Intelligent Compaction Measurement Values) Yleinen termi kaikille IC-mittauksille. Tässä työssä käytetään yleisnimitystä mittausarvo.
KVL	Keskimääräinen vuorokausi liikenne
LJYR	Laatikkojyrsintä
LTA	Paksuudeltaan vakio laatta tasatulle alustalle
LWD	(Light Weight Deflectometer) kevyt pudotuspainolaite
MP	Massapinta
MPD	(Mean Profile Depth) Profiilin keskisyvyys, joka on makrokarkeuden tunnusluku
MPKJ	Massapinta kuumennusjyrsitylle alustalle
PAB	Pehmeä asfalttibetoni
PANK	Päällystealan neuvottelukunta ry
PQI	(Pavement Quality Indicator) Dielektrisyyteen perustuva mittalaite
PDM	(Pavement Density Meter) Dielektrisyyteen perustuva mittalaite
REM	Remix-pinta
Sakai CIS	(Sakai Compaction Information System) Sakain nimitys itsemittaavan jyrän laitteistolle
Sakai CCV	(Sakai Compaction Control Value) Sakain nimitys jyrän mittausarvolle
SCI	(Surface Curvature Index) Jatkuvan taipumamittauksen parametri, joka kuvaa tierakenteen yläosan jäykkyyttä
SFS-EN	EN-standardi, joka on voimaansaatettu Suomessa

SIPA	Sirotepaikkaus
SMA	Kivimastiksiasfaltti
TAS	Tasausmassa
TSD	(Traffic Speed Deflectometer) Jatkuva taipumamittaus
TT	Tyhjätila
VA	Valuasfaltti
Veta	Datan hallinnointi ja analysointi ohjelma
VMA	Kiviaineksen tyhjätila

1. JOHDANTO

Tienpidon määrärahojen väheneminen, tieliikenteessä suurimman sallitun kokonaismassan kasvaminen sekä ilmastonmuutoksen myötä voimistuneet sääolosuhteiden rasitusvaikutukset ovat lisänneet laadukkaiden asfalttipäällysteiden merkitystä maassamme. Tämän vuoksi myös laadun todentaminen on entistä tärkeämpää. Yksi merkittävä päällysteen pitkäaikaiskestävyyden mittari on sen tiiviys. Nykyisissä tiiviydenmittausmenetelmissä on havaittu epävarmuustekijöitä, minkä vuoksi niiden käyttö päällystysurakoissa arvonmuutosperusteina on kyseenalaistettu. Tässä diplomityössä perehdytään työnaikaisen tiiviyden mittausmenetelmään, jossa hyödynnetään itsemittaavia asfalttijyriä. Jyrät tuottavat reaaliaikaista tietoa päällysteen pintalämpötilasta, ylityskerroista sekä tiivistymisestä paikkatietoon sidottuna.

Diplomityössä tehdään katsaus aiheesta löytyvään kirjallisuuteen sekä analysoidaan kesällä 2018 järjestetyn kenttäkokeen eli jyräkokeilun tuloksia. Työssä hyödynnetty lähdekirjallisuus on pääasiassa Yhdysvalloista, jossa itsemittaavien jyrien käyttö on melko yleistä. Päällystealan neuvottelukunta PANK ry on ideoinut kokeilun, jonka suunnittelu, dokumentointi ja analysointi toteutetaan tässä diplomityössä. Työn tilaajana toimii Väylävirasto ja se toteutetaan osana digitalisaatiohanketta. Tutkimuksen tavoitteena on tutustua jyräteknologian käyttöön ja arvioida sen soveltuvuutta uuden päällysteen laaduntodentamismenetelmänä.

Itsemittaavia asfalttijyriä testataan koekohteella, jonka päällystetyyppinä on asfalttibetoni. Kokeiluun osallistuvat jyrämerkit ovat: Ammann, Bomag, Caterpillar, Hamm sekä Volvo. Koekohteella ei ole käytettävissä erillistä mittalaitetta, jolla voitaisiin seurata päällysteen tiivistymistä työnaikana ja varmistaa tarvittava jyrän ylityskertojen lukumäärä. Valmiista päällysteestä otetaan poranäytteitä, joiden laboratoriossa tutkittuja tyhjätila-arvoja verrataan jyrien antamaan päällysteen tiiviyttä kuvaavaan lukemaan. Lisäksi kohteella tehdään jatkuva taipumamittaus, päällystetutkamittaus, lämpökamera- sekä pistelasermittaus.

2. ASFALTTIPÄÄLLYSTEEN TIIVISTÄMINEN JA SEN MERKITYS

2.1 Päälystesuunnittelu

Päälystesuunnittelu tehdään pääasiassa maanteiden rakennussuunnitteluvaiheessa. Suunnittelu koostuu seuraavista vaiheista:

- Lähtötietojen hankinta
- Vaiheittain rakentamisen suunnittelu
- Urautunutta päällystettä käsiteltäessä päällystystoimenpidetyypin valinta
- Päälystekerroksen leveyden ja paksuuden määrittäminen
- Päälysteen kestävyysominaisuuksien vaatimusten asettaminen
- Erityisvaatimukset (esim. meluntorjunta, pohjavedensuojaukset jne.)
- Vaatimusten asettaminen asfalttimassalle ja sen raaka-aineille
- Massatyyppien valinta. (Liikennevirasto 2018a).

Päälysteturakoitsija tekee yleensä asfalttimassan suunnittelun rakennushankkeen toteutusvaiheessa. Käytettävä asfalttimassatyyppi valitaan kohteen vaatimusten mukaan. Massatyyppinä ovat asfalttibetoni (AB), avoin asfaltti (AA), sidekerroksen asfalttibetoni (ABS), kantavan kerroksen asfalttibetoni (ABK), tiivis asfalttibetoni (ABT), kivimastikiasfaltti (SMA), valuasfaltti (VA), pehmeä asfalttibetoni (PAB) sekä avoin asfaltti (AA). SMA:ta ja AB:ta käytetään vilkkaasti liikennöidyillä kohteilla. Liikennemääriltään pienemmillä kohteilla käytetään PAB-massoja. Valuasfaltilla tehdään paikkauksia, kun paikkausta ei ole mahdollista tehdä paikattavaa päällystettä vastaavalla massalla. Side- ja kantavan kerroksen asfalttibetoneita käytetään kulutuskerroksen alla raskaasti kuormitetuissa kohteissa. ABT-massaa käytetään kaatopaikkojen tiivistysrakenteisiin, eikä se sovellu liikennöityihin kohteisiin. AA-massa soveltuu käytettäväksi vettä läpäisevien betonikivien alla. Avoimen rakenteen vuoksi sitä ei käytetä pohjavesialueilla tai pysäköinti- ja levähdysalueilla, joita raskas liikenne hyödyntää. (Liikennevirasto 2018a).

Yleisimmät päällystystoimenpidetyypit ovat:

- Vakiopaksuinen asfalttipäällyste (LTA) tehdään tasatulle alustalle, joka voi koostua murskeesta tai vanhasta päällysteestä
- Massapinta (MP) tehdään vanhan tasaamattoman päällysteen päälle
- Massapinta kuumennusjyritylle ja tasatulle alustalle (MPKJ). Vanha urautunut päällyste kuumennetaan ja jyritytään, minkä jälkeen rouhe tasataan ennen uuden massan levittämistä. Uusi massa levitetään välittömästi jyrityksen ja tasatun alustan päälle

- Uusiopintausta REM-menetelmässä (REM) vanha päällyste kuumennetaan ja jyrsketään. Jyrsketty asfalttirouhe, johon on lisätty elvytintä, sekoitetaan lisämassaan ja levitetään tielle

Lisäksi tehdään pienempimuotoisia päällystys- eli paikkaustöitä alue- ja paikkausrakoissa:

- Valuasfalttipaikkaus (VA-paikkaus)
- Sirotepaikkaus (SIPA)
- Paikkaus asfalttikonilla tai pehmeällä asfalttikonilla
- Urapaikkaus REM-menetelmän (URAREM) periaate on sama kuin REM-menetelmässä, mutta käsittelyleveys on vain noin 1,0 – 1,25 m. (Liikennevirasto 2018a).

Asfalttipäällysteen tiivistäminen on tärkeä työvaihe, jotta päällysteestä tulee hyvin kulutus- sekä säänkestävää (Eskelinen *et al.* 2018). Asfalttimassan tiivistäminen jakaantuu esitiivistykseen sekä jyräykseen. Jyräys voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen: esijyräykseen, tiivistysjyräykseen sekä jälkijyräykseen.

2.2 Päällysteen tiivistäminen

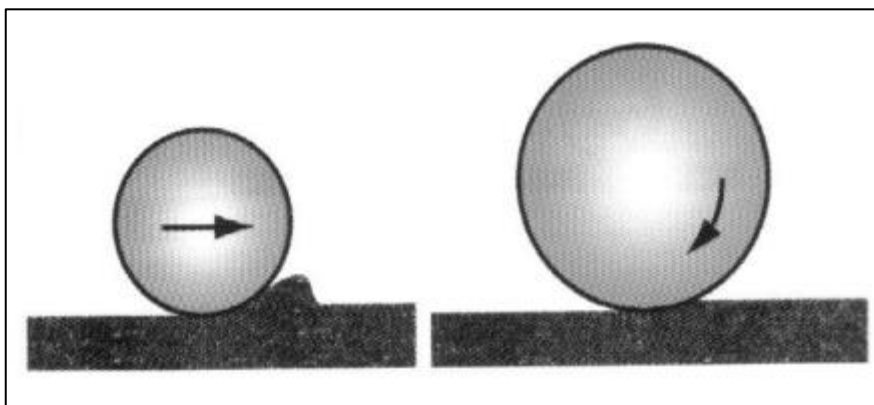
Oleellinen osa kaikkia päällystystoimenpiteitä on asfalttipäällysteen tiivistäminen. Päällysteen tiivistäminen on tärkeää, jotta se kestäisi hyvin kulutusta, deformaatiota ja sääolosuhteita vastaan sekä olisi pitkäikäinen (Halttunen *et al.* 1993).

Asfaltinlevittimen palkki esitiivistää päällysteen tampparin, täryttimen tai niiden yhdistelmän avulla (Kuva 1) (Pohjola 2013). Parhaimman alkutiiviyden saavuttamiseksi on tärkeää, että massamäärä on tasainen, massa on tasalaatuista, massan lämpötila riittävän korkea ja levitysnopeus riittävän alhainen sekä tasainen (Halttunen *et al.* 1993).



Kuva 1. *Asfaltinlevittäjä (Kuva: Asfalttikallio Oy 2017).*

Esijyräyksen tarkoituksena on sekä tiivistää asfalttimassaa että hidastaa päällysteen jäähtymistä sulkemalla sen pinta. Siksi on tärkeää, että jyräys aloitetaan mahdollisimman pian massan levittämisen jälkeen. Valssijyrällä suoritetaan yksi ylityskerta niin, että vetävä valssi on kohti levitintä, jotta vältetään massan aaltoilulta (Kuva 2). Mikäli esijyräyksessä käytetään täryjyrää, on suositeltavaa tehdä se ilman täryä. (Pohjola 2013).



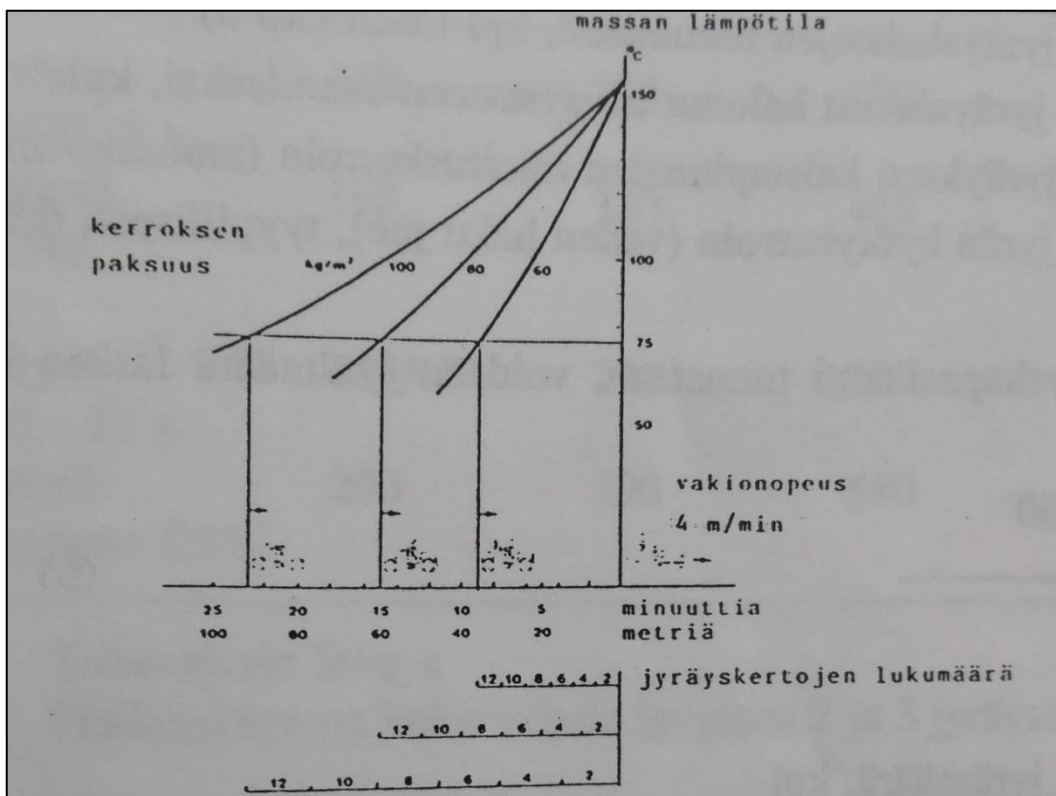
Kuva 2. *Aallon muodostuminen jyrän valssin edelle, tyypillistä etenkin halkaisijaltaan pienillä valsseilla (Pohjola 2013).*

Suurin osa levittimen jälkeisestä tiivistymisestä tapahtuu nimenomaan tiivistysjyräyksessä. Päällysteen lämpötilan tulee olla riittävän korkea, jotta sideaineen viskositeetti on tarpeeksi alhainen $< 5000 \text{ mm}^2/\text{s}$ (esim. bitumilla 70/100 noin $+100 \text{ }^\circ\text{C}$). Tiivistysjyräys on tehtävä

massan lämpötilan ollessa vähintään +75 °C. Ylityskertoja tehdään 4-8 kumipyörä-, täry- tai valssijyrällä. (Pohjola 2013).

Jälkijyräyksen tarkoituksena on tiivistysjyräyksessä muodostuneiden jyräysjälkien poistaminen. Jotta jyräysjälkien poistaminen olisi mahdollista, massan lämpötilan tulee olla vähintään +60 °C. Jyrän ylityskertoja on yhdestä kolmeen valssi- tai täryjyrällä ilman täryä. (Pohjola 2013).

Tiivistyössä tarvittava jyrrien määrä mitoitetaan asfaltinlevittimen nopeuden mukaan, mikä on riippuvainen koneaseman tuotantokapasiteetista. Mitoituksessa on huomioitava myös massan lämpötila, päällysteen paksuus, ilman lämpötila sekä tuuliolosuhteet (Kuva 3).



Kuva 3. Yhden jyräyskerran pituuden valintaan vaikuttavat tekijät jyräysnopeuden ollessa 4 m/min (Karlsson et al. 1992).

Jyrrien määrä n lasketaan kaavalla 2, kun tiedetään jyrän tiivistyskapasiteetti J_t , joka voidaan määrittää kaavan 1 avulla:

$$Jyrän\ tiivistyskapasiteetti\ J_t = \frac{J_v \cdot 1000}{(j \cdot n)} * J_r * J_h, \quad (1)$$

jossa J_v on jyrän nopeus (km/h)

j on jyräyskaistojen lukumäärä (kpl) (Taulukko 2)

n on jyräyskerrat halutun tiiviysasteen saavuttamiseksi (kpl)

Jr on jyräyksen kaistapituuden rajoituskerroin (Taulukko 1)

Jh on jyrän hyötykerroin (veden haku jne.), yleensä 0,9

Taulukko 1. Kaistapituuden rajoituskerroin (Karlsson et al. 1992).

Kaistapituus (m)	Kaistapituuden rajoituskerroin Jr
30	0,75
50	0,85
70	0,90
100	0,92
150	0,95

Taulukko 2. Jyräyskaistojen lukumäärä eri jyrillä, kun levitysleveys vaihtelee (Karlsson et al. 1992).

Jyrätyyppi	Valssin leveys (cm)	Jyräyskaistojen lukumäärä		
		2	3	4
Tandem täryjyrä1	140	270	400	530
Tandem täryjyrä2	168	330	485	640
Kolmivalssijyrä1	185/68*	245	300	485**
Kolmivalssijyrä2	200	390	580	770

* Takavalssin leveys

** Päällejyräys on koko valssin levyinen 2 ja 3 jyräyskaistan leveydellä

$$Jyrämäärä n = \frac{v \cdot 60}{Jt}, \quad (2)$$

jossa n on jyrämäärä (kpl)

v on levitysnopeus (m/min)

Jt on yhden jyrän tiivistyskapasiteetti (m/h)

Mitä ohuempi päällystekerros on, sitä nopeammin se jäähtyy. Tämän vuoksi ohuet päällystekerrokset on tiivistettävä nopeasti. Esimerkiksi, jos päällysteen massamäärä on 60 kg/m², sen jyräysaika on vain 1/3 siitä, mitä se on päällysteellä, jonka massamäärä on 100 kg/m². Päällysteen kerrospaksuuden tulee olla tasainen, koska ohuempi kohta jäähtyy nopeammin, jolloin tyhjätila jää korkeammaksi kuin muualla. Ohuita kerroksia jyrättäessä on syytä kiinnittää erityistä huomiota kaluston valintaan, jotta suuret kivirakeet eivät murru. Täryjyrän käyttö voi aiheuttaa kerroksen tartunnan heikkenemistä. (Karlsson et al. 1992).

Päällysteen lämpötilan ollessa 150 – 120 °C on tiivistäminen tehokkainta ja tiiviiden kehittyminen nopeinta. Tiivistystä aloitettaessa päällysteen lämpötila ei saa kuitenkaan olla liian

korkea ($> 170\text{ °C}$), jottei tapahtuisi bitumin pintaan nousua, eikä massa menettäisi jäykkysominaisuuksiaan. Päälysteen liian korkean lämpötilan voi tunnistaa aaltoilusta valssin vierellä, massan työntymisestä valssin etupuolelle, massan tarttumisesta valssiin (kastelusta huolimatta) tai poikittaishalkeamista valssin takana (Pohjola 2013).

Mitä tuulisempi ja kylmempi ilma on, sitä nopeammin massan lämpötila laskee. Tuulen nopeuden vaikutus on merkittävämpi kuin ilman lämpötilan (Taulukko 3), tämän vuoksi keväällä sekä syksyllä tehtävissä päälylystystöissä on suositeltavaa nostaa massan lämpötilaa $+10\text{ °C}$ asfalttiasemalla.

Liikennettä ei saa päästää uudelle päälylysteelle liian aikaisin. Päälylysteen lämpötila saa olla enintään $+60\text{ °C}$, muuten liikenne aiheuttaa urautumista, mikä lyhentää merkittävästi uudeleypäälylystämistäväliä. Kuumissa olosuhteissa päälylysteen jäähtymistä voidaan nopeuttaa vesikastelulla. (Karlsson *et al.* 1992).

Taulukko 3. Ilman lämpötilan ja tuulen nopeuden vaikutus massan lämpötilaan (Karlsson *et al.* 1992).

Massan jäähtyminen $+155\text{ °C}$:sta $+75\text{ °C}$:een				
Ilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)	Tuulen nopeus (m/s)	Jäähtymisaika (min)		
		Kerrospaksuus (kg/m^2)		
		50	80	100
5	0	7,5	18	28
5	10	5	12	19
15	0	8,5	20	30
15	10	6	14	21
25	0	9,5	23	34
25	10	6,5	15	22

Asfalttimassan tiivistettävyyttä heikentävät päälylysteen matala levityslämpötila, kiviaineksen huono muotoarvo (puikkoisuus, liuskeisuus), roikkuvakäyräinen massa $0,5\text{ mm}$ kohdalla (hiekan puute) sekä matala sideainepitoisuus (Laitinen & Pellinen 1992). Liian pehmeä alusta ja huono kantavuus aiheuttavat epätasaisen tiivistystuloksen. Tavallisesti kulutuskerrosmassat suhteitetaan tiiviiksi ja melko mastiksirikkaiksi. Kulutuskerrokset, jotka on tehty AB-massasta, tiivistyvät yleensä helposti. SMA-massat, jotka sisältävät kumibitumia ja/tai lisäaineita, ovat vaikeasti tiivistettäviä. (Karlsson *et al.* 1992).

2.3 Päälylysteen tyhjätila

Työkohteen Asfalttinormien mukainen laatuvaatimusluokka vaikuttaa muun muassa päälylysteen vaadittuun koostumukseen, tyhjätila-arvoon ja tasaisuuteen. Laatuvaatimusluokan (A-D) määräytymiseen vaikuttavat kohteen nopeusrajoitus sekä keskimääräinen vuorokausiliikenne (Taulukko 4).

Taulukko 4. Laatuvaatimusluokat kaksikaistaisella tiellä tai kadulla (Asfalttinormitoimikunta 2017).

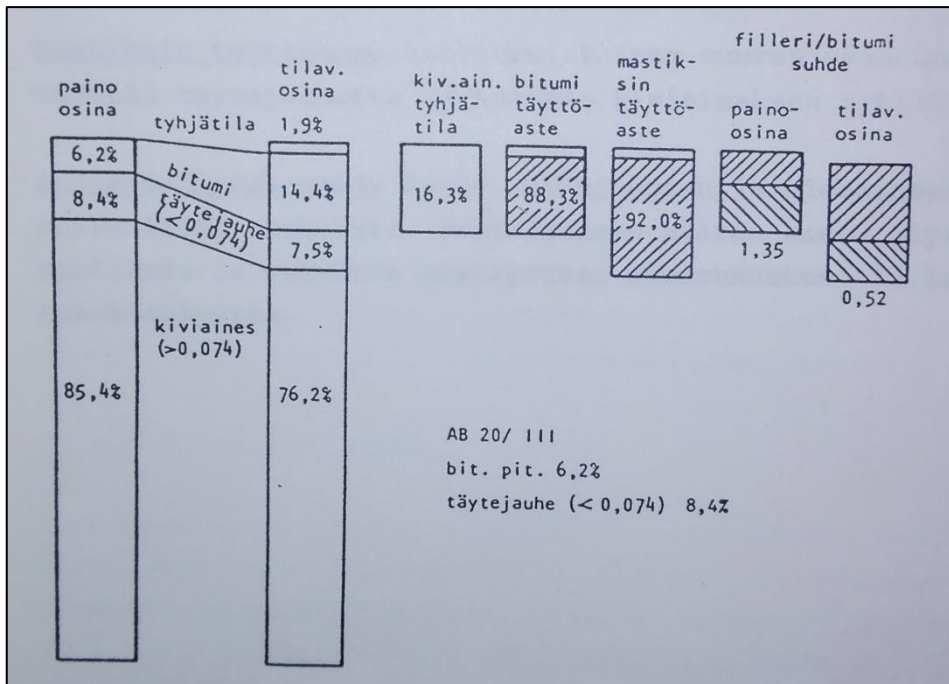
LAATUVAATIMUSLUOKKA		
	Nopeusrajoitus (km/h)	
	≥ 80	<80
	KVL (autoa/vrk)	
A	>5000	>10000
B	2500-5000	5000-10000
C	1500-2500	2500-5000
D	<1500	<2500

Asfalttimassan suunnittelutapa valitaan massan käyttötarkoituksen mukaan, vaihtoehtoina on joko toiminnallinen tai kokemusperäinen suunnittelu. Kokemusperäistä eli laskennallista suunnittelua käytetään, kun kyseessä on esimerkiksi piha, kevyen liikenteen väylä, vähäliikenteinen katu tai tie. Kokemusperäinen suunnittelu edellyttää kokemusta kyseisestä materiaalista ja se pitää sisällään massan rakeisuuden sekä sideainepitoisuuden määrittelyn. Vaativampiin kohteisiin tehtävässä toiminnallisessa suunnittelussa tehdään lisäksi tilavuussuhteiden eli kiviaineksen tyhjätilan täyttöasteen, kiviaineksen tyhjätilan, päällysteen tyhjätilan ja vedenkestävyyden ja tiivistettävyyden määrittäminen. Edellä mainittujen lisäksi hyvin vaativissa kohteissa määritetään myös deformaatiokestävyys sekä nastarengaskulumiskestävyys. Asfalttinormeissa annetaan ohjeelliset arvot tilavuussuhteille asfalttimassaa suunniteltaessa (Taulukko 5), mutta muistutetaan myös, että ne eivät ole sama asia kuin valmiin päällysteen tyhjätilavaatimus (Taulukko 6). (Asfalttinormitoimikunta 2017).

Taulukko 5. Ohjeelliset arvot tilavuussuhteille asfalttimassoja suunniteltaessa (Asfalttinormitoimikunta 2017).

Asfalttityyppi	Täyttöaste VFB til.-%	Tyhjätila V til.-%	Kiviaineksen tyhjätila VMA til.-%
AB	75 – 93	1 – 4	12 – 16
ABS	75 – 93	2 – 5	16 – 20
SMA	74 – 94	2 – 5	16 – 20
ABK	65 – 83	2 – 6	12 – 20
AA	25 – 45	14 - 26	25 – 35

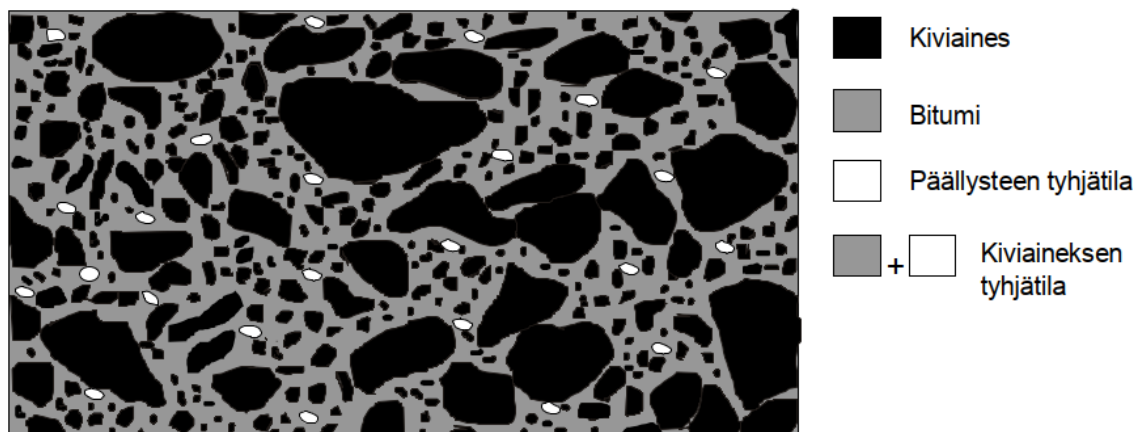
Heikkilän (1989) mukaan tiivistetyn massan paino- ja tilavuusosilla on selkeä ero kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 4. Esimerkki asfalttibetonin (AB 20) koostumuksesta massa- ja tilavuusosina (Heikkilä 1989).

Tyhjätila on laskettu suure, joka kertoo ilmahuokosten osuuden prosentteina päällysteen tilavuudesta (Kuva 4), eikä sitä voida sellaisenaan mitata. Kiviaineksen tyhjätila tarkoittaa kiviainesrakeiden väliin jäävän tilan (tyhjätila + bitumi) osuutta prosentteina päällysteen tilavuudesta (Kuva 5). Muodostuneeseen päällysteen tyhjätilaan vaikuttavat asfalttimassan ominaisuudet, levitys- ja tiivistyskalusto, työmenetelmät sekä sääolosuhteet.

Tyhjätila kuvaa päällysteen tiiviyyttä, jota arvostellaan taulukon 6 mukaisilla vaatimuksilla. Päällysteen tyhjätilan maksimi-arvot prosentteina on esitetty taulukossa 6 massatyypeittäin eri laatuluokissa (A-D). Vaikka yleisesti ottaen tavoitellaan mahdollisimman pientä päällysteen tyhjätilaa, niin toisaalta liian pieni tyhjätila voi vaikuttaa myös negatiivisesti päällysteen stabiilisuuteen (Heikkilä 1989).



Kuva 5. Päällysteen ja kiviaineksen tyhjätila (Asfalttinormitoimikunta 2017).

Taulukko 6. Sallittu tyhjätila ajoradalla eri laatuvaatimusluokissa A-D (SFS-EN 12697-8, PANK 4123) (Asfalttinormitoimikunta 2017).

Päällyste	Tyhjätila V (til-%)					
	Yksittäinen näyte			Keskiarvo		
	A, B	C	D	A, B	C	D
AB 5 - 8		≤ 7,0	≤ 8,0		≤ 6,0	≤ 7,0
AB 11		≤ 6,0	≤ 7,0		≤ 5,0	≤ 6,0
AB 16 – 22	≤ 5,0	≤ 5,0	≤ 6,0	1,0 - 4,0	≤ 4,0	≤ 5,0
SMA 5 – 22	≤ 6,0	≤ 6,0		1,0 - 5,0	≤ 5,0	
ABS 16 - 22	≤ 6,0			2,0 - 5,0		
ABK 22 - 32	≤ 8,0	≤ 8,0	≤ 8,0	≤ 7,0	≤ 7,0	≤ 7,0
AA 11 - 16	14- 25			14 – 25		

Oleellinen osa päällysteen säänkestävyyttä on saumojen tiiviys. Saumojen tiiviys tutkitaan määrittämällä tyhjätila poranäytteistä, myös silloin, kun päällysteen tyhjätilan määrittämiseen käytetään ainetta rikkomatonta menetelmää. Saumoja ei tarvitse tutkia, mikäli työmenetelmänä on käytetty alustan kuumennusta. Saumasta poratun näytteen tyhjätilan on täytettävä taulukon 6 vaatimukset lisäten kaksi prosenttiyksikköä vaihteluvälin maksimiarvoon. (Asfalttinormitoimikunta 2017).

2.4 Tyhjätilan mittaaminen

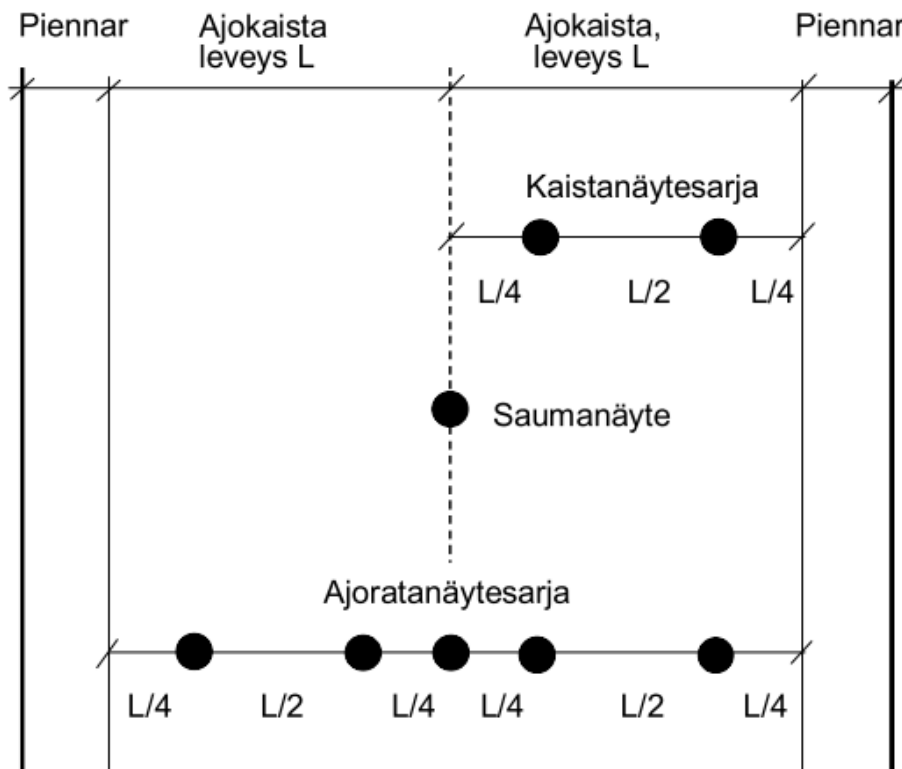
Asfalttinormien 2017 mukaan päällysteen tiiviyttä arvostellaan poranäytteiden perusteella tai ainetta rikkomattomalla menetelmällä (radiometrinen menetelmä) tai pistekohtaisella mittauksella (soveltuu tiiviille asfaltille). Lisäksi hyvin yleisesti käytettävä mittaustapa, ainakin toistaiseksi, on päällystetutkamenetelmä, jota ei kuitenkaan mainita uusimmassa Asfalttinormeissa sen epävarmuustekijöiden vuoksi.

2.4.1 Poranäytteet

Poranäytteet otetaan asfalttibetonista, kivimastikiasfaltista sekä avoimesta asfaltista standardin SFS-EN 12697-27 mukaisesti. On suotavaa, että ensimmäiset näytteet porataan ja tutkitaan välittömästi työn aloittamisen jälkeen, jotta laatuvaatimusten täytyminen voidaan varmistaa. Silloilta ei porata näytteitä ilman erityistä syytä. Poranäytteistä arvostellaan tyhjätilan lisäksi myös massamäärä (standardin SFS-EN 12697-8 mukaisesti) mikäli alusta on tasattu. Tyhjätila arvostellaan poranäytteistä tilastollisesti laskettujen tyhjätilapoikkeamien perusteella. Mikäli urakka-asiakirjoissa on erikseen mainittu, tyhjätilan arvostelussa käytetään myös keskiarvovaatimuksia yksittäisten näytteiden lisäksi (Taulukko 6). (Asfalttinormitoimikunta 2017).

Poranäytteitä nimitetään ajoratanäytesarjaksi, saumanäyteeksi tai kaistanäytesarjaksi (Kuva 6). Kaistanäytesarjojen väliset etäisyydet tien pituussuunnassa valitaan mielivaltaisesti kohteen valmistuttua. Muualta kuin ajoradalta otettavien poranäytteiden sijainnit valitaan myös

satunnaisesti. Ajoratanäytesarja porataan niin, että se sisältää saumanäytteen sekä kaistanäytteet molemmilta ajokaistoilta (Kuva 6). (Asfalttinormitoimikunta 2017).



Kuva 6. Poranäytteiden ottokohdat sekä näytteiden nimitykset (Asfalttinormitoimikunta 2017).

Vaadittujen poranäytteiden lukumäärä on riippuvainen päällystyskohteen laajuudesta. Päällystyskokonaisuus, joka on yhtä asfalttilajia sekä tehty samalta asfaltti-asemalta, samoista materiaaleista, samoilla ohjearvoilla, samalla massamäärällä ($\pm 10\%$) sekä samalla päällystyskaudella, määritellään yhdeksi päällystyskohteeksi. Poranäytesarjojen lukumäärät on esitetty taulukossa 7. Poranäytteitä otetaan vain tarvittaessa, kun kyse on erityisliikennealueista ja pienistä töistä (tiet $< 5000\text{ m}^2$ ja kadut $< 1000\text{ m}^2$). (Asfalttinormitoimikunta 2017).

Taulukko 7. Teiltä ja kaduilta otettavien ajorata- ja kaistanäytesarjojen lukumäärät (Asfalttinormitoimikunta 2017).

Päällystyskohteen laajuus (m ²)	Tiet (ajoratanäytesarjoja, kpl)	Kadut ja kevyen liikenteen väylät (kaistanäytesarjoja, kpl)
1000 - 2500	-	2
2500 - 5000	-	3
5000 - 10000	2	4
10000 - 20000	2	5
20000 - 40000	3	7
40000 - 60000	4	9
60000 - 80000	5	jne
80000-100000	6	
100000-120000	7	
120000-140000	8	
140000-160000	9	
160000-180000	10	
jne	jne	

Määritettäessä tyhjätilaa poranäytteestä kappaleen tiheys mitataan taulukossa 8 esitetyn menetelmän mukaisesti päällystetyypistä riippuen (Asfalttinormitoimikunta 2017). Sen jälkeen näytekappale hajotetaan niin, että tiivistyksessä yhteen liimatut mastiksi ja kivirakeet muodostavat irtonaisen massan. Massan tiheys mitataan menetelmän SFS-EN 12697-5 (menettely B) mukaisesti (Eskelinen *et al.* 2018). Tyhjätila lasketaan kappaleen tiheyden ja massan tiheyden osamääränä kaavan 3 avulla:

$$Tyhjätila = \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_m} \right) * 100, \quad (3)$$

jossa ρ_p on kappaleen tiheys

ρ_m on massan tiheys.

Taulukko 8. Asfalttinäytteen kappaletiheyden mittausmenetelmät päällystetyypeittäin.

Päällystetyyppi	Menetelmä
AB ja ABS	SFS-EN 12697-6 menettely A
SMA ja ABK	SFS-EN 12697-6 menettely B
AA	SFS-EN 12697-6 menettely D

Menetelmäkuvaukset:

- Menetelmässä 12697-6 A kappaleen tiheys mitataan ilma-vesipunnituksena. Menetelmä ei ota huomioon pintarakenteen huokoisuutta, vaan mittaa ainoastaan sisäistä tyhjätilaa.
- Menetelmä 12697-6 B on muuten vastaava kuin A, mutta kappaleeseen imeytetään vettä, jotta voidaan mitata myös kapillaariset ilmahuokokset.
- Menetelmä 12697-6 D perustuu näytekappaleen ulkomittoihin eli kappale mitataan työntömitalla. (Eskelinen *et al.* 2018).

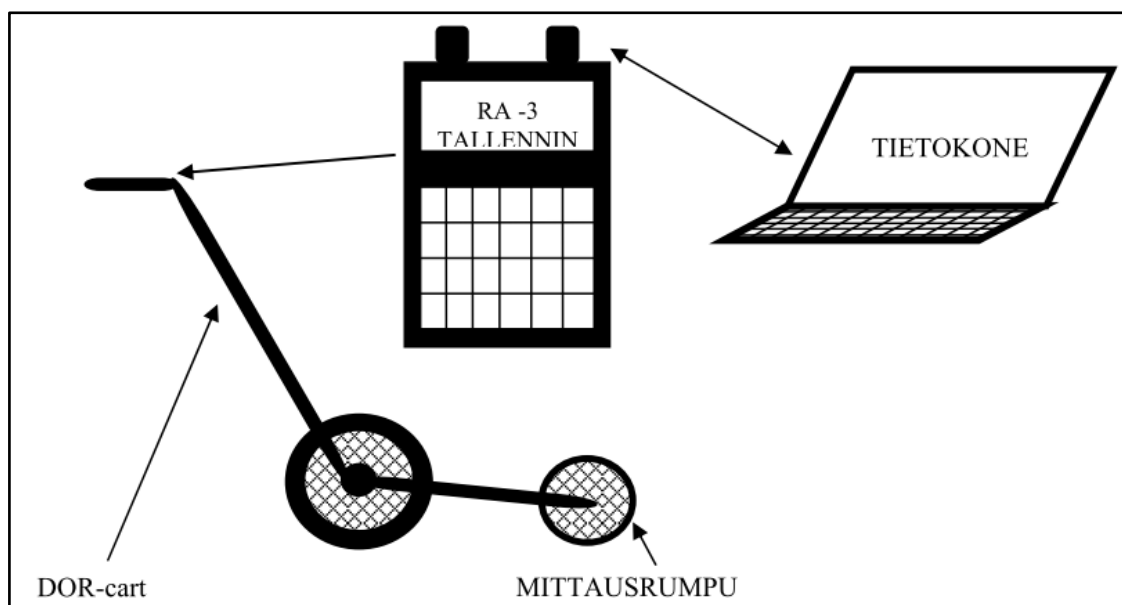
Koekappaleen massa mitataan kaikissa näissä menetelmissä samalla tavalla, joten erot syntyvät kappaleen tilavuuden arvioinnissa. Julkaisussa ”Asfalttipäällysteen tyhjätilan mittausten menetelmien arviointia” todetaan, että menetelmässä 12697-6 D virhe korostuu, mikäli kappale on epäsymmetrinen ja pinnaltaan karkea. Julkaisun mukaan menetelmien mittausepävarmuus kasvaa, kun tyhjätila pienenee. (Eskelinen *et al.* 2018).

2.4.2 Radiometrinen menetelmä

Radiometrinen eli DOR-menetelmä soveltuu eri asfalttityyppien tyhjätilan sekä tasalaatuisuuden määrittämiseen mitattavan materiaalin alustasta riippumatta. DOR-laitteella mitataan päällysteen tiheys, josta voidaan laskea päällysteen tyhjätila, kun materiaalin kiintoaineksen tiheys tunnetaan. Mittalaitetta ei voida käyttää, mikäli päällystekerroksen paksuus on yli 80 mm. Laadunarvostelussa hyödynnettävät mittaukset tulee tehdä alle 40 °C lämpötilassa, jotta lämpö ei vaikuttaisi mittaustuloksiin. Mikäli mittausrumpu kuumenee yli 70 °C asteeseen kuumen massan vaikutuksesta, vaarana on radioaktiivisen lähteen vaurioituminen. (Päällystealan neuvottelukunta 2011).

Mittalaitteen toiminta perustuu radioaktiivisen cesium Cs-137 säteilyn takaisinsirontaan. DOR-laite lähettää säteilyä mitattavaan materiaaliin. Osa säteilystä heijastuu takaisin materiaalikerrosten rajapinnasta ja osa säteilystä jatkaa matkaa tunkeutuakseen seuraavan materiaalikerroksen läpi. Heijastunut säteily osuu detektoriin eli säteilytunnistimeen. (Päällystealan neuvottelukunta 2011).

Mittauslaitteisto koostuu mittausrummusta (sisältää radioaktiivisen lähteen), DOR-cartista (ohjainteline), RA 3 tallennin yksiköstä sekä kannettavasta tietokoneesta (Kuva 7).



Kuva 7. Periaatekuva DOR-mittauslaitteistosta (Päällystealan neuvottelukunta 2011).

DOR-laite tulee kalibroida ennen jokaista päällystyskautta kalibrointiblokeilla, joiden tiheys tunnetaan tarkkaan. Cesium-137:n puoliintumisaika on noin 30 vuotta, eli säteilyvoimakkuus heikkenee noin 3 % vuoden aikana. Suurta tarkkuutta vaativissa mittauksissa DOR-laite on kalibroitava vertaamalla pistemittausta kyseisistä kohdista otettujen poranäytteiden tyhjätiloihin, jotta laite vastaa mitattavaa päällystettä, mittauspaikkaa sekä -päivää. Esimerkiksi DOR-laitetta käytettäessä tiiviin asfaltin tyhjätilan mittaukseen säteilyn voimakkuuden heikkeneminen aiheuttaa liian suuren virheen vaadittuun mittaustarkkuuteen nähden jo silloin, kun kalibroinnista on kulunut vain muutama kuukausi. (Päällystealan neuvottelukunta 2011).

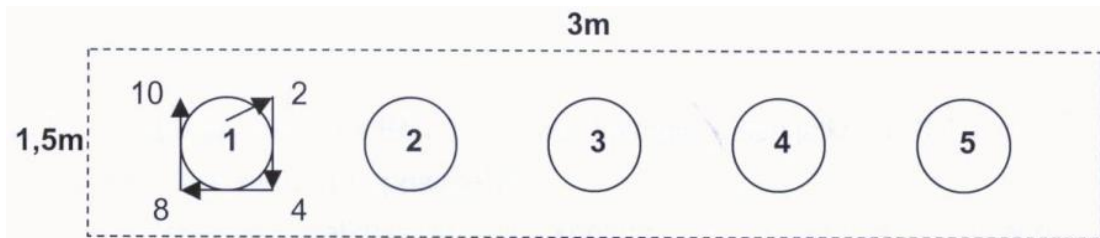
Tavanomaisesti kohde mitataan 500 metrin osuuksissa siten, että jokaisesta poikkileikkauksesta mitataan yksi mittalinja. Mittauslinjoja on neljä yhtä ajorataa kohden 0,9 ja 2,5 metrin etäisyydellä ajoradan keskilinjasta. Mittauslinjat edustavat ajoneuvon tyypillistä sijaintia ajokaistalla. Mittaustiheytenä on 1 lukema metriä kohden. Ennen mittaustyön aloittamista päällysteestä on otettava vähintään kolme pora- tai massanäytettä, joista määritetään massan tiheys ja päällysteen tyhjätila. Toimenpide on uusittava tarvittavin väliajoin, mikäli on syytä olettaa, että päällysteen ominaisuudet vaihtelevat. Ajoneuvoon kiinnitetyn DOR-mittalaitteen nopeuden tulee olla $1,5 \pm 0,2$ km/h. Moottorivetoinen, mutta käsin ohjattu mittalaite säädetään liikkumaan nopeudella $1,0 \pm 0,2$ km/h. (Päällystealan neuvottelukunta 2011).

2.4.3 Pistekohtaiset menetelmät

Pistekohtaisten mittausmenetelmien tarkoituksena on nopea ja ainetta rikkomaton päällysteen työnaikainen tasalaatuisuuden seuranta.

PQI-laite (Pavement Quality Indicator) mittaa materiaalin dielektrisyys- eli eristevakion, jonka avulla se määrittää tyhjätilan. Menetelmä perustuu siihen, että asfalttipäällysteen tiheys on miltei suoraan verrannollinen päällysteen dielektrisyiden kanssa. Laite hyödyntää sähkömagneettisia aaltoja dielektrisyiden mittaamiseen, eli se määrittää materiaalin sähköisen impedanssin Z (vaihtovirran vastus) virranvoimakkuuden I sekä jännitteen U avulla: $Z = \frac{U}{I}$. Sähköisen impedanssin avulla voidaan määrittää päällysteen eristevakio. Tämä vakio on laaduton suure, joka kertoo, kuinka moninkertaiseksi kondensaattorin kapasitanssi kasvaa tyhjiöeristeeseen verrattuna tilanteessa, jossa sen levyjen väli täytetään kyseisellä aineella. Mittauksen aikana päällysteen pinnan tulee olla kuiva sekä tasainen. Mikäli pinta on epätasainen, laite tulkitsee sen kasvaneeksi tyhjätilaksi. (Päällystealan neuvottelukunta 2012). Asfalttinormien mukaan pistekohtainen mittaus soveltuu lähinnä tiiviille asfaltille. Menetelmää käytettäessä mittauksista on laadittava seikkaperäinen mittaus- ja laadunvarmistussuunnitelma. Tuloksia arvioidaan taulukon 6 avulla. (Asfalttinormitoimikunta 2017).

Mittauksen suorittamiseksi laite tarvitsee alkuasetuksena tutkittavan asfalttimassan maksimitiheyden, joka mitataan näytteestä standardin SFS-EN 12697-5 mukaisesti. Tyhjätila- ja tiheysmittauksien tuloksia verrataan aluksi otetun näytteen tiheyteen. Päällysteen tiheys mitataan kuvassa 8 osoitetulla tavalla viidestä eri pisteestä (1, 2, 4, 8 ja 10), minkä jälkeen lasketaan mittauksen keskiarvo. Tämä toistetaan viisi kertaa kuvan 8 mukaisesti. Mittauksen jälkeen kyseisistä kohdista otetaan poranäytteet, joista määritetään tiheydet standardin SFS-EN 12697-6 mukaisesti. Poranäytteiden tiheyttä verrataan samoista kohdista laitteella mitattuun keskiarvoon ja lasketaan muodostuva erotus. Erotuksien keskiarvojen avulla saadaan laskettua mittalaitteen säätöarvo. (Päällystealan neuvottelukunta 2012).



Kuva 8. PQI-laitteen kalibrointimittausjärjestely (Päällystealan neuvottelukunta 2012).

Troxler 4640 on päällysteen tai betonin tiheyden määrittämiseen soveltuva mittalaite, joka hyödyntää gammasäteilyn (fotonit) takaisinsirontaa (Kuva 9). Laite havaitsee kahden Geigerputken avulla ilmaisimia kohti siroavien fotonien lukumäärän. Ilmaisimien havaitsemien fotonien lukumäärä vähenee, kun mitattavan materiaalin tiheys kasvaa. Troxler käyttää 8 mCi Cesium-137:ää radioaktiivisena lähteenään. Valmistajan mukaan laitteella voidaan määrittää materiaalin tiheys 25-100 mm syvyydeltä.



Kuva 9. Troxler malli 4640 (Kuva: Troxler Electronic Laboratories).

Ennen mittausta käyttäjä syöttää laitteeseen mitattavan materiaalin tavoitteellisen Marshall- ja/tai maksimitiheyden sekä päällysteen ylimmän kerroksen paksuuden. Tavoitteellinen maksimitiheys on laboratoriossa määritelty teoreettinen tiheys. Mittauksen jälkeen Troxler ilmoittaa mitatun materiaalin tiheyden Marshall-prosentteina ja/tai tyhjätila-prosentteina. (Troxler Electronic Laboratories).

Seaman C-200 (viimeisin malli Seaman C-300 on vastikään julkaistu) -mittalaitteella voidaan määrittää esimerkiksi maaperän, penkereen, jakavan kerroksen tai asfalttibetonin tiheys sekä kosteus (Kuva 10). Laite mittaa materiaalin tiheyden 15 cm:n syvyydeltä.



Kuva 10. Seaman C-200 mittalaite (Sekki 2018).

Mittalaitteen eri kokoonpanovaihtoehdot esitetään taulukossa 9. Seaman:in sisällä oleva Geigerputki mittaa materiaalista heijastuneiden (=takaisin sironneiden) gammasäteiden määrää. Mitä suurempi materiaalin tiheys on, sitä suurempi on säteilyn absorptio ja siksi myös alhaisempi mittalaitteen lukema.

Taulukko 9. Seaman C-200 mittalaitteen kokoonpanovaihtoehdot (Seaman Nuclear Corporation, muokannut Sekki 2019).

C-200 mallin lähdekokoonpano			
Kokoonpano	Isotooppi	Määrä	Ulostulo
Sivutuote	Cs 137	8 mCi	gamma
	Am 241:Be	40 mCi	neutroni
tai			
Luonnollisesti esiintyvät ja kiihdyttimellä tuotetut radioaktiiviset materiaalit	Ra 226:Be	4.5 mCi	gamma & neutroni

Seaman-mittalaite näyttää päällysteen tiheyden Marshall tiheytenä (%), jolloin siihen tulee syöttää asfaltin Marshall-arvo ennen mittausta. Laite kertoo myös päällysteen tyhjättila-prosentin, mikäli asfaltin maksimitiheys on ennalta tunnettu. (Seaman Nuclear Corporation).

2.4.4 Päällystetutka

Päällystetutkamenetelmän avulla voidaan mitata bitumilla sidottujen päällysteiden dielektrisyttä niiden alustasta riippumatta. Dielektrisyys muutetaan tyhjättila-arvoksi laskentakaavan avulla. SMA-, AB-, ABK- ja ABS-päällysteet mitataan päällystetutkamenetelmällä kaikilta kohteilta, joiden pituus on vähintään 1,0 km. Alle 1,0 km pituisten kohteiden tyhjättilat määritetään poranäytteistä Asfalttinormien mukaan. Mittaus tulee tehdä 2-21 päivää kohteen valmistumisen jälkeen. Mittauksia ei saa tehdä vesisateella, ilman lämpötilan ollessa alle +1 °C tai silloin, kun maa on jäässä. (Liikennevirasto 2018b).

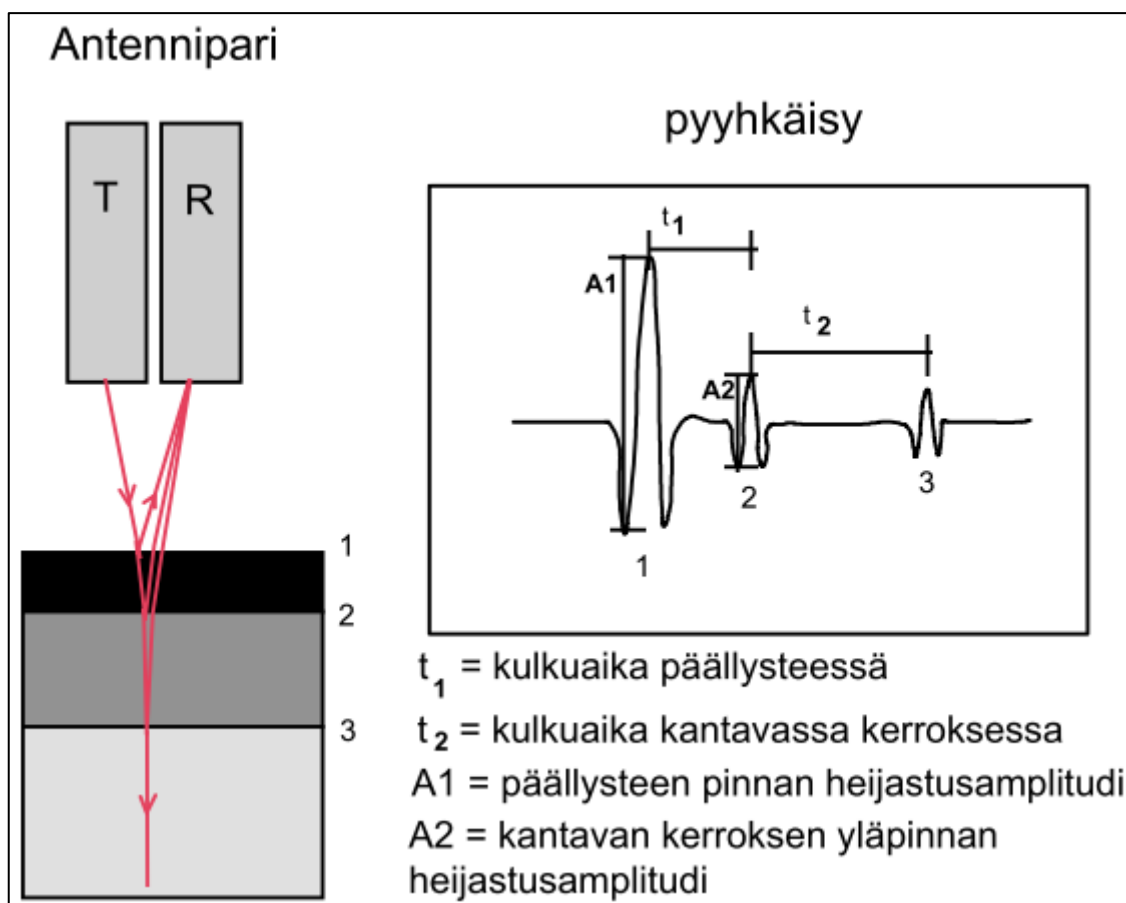


Kuva 11. Päällystetukan kalibrointi koekohteella Levannossa (Sekki 2018).

Päällystetukan referenssiarvo määritetään POM-laatan avulla mittauskauden alussa ja kalibrointi tehdään metallilevyllä (Kuva 11) sekä ennen että jälkeen mittauksen (Liikennevirasto 2018b). Päällystetukalaitteiston komponentit:

- ≥ 1 GHz:n kartiotorviantenni ja kaapelit
- yksikkö, joka sisältää mittauselektronikan
- keskusyksikkö + näyttö
- ajoneuvo, jolla liikuttaa laitteistoa
- tietokone mittaustulosten käsittelyä varten.

Kartiotorviantennin toimintaperiaate esitetään kuvassa 12, kirjain T tarkoittaa lähettävää antennia ja R vastaanottavaa antennia. Numerot 1-3 tarkoittavat tien eri rakennekerroksia. Kartiotorviantenni lähettää sähkömagneettisia pulsseja, jotka heijastuvat kohdatessaan sähköisen rajapinnan, esimerkiksi asfalttipäällysteen. Vastaanottava antenni rekisteröi heijastuneet pulssit ja laitteisto mittaa heijastusta vastaavan amplitudin A1 (päällysteen pinnan heijastusamplitudi).



Kuva 12. Kartiotorviantennin toimintaperiaate (Päällystealan neuvottelukunta 2008).

Päällystetutkamittauksessa tallennetaan metriä kohden vähintään kymmenen mittaustulosta (scan/m). Yksi mittaus kestää 20 nanosekuntia. Suurin mittaussnopeus riippuu laitteiston tiedonkeruukyvyistä. Mittaus tehdään jatkuvana kohteen alusta loppuun. Yhden mittauksen pinta-ala on noin 300 mm x 300 mm. Tavanomaisesti päällystetyistä kaistoista mitataan yksi ajoura (oikea). (Päällystealan neuvottelukunta 2008).

Tyhjätilan laskenta voidaan tehdä kahdella eri menetelmällä. Ensimmäisessä menetelmässä, kun uutta päällystelaattaa ($\geq 80 \text{ kg/m}^2$) on tehty vanhan päällysteen päälle tai sitomattoman tai sidotun kantavan kerroksen päälle, tyhjätila lasketaan dielektrisyyksien keskiarvoon perustuvalla menetelmällä. Kyseisessä menetelmässä hyödynnetään tyhjätilan ja dielektrisyyden välille määritettyä funktiota (kaava 4). Mittausten ja työmaalla tapahtuvan dielektrisyyksien laskennan jälkeen porataan kalibrointinäytteet yhdestä edustavasta työkohteesta, jonka pituus on vähintään 5 km, vähintään neljästä (2+2) eri paikasta päällystetkalla mitattua keskimääräistä dielektrisyyttä vastaavista pisteistä. (Päällystealan neuvottelukunta 2008). Menetelmäohjetta PANK-4122 tarkennetaan ohjeessa: ”Uusien päällysteiden laadunosoitusmittaukset” siten, että kohteilla, joissa massamäärä on vähintään 80 kg/m^2 otetaan kaksi näytettä jokaista mitattavaa, alkavaa 10,0 kaista-km kohti. Kalibrointikerrointa, joka on laskettu edustavasta työkohteesta mitattujen dielektrisyyksisarvojen perusteella, voidaan käyttää kaikissa urakan kohteissa, joissa on käytetty samaa asfalttiasemaa, kiviainesta ja asfalttimassaa.

Jälkimmäinen laskentamenetelmä on ns. täsmämerkkäusmenetelmä ja se koskee uusia REMIX- ja RC-päällysteitä. Mittauksen aikana ajoneuvo pysäytetään halutun referenssipaikan kohdalle, joka maalataan päällysteeseen antennin keskikohdalle. Mittauslinjan tarkka etäisyys merkitään ylös ja/tai merkataan tutkadataan. Porapaloja otetaan vähintään yksi jokaiselta mittauslinjalta ja/tai pidemmällä yhtäjaksoisilla kohteilla yksi näyte jokaiselta 10 mittauskilometriltä. (Päällystealan neuvottelukunta 2008).

$$\text{Tyhjätila } y = 272,93e^{-1,3012kex} \text{ (x välillä } 1 < x < n), \quad (4)$$

jossa k on kalibrointikerroin (lasketaan kalibrointinäytteiden tyhjätilojen sekä niitä vastaavien dielektrisyyksien avulla)

ex on mitattu dielektrisyysarvo.

Maatutkaan perustuvaa mittausmenetelmää kritisoidaan Aalto-yliopiston tuoreessa tutkimuksessa. Tutkimuksen mukaan mittaus ei ole luotettava päällysteen tyhjätilan määrittämiseen, koska se mittaa epäsuorasti vain päällysteen tiheyttä ja tyhjätilan laskentaan tarvitaan myös massan maksimitiheys, jota maatukalla ei voida mitata samasta tilavuusalkiosta. Epävarmuutta mittaukseen lisää kiviaineksen dielektrisyysvaihtelu sekä päällysteessä oleva kosteus, joka nostaa merkittävästi dielektrisyysarvoa. Tutkimuksessa todettiin, ettei mittausmenetelmän tarkkuus ole riittävä päällystysurakoissa arvonmuutosperusteena käyttämiseen. (Eskelinen *et al.* 2018).

3. ITSEMITTAAVAT ASFALTTIJYRÄT

3.1 Yleiskuvaus laitteistosta

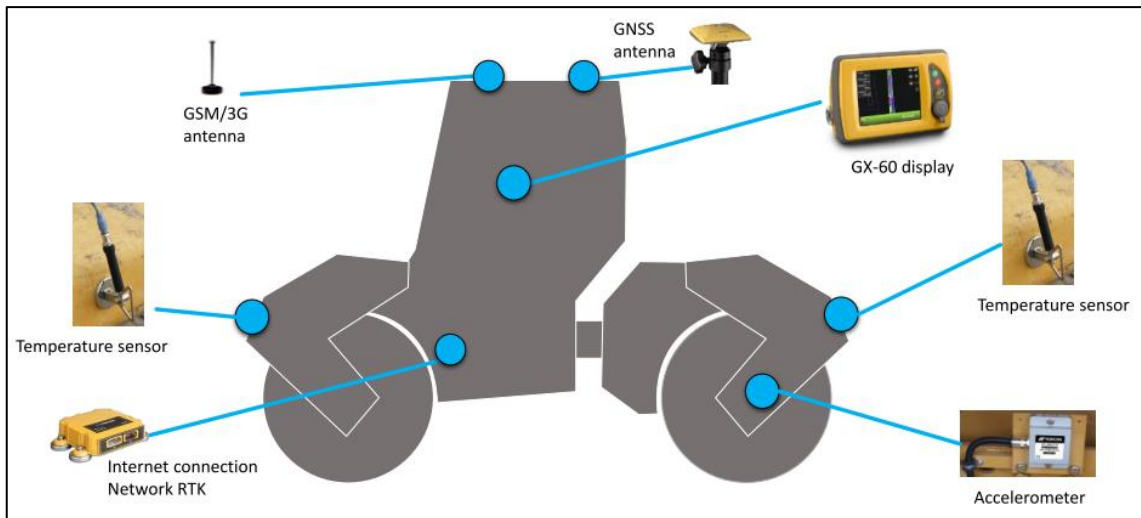
Itsemittaavat asfalttijyrät hyödyntävät pohjimmiltaan samaa teknologiaa kuin sitomattomien rakennekerrosten tiivistämiseen tarkoitettuja jyrät. Itsemittaaviin jyriin asennetut tablettitietokoneet keräävät reaaliaikaista tietoa jyrän ylityskerroista sekä tiivistettävän materiaalin jäykkyydestä paikkatietoon sidottuna. Lisäksi asfalttijyrät mittaavat myös päällysteen pintalämpötilaa. Itsemittaavien jyrien tuottamaa tietoa on mahdollista analysoida ainakin laitevalmistajien kehittämällä tietokoneohjelmilla sekä yhdysvaltalaisella vapaasti saatavilla olevalla Veta-ohjelmalla. Osa jyrävalmistajista on julkaissut ominaisuuden, jonka avulla tiivistystyötä on mahdollista seurata reaaliaikaisesti suoraan internetpalvelimelta. Taulukossa 10 esitetään itsemittaavien asfalttijyrien valmistajia sekä niiden käyttämiä tiedon analysointiohjelmiä.

Taulukko 10. Itsemittaavia asfalttijyriä ja analysointiohjelmiä (Chang et al. 2016, muokannut Niko Sekki 2018).

Valmistaja	Malli	ICMV (Mittausarvo)	Ohjelma
Ammann	ACEPlus	kB (MN/m)	Sitelink3D/ADS Office Tool
BOMAG	AsphaltManager	Evib (MN/m ²)	BCM05
Caterpillar	CAT Compaction Control and AccuGrade	CMV	VisionLink
HAMM (Wirtgen Group)	HCQ	HMV	HCQ
Sakai	CIS	CCV	Sitelink3D
Volvo	Trimble retrofit	CMV	VisionLink
TOPCON*	TOPCON retrofit	CMV	Sitelink3D
Trimble*	Trimble retrofit	CMV	VisionLink

*TOPCON ja Trimble valmistavat jyriin jälkiasennettavia laitteistoja

Kuvassa 13 esitetään itsemittaavan asfalttijyrän osat. Lämpötilanseuranta toteutetaan jyrän etu- ja/tai takavalssiin asennettujen infrapunalämpömittarien avulla. Jyrän sijainnin, nopeuden sekä ylityskertojen lukumäärän rekisteröinti tietyssä pisteessä mahdollistetaan GPS-antennilla ja radiolla/vastaanottimella. Paikannustarkkuutta voidaan lisätä työmaalle sijoitettavalla erillisellä tukiasemalla. Jyrän valssin sisään tai sen ulkopuolelle kiinnitetyn kiihtyvyyssanturin tai -anturien avulla mitataan tiivistettävän alustan jäykkyyttä.



Kuva 13. Periaatekuva itseajavasta asfalttijyrästä (Chang et al. 2016).

Jyräkuljettajan näytölle on valittavissa reaaliaikaisia karttanäkymiä: päällysteen pintalämpötila, mittausarvo (Kuva 14) sekä ylityskertojen lukumäärä (Kuva 15). Valitun näkymän sen hetkinen tilanne esitetään kuljettajalle eri värien avulla. Kuvassa 14 on näkymä päällysteen tiivistymisestä, jonka tilannetta eri värit indikoivat seuraavasti:

- punainen: ylityskertoja vaaditaan lisää
- vihreä: tiiviys riittävä
- sininen: vaaditut ylityskerrat saavutettu.



Kuva 14. Tablettitietokoneen näkymä tiivisykartasta (Kloubert & Scramm 2014).

Tavoitteellinen ylityskertamäärä syötetään ennen töiden aloittamista jyrän tietokoneeseen. Tietokone näyttää kuljettajalle ylityskertojen lukumäärän eri värein (Kuva 15). Kuvassa värit vastaavat ylityskertojen lukumäärää seuraavasti:

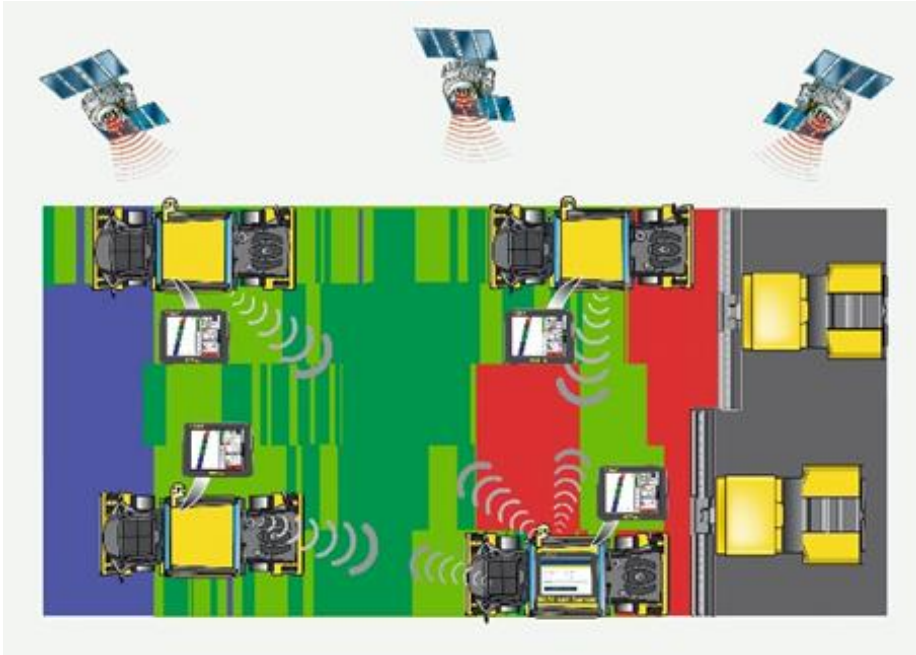
- punainen: ≥ 2 ylitystä
- vihreä: ≥ 4 ylitystä
- sininen: ≥ 8 ylitystä.



Kuva 15. Kuljettajalle tietokoneen näyttämä jyrän ylityskertojen lukumäärä (Kloubert & Scramm 2014).

Useampaa kuin yhtä itsemittaavaa jyrää käytettäessä työmaalle on mahdollista luoda oma sisäinen WLAN-verkkonsa (Kuva 16). Tällöin jyräkuljettajat voivat seurata omilta näytöiltään koko työmaan tiivistystyön etenemistä reaaliaikaisesti. Kuljettaja näkee tarkalleen, mistä ja milloin toinen kuljettaja on päällystetty tiivistänyt. Ominaisuuden käyttöarvo on huomattava esimerkiksi pimeällä, kun toinen kuljettajista käy täyttämässä jyrän vesi- tai polttoainesäiliön. Myös kohteen työnjohto voi hyödyntää samaa ominaisuutta seuraamalla tiivistystyön kulkua reaaliaikaisesti omalta tablettitietokoneeltaan.

Raportin ”Intelligent Construction Data Management (ICDM) Guidelines” mukaan IC-jyrien käyttö edellyttää reaaliaikaista kinemaattista mittausta (RTK-GPS) tai vastaavan järjestelmän käyttöä jyrissä sekä erillistä tukiasemaa tai internetpohjaista korjaustietoa työmaalla. Tarvittaessa jyrän järjestelmään tulee syöttää ja varmistaa GPS-antennin ja ICMV-mittauksia tekevän rummun välinen etäisyys. (Chang *et al.* 2016).



Kuva 16. Työmaan WLAN-verkko (Kloubert & Scramm 2014).

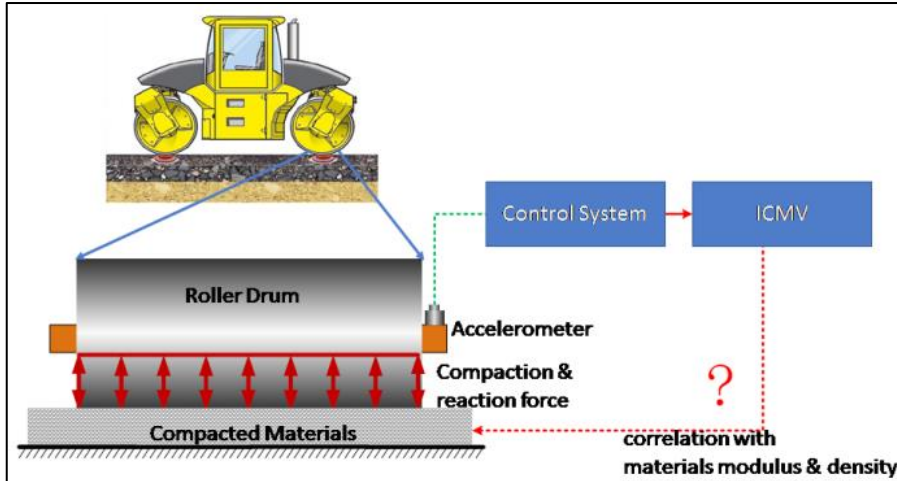
Jyrän tavoitteellinen ylityskertojen lukumäärä on määritettävä ennen töiden aloitusta ja syötettävä jyrän tietokoneeseen. Ylityskertojen lukumäärä voidaan määrittää työmaan testiosuudella tai työmaaolosuhteita vastaavalla testikentällä. Päällysteen tiiviys voidaan mitata eri tiivistysvaiheissa esimerkiksi jonkin in-situ-mittalaitteen avulla tai ottamalla poranäyte, joka tutkitaan laboratoriossa. Esimerkiksi Yhdysvalloissa (Federal Highway Administration 2014) käytetään seuraavaa menettelytapaa jyräylityskertojen lukumäärän määrittämiseen:

- Jyrällä ajetaan täryn matalalla amplitudilla ja koko ajan samoilla asetuksilla (nopeus ja täryn taajuus)
- Jokaisen jyräylityskerran jälkeen mitataan päällysteen tiheys ainetta rikkomattomalla laitteella
- Mittaukset tehdään tasaisin välein koko testikentän läpi viidessä eri pisteessä
- Tiheyslukemat ja jyräylityskertojen lukumäärä, jolla päästiin haluttuun tiiviYTEEN, tallennetaan
- Arvioitu tavoitetiheys on korkein tiheysarvo ainetta rikkomattomalla laitteella tehdyistä mittauksista, jotka on mitattu lämpötilavälillä, jolla päällyste halutaan tiivistää.

3.2 Itsemittaavien jyrrien toimintaperiaate

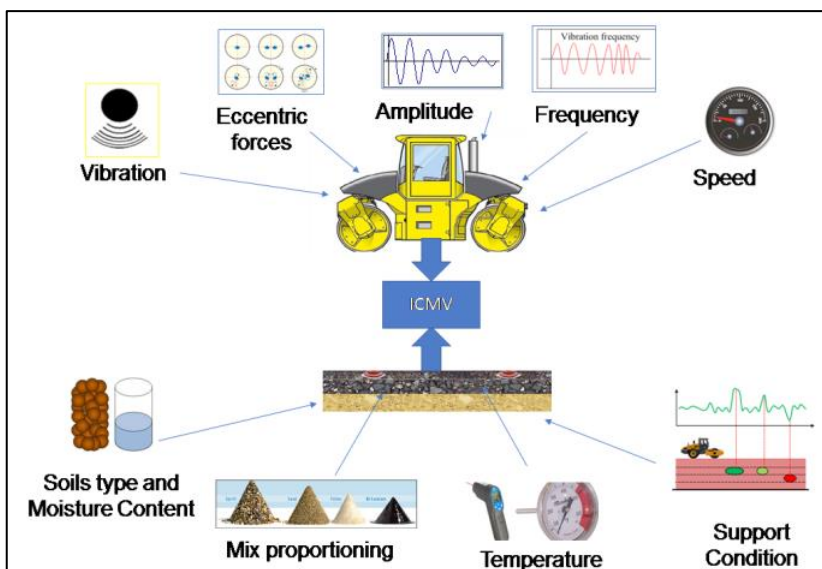
Intelligent Compaction Measurement Value (ICMV) on termi lasketuille arvoille, jotka perustuvat värähtelevään rumpuun kiinnitetyn kiihtyvyyssanturin mittauksiin, tässä työssä siitä käytetään myös nimitystä mittaesarvo. On eri tapoja laskea ko. mittaesarvo, mutta ne kaikki perustuvat pystysuoran kiihtyvyyden mittaamiseen värähtelevän rummun keskellä. Jyrän

rumpu kohdistaa tiivistysvoiman tiivistettävään alustaan, joka reagoi kohdistamalla vastavoiman takaisin rumpuun. Mitä jäykempi tiivistettävä alusta on, sitä suurempi on muodostunut vastavoima. Rummun kiihtyvyyssanturi rekisteröi muodostuneen vastavoiman. Tämän jälkeen järjestelmä käsittelee kiihtyvyyssignaaleja ja laskee mittausarvon (Kuva 17). (Federal Highway Administration 2017).



Kuva 17. Yleinen periaate mittausarvon tuottamisesta (Federal Highway Administration 2017).

Mittausarvon laskentaan vaikuttavat useat eri tekijät (Kuva 18). Jyrän osalta laskentaan vaikuttavat eniten värähtelytapa, epäkeskeinen voima, värähtelyn taajuus sekä amplitudi ja ajonopeus. Merkittävimmät tekijät tiivistettävän materiaalin osalta ovat pohjamaan tyyppi ja kosteus, asfalttimassan koostumus, sekoituslämpötila sekä päällysteen alapuolinen jäykkyys. (Federal Highway Administration 2017). Eri jyrävalmistajien mittausarvojen välillä ei ole johdonmukaista lineaarista suhdetta, mikä johtuu erilaisista laskennallisista algoritmeista ja määritelmistä (Chang *et al.* 2011).

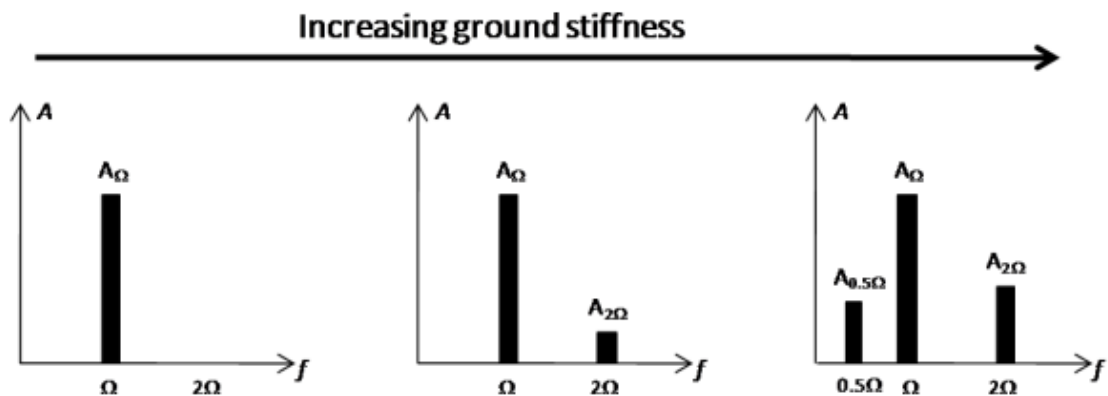


Kuva 18. ICMV:n laskentaan vaikuttavat tekijät (Federal Highway Administration 2017).

ICMV liittyy materiaalin jäykkyyteen, kun taas päällysteen tiheys liittyy materiaalisuhteisiin. Useat eri tekijät vaikuttavat asfaltin tiheyteen työmaalla:

- asfaltin raaka-aineet
- päällystepaksuus
- massan valmistus/kuljetus
- levityskalusto
- päällystyskaistan rajoitteet
- tiivistyskalusto (jyrän rumpujen koko ja työpaino)
- tiivistysmenetelmä (staattinen, dynaaminen, oskilloiva)
- jyräilykertojen lukumäärä ja
- työskentelyolosuhteet, etenkin lämpötila. (Chang *et al.* 2014).

Compaction Meter Value (CMV) on yksikötön tiiviyden parametri, jonka on kehittänyt ruotsalainen Geodynamik. Mittausarvoon vaikuttavat jyrän mitat (rummun halkaisija ja paino) sekä jyrän käytön parametrit (esimerkiksi taajuus, amplitudi, nopeus) (Kuva 19). CMV lasketaan kaavalla 5.



Kuva 19. Amplitudin muutokset harmonisessa värähtelyssä maan jäykkyyden kasvaessa (Chang *et al.* 2011).

$$CMV = C_1 * \frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}}, \quad (5)$$

jossa C_1 on vakio

$A_{2\Omega}$ on toisen kertaluvun harmonisen värähtelyn amplitudi (amplitude at the second order harmonic frequency)

A_{Ω} on amplitudi perustaajuudessa (amplitude at fundamental frequency).

Resonant meter value (RMV) on arvo, joka indikoi rummun käyttäytymistä (jatkuva kontakti, rummun hyppiminen, epäsäännöllinen liike). Rummun hyppiminen vaikuttaa CMV-mittaukseen, siksi se tulee huomioida ICMV:tä laskettaessa. RMV:tä käytetään säädettäessä

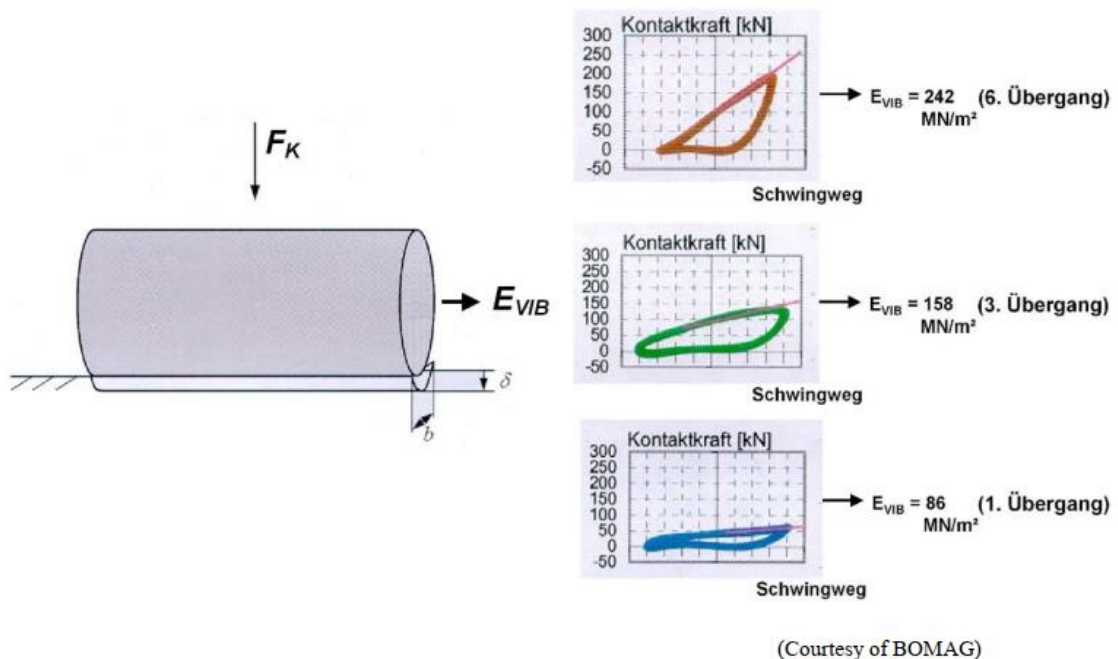
amplitudia tiivistyksen aikana. RMV lasketaan kaavalla 6. Jotkut valmistajat käyttävät tästä arvosta nimitystä bouncing value (BV).

$$RMV = C_2 * \frac{A_{0,5\Omega}}{A_\Omega}, \quad (6)$$

jossa C_2 on vakio

$A_{0,5\Omega}$ on kiihtyvyys aliharmonisessa taajuudessa, jonka aiheuttaa jyrän hyppivä liike, toisin sanoen rumpu sivuuttaa joka toisen kierroksen (acceleration at a subharmonic frequency caused by drum jumping movement). (Chang *et al.* 2014).

Värähtelyn moduuli (EVIB) perustuu yhden vapausasteen keskitettyjen parametrien malliin ja Lundbergin teoreettiseen ratkaisuun jäykästä sylinteristä elastisessa puoliavaruudessa (Kuva 20). EVIB on yhteydessä staattisella levykuormituskokeella määriteltyyn moduuliin. (Chang *et al.* 2011).



Kuva 20. Rumpu tasolla -malli ja kaltevuuden muutokset rumpun kuormituskuvaajassa (Chang *et al.* 2014).

EVIB -arvo voidaan laskea kaavasta 7:

$$Z_d = \frac{(1-\eta^2)}{E_{VIB}} * \frac{F_S}{L} * \frac{2}{\pi} * (1,8864 + \ln \frac{L}{W_d}), \quad (7)$$

jossa Z_d on rumpun siirtymä (the drum displacement)

η on materiaalin Poissonin luku (Poisson's ratio of the material)

L on rummun pituus (length of the drum)

F_S on jyrän ja tiivistettävän materiaalin vuorovaikutusvoima (roller-soil interaction force)

W_d on rummun kontaktileveys (contact width of the drum) $= \sqrt{\frac{16}{\pi} * \frac{R'(1-\eta^2)}{E_{VIB}} * \frac{F_S}{L}}$

R' on rummun säde (radius of the drum).

Elastinen jäykkyys (Stiffness value = k_b) määritellään yksiulotteisesta epäjatkuvasta mekaanisesta mallista, joka perustuu ennalta arvaamattomaan värähtelyyn (Kaava 8).

$$k_b = 4\pi^2 f^2 \left[\frac{m_d + m_e r_e \cos \Phi}{a} \right], \quad (8)$$

jossa f on kiihtyvyyden taajuus

m_d on rummun massa

$m_e r_e$ on tasapainottoman massan epäkeskinen momentti

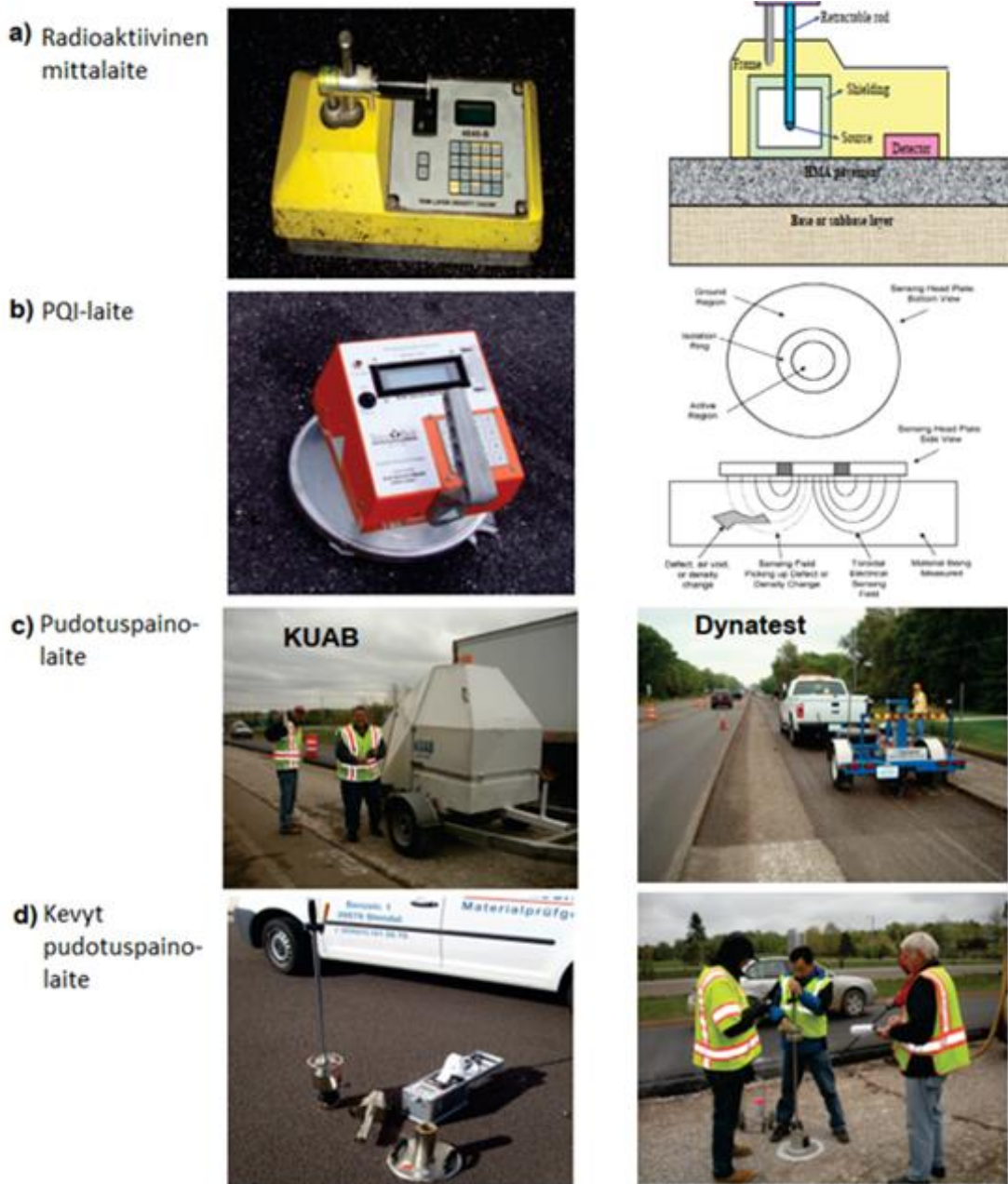
Φ on vaihekulma

a on värähtelyn amplitudi. (Chang *et al.* 2014).

Luotettavien mittausrvojen tuottaminen on haastavaa. Laskennan haasteita ovat jyrän ja tiivistettävän materiaalin välisen vuorovaikutuksen monimutkaisuus, vaikeus ratkaista mittausrvo kenttämittausten vaihtelevuudesta johtuen sekä erot mittausrvon ja perinteisten kentällä tehtävien (in-situ) pistemittausten välillä. (Federal Highway Administration 2017).

3.3 ICMV- ja in-situ -mittausten vertailu

Yhdysvalloissa on tutkittu erilaisten in-situ-mittalaitteiden sekä poranäytteiden avulla määritettyjen mittaustulosten mahdollista korrelaatiota suhteessa itsemittaaviin jyräin. Tutkimuksessa käytettyjä mittalaitteita olivat radioaktiivinen mittalaite (Troxler), ei-radioaktiivinen mittalaite (PQI) sekä normaali (FWD) ja kevyt pudotuspainolaite (LWD) (Kuva 21).



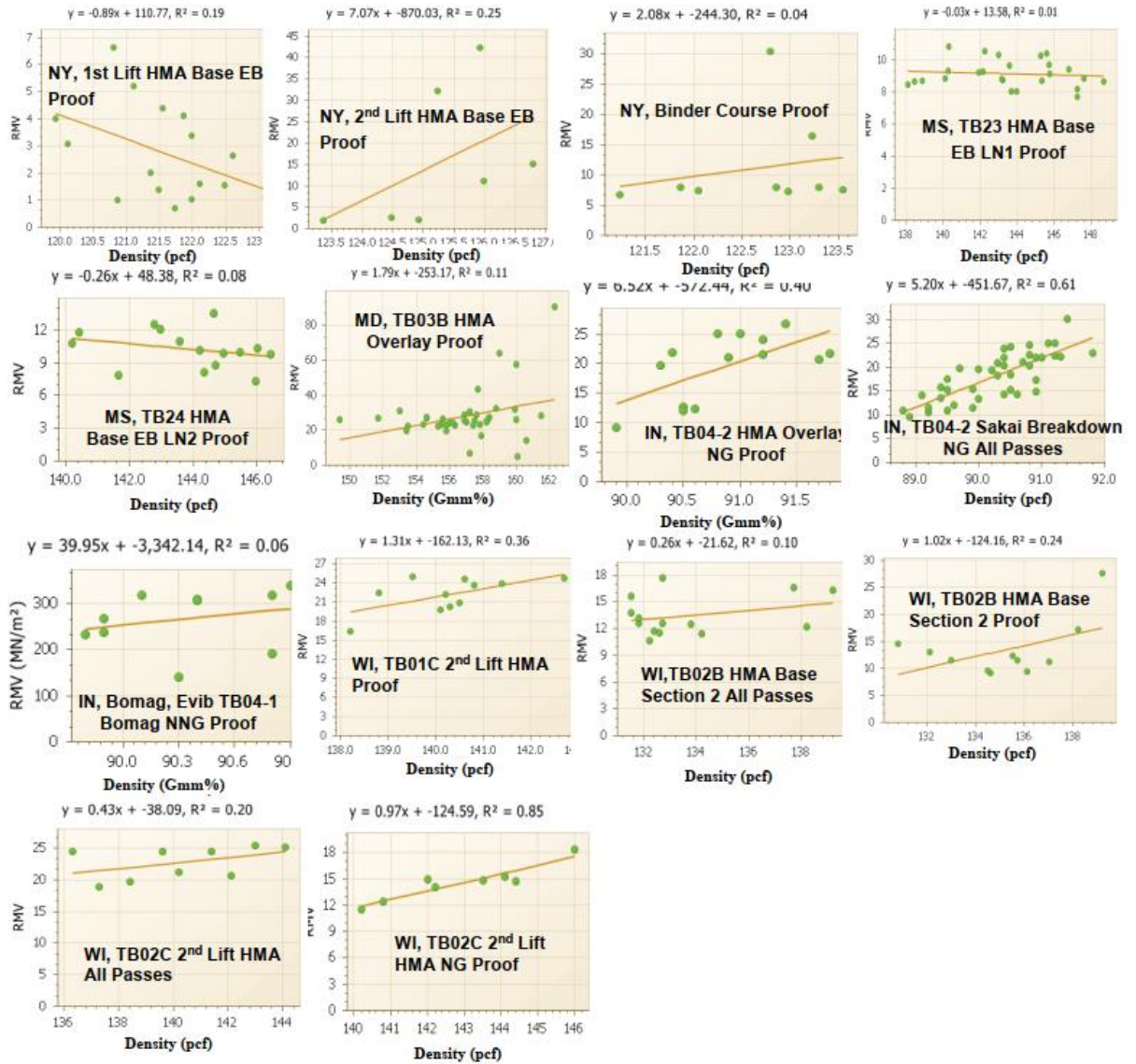
Kuva 21. Asfaltin in-situ mittalaitteet ja mekanismit (Chang et al. 2011, muokannut Niko Sekki 2018).

Tutkimuksen vertailuissa on käytetty yhden muuttujan lineaarista regressiota. Jyrän mittaamista ICMV-arvoista on muodostettu keskiarvo RMV, joka on laskettu ympyränmuotoisen alueen sisällä olevista mittauspisteistä. Ympyrän halkaisija on jyrän rummun levyinen ja ympyrän keskipiste sijaitsee kulloinkin tarkasteltavan testipisteen kohdalla. Käyttämällä keskiarvoa vähennetään paikallisten vaihteluiden vaikutusta. ICMV-arvot on mitattu eri jyräysvaiheissa: esijyräys- (breakdown), tiivistysjyräys- (intermediate) ja jälkijyräysvaiheessa (finishing) sekä erilaisilta päällystekerroksilta: kulutuskerroksen (wearing surface), sidekerroksen (intermediate layer) ja kantavan kerroksen (base layer) päältä.

3.3.1 Jyrän mittausarvo ja radioaktiivinen/ei-radioaktiivinen mittalaite

Tutkimuksen tuloksista voidaan havaita, että useimmiten ICMV kasvaa, kun päällysteen tiheys kasvaa (Kuva 22). Toisin sanoen kasvava jäykkyys vastaa suurempaa materiaalin tiheyttä. Testikohteilla ei-radioaktiivisella ja radioaktiivisella mittalaitteilla saavutettu korrelaatio suhteessa päällysteen tiheyteen oli vaihteleva. Vaihtelevuuteen vaikuttaa se, että ICMV kertoo päällystekokonaisuuden jäykkyydestä, jonka vaikutussyvyys ulottuu alapuolisiin rakennekerroksiin sekä pohjamaahan asti, kun taas tiheys mitataan ainoastaan ylimmästä päällystekerroksesta. Toinen tekijä on päällysteen lämpötilan ja/tai täryn taajuuden vaihtelevuus mittauspisteissä tiivistystyön aikana, mikä vaikuttaa enemmän ICMV-arvoon kuin päällysteen tiheyden mittaustuloksiin. (Chang *et al.* 2011).

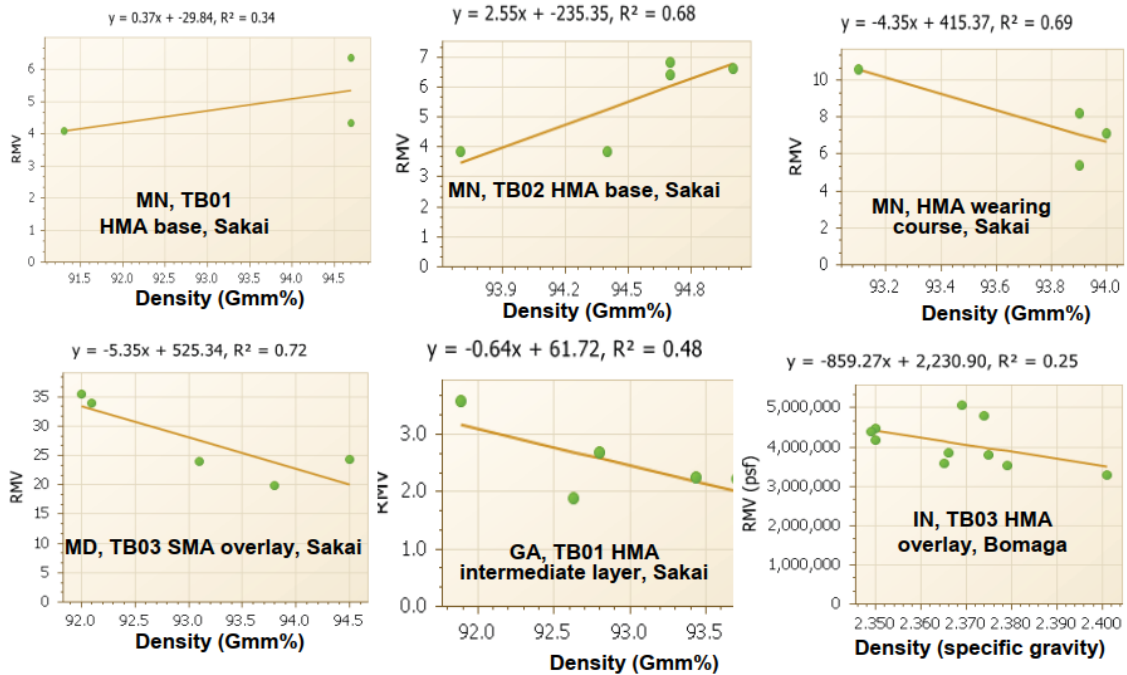
Kuvassa tiheyden vertailu tehdään jyrän all passes tai final coverage (=proof) dataan (kts. luku 3.4.1). Tiheyden mittayksikköinä ovat paunaa per kuutiojalka (1 PCF = 16,018 kg/m³) sekä teoreettinen suurin ominaispaino (Gmm). Mittauksia oli tehty viidessä osavaltiossa: New Yorkissa (NY), Mississipissä (MS), Marylandissa (MD), Indianassa (IN) sekä Wisconsinissa (WI).



Kuva 22. Korrelaatio ICMV:n ja radioaktiivisella/ei-radioaktiivisella mittalaitteella mitattun tiheyden välillä (Chang et al. 2011).

3.3.2 Jyrän mittausrarvo ja poranäytteet

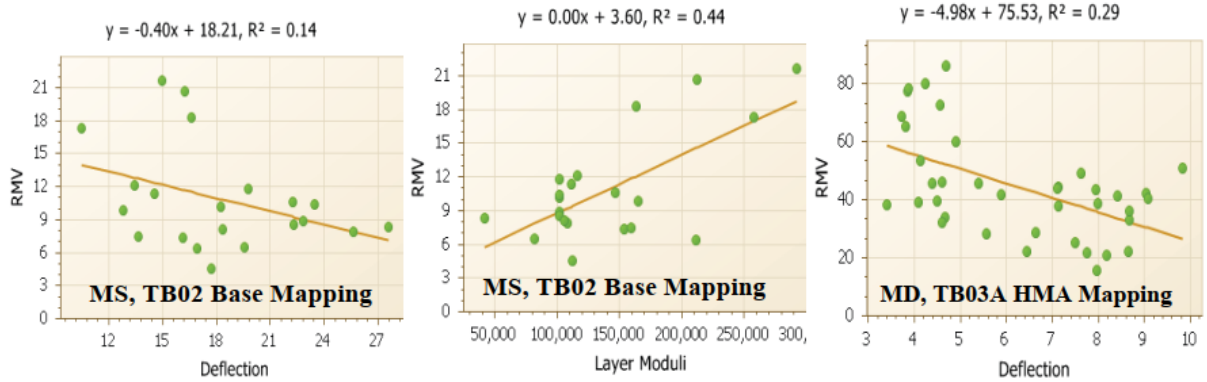
Tutkimustulosten perusteella jyrän mittausrarvon ja poranäytteistä määritetyn tiheyden välinen korrelaatio oli myös epäjohtonmukainen (Kuva 23), mihin vaikuttaa ainakin neljä tekijää. Poranäytteet on otettu vasta jälkijyräysvaiheen jälkeen, kun ICMV:n mittaus on tehty välittömästi levittimen jälkeen; poranäytteiden lukumäärä oli suppea; vaihtelevuus massan lämpötilassa sekä täryn taajuudessa testipisteiden kohdalla; ja se, että käytännössä jyrät mitaavat koko päällystekokonaisuutta eikä vain ylintä päällystekerrosta, josta poranäytteet on otettu. (Chang et al. 2011).



Kuva 23. Poranäytteiden tiheys vs. ICMV (Chang et al. 2011).

3.3.3 Mittausarvon korrelaatio pudotuspainolaitteen taipumaan

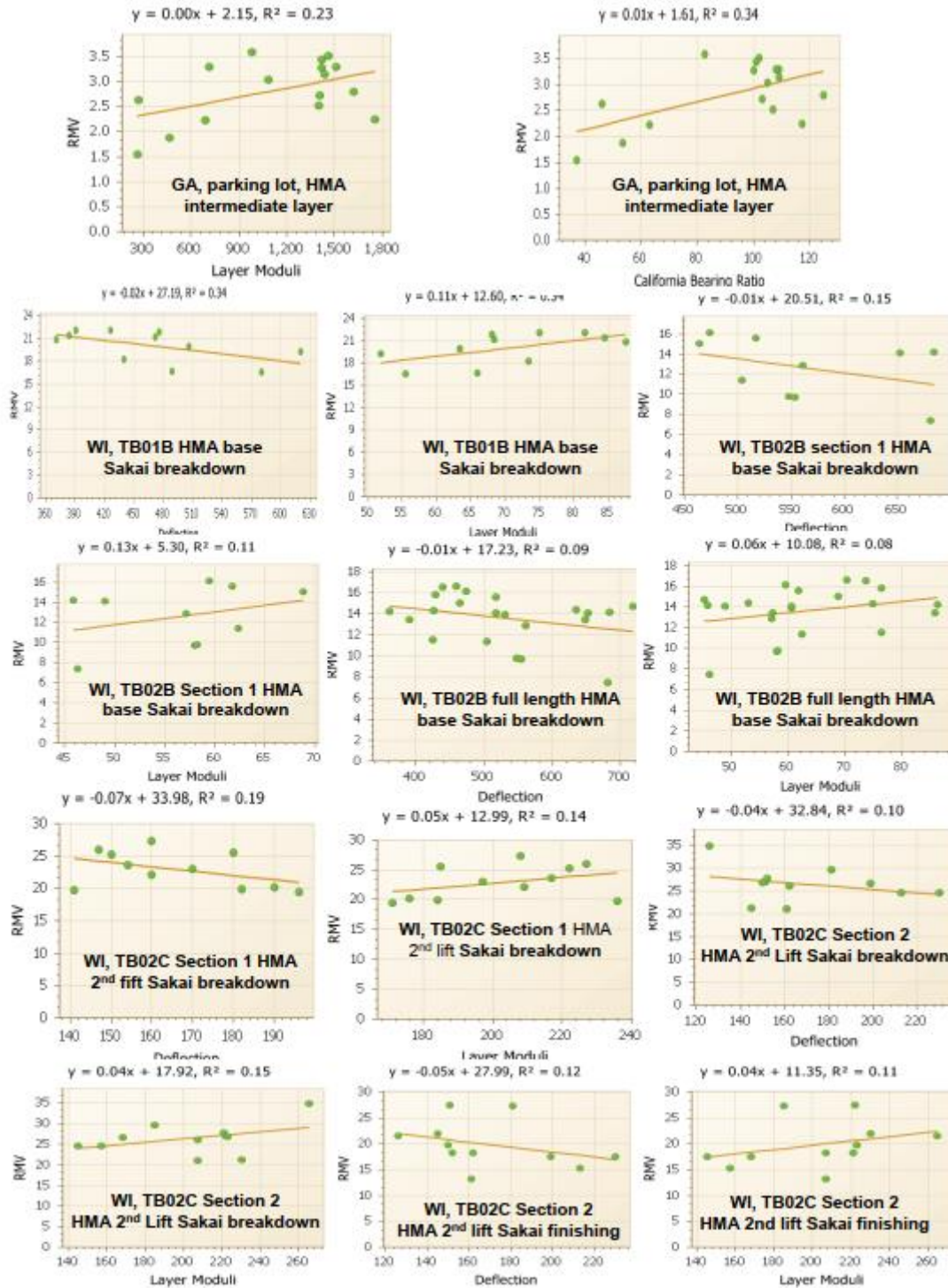
Kuvassa 24 esitetään jyrän mittausarvon ja normalisoidun taipuman tulokset (4082 kg kuorma, levyn halkaisija 300 mm). Mittaukset on tehty vanhan päällystekerroksen päältä ennen uutta asfaltointia. Tuloksista huomataan, että ICMV pienenee, kun pudotuspainolaitteen mittaama taipuma kasvaa. Tutkimuksen mukaan vaikuttaa siltä, että ICMV:n korreloi paremmin pudotuspainolaitteen taipumien kuin poranäytteiden tiheyksien kanssa. Toisaalta korrelaatiokerroin $R^2=0,29$ ei ole kovinkaan suuri, mihin vaikuttaa seuraavat asiat: ICMV ja taipuma on kaksi eri käsitettä, joiden välillä ei välttämättä ole lineaarista korrelaatiota, vaikka molemmat edustavat päällysteen ja sen alapuolisen rakenteen jäykkyyttä; vaihtelevuus massan lämpötilassa ja tärin taajuudessa testipisteiden kohdalla; muut tekijät: kosteuden vaihtelevuus tierakenteen alaosassa sekä pohjamaassa. (Chang et al. 2011).



Kuva 24. ICMV vs. hinattavan pudotuspainolaitteen normalisoitu taipuma, taipuman yksikkö $\cdot 10^{-3}$ tuumaa (Chang *et al.* 2011, muokannut Niko Sekki 2018).

3.3.4 Mittausarvon korrelaatio kevyen pudotuspainolaitteen taipumaan

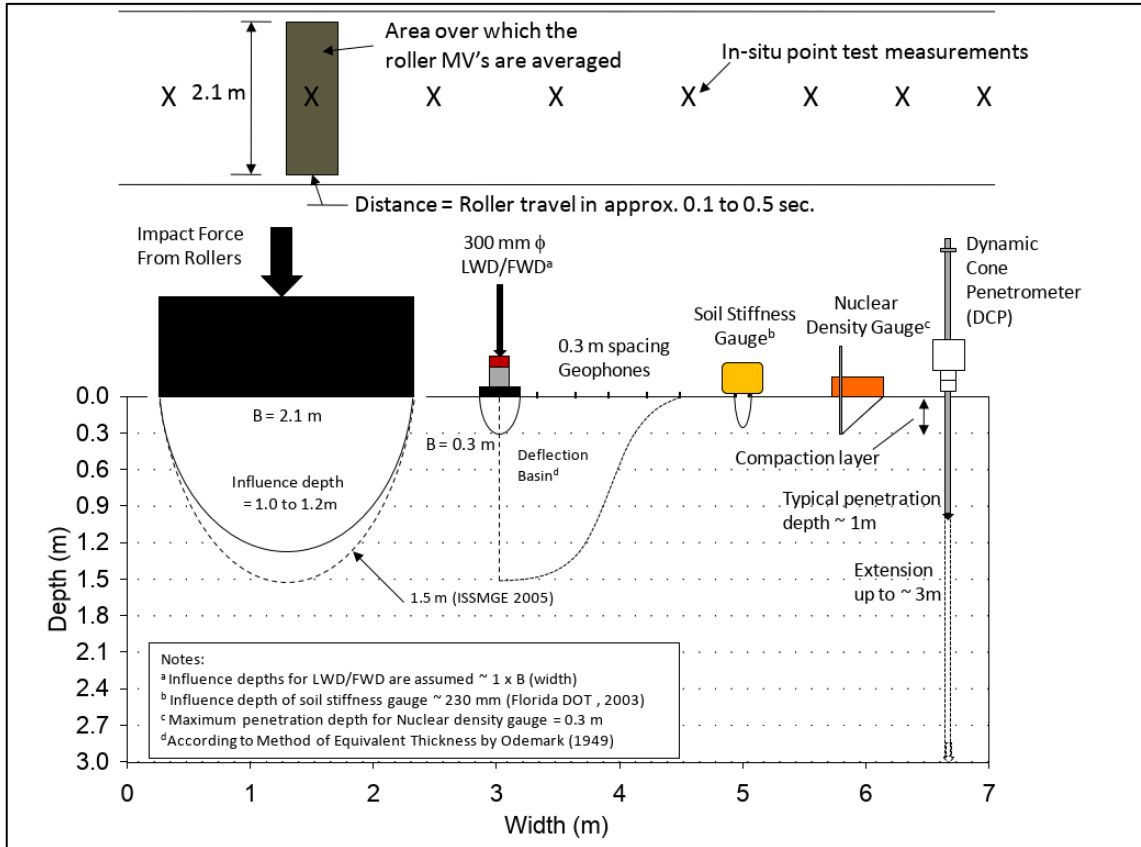
Tutkimuksen mukaan vaikuttaa siltä, että jyrän mittausarvo kasvaa, kun kevyen pudotuspainolaitteen moduuli kasvaa tai, kun taipuma pienenee (Kuva 25). ICMV korreloi paremmin kevyen pudotuspainolaitteen mittausten kuin poranäytteiden tiheyksien kanssa. Korrelaatiokerroin $R^2=0,29$ ei ole tässä tapauksessa suuri, mihin vaikuttanee samat tekijät kuin pudotuspainolaitteen yhteydessä. (Chang *et al.* 2011).



Kuva 25. ICMV vs. kevyt pudotuspainolaite. Kerrosmoduulin yksikkö MPa, taipuman yksikkö $*10^{-6}$ m (Chang et al. 2011).

Vuoden 2014 loppuun mennessä ei ollut olemassa tutkittua tietoa itsemittaavan asfalttijyrän mittaussyvyydestä. Tutkimusten mukaan sitomattomilla rakennekerroksilla itsemittaavan jyrän mittaussyvyys voi ulottua jopa 1,2 metriin mittauksen leveyden ollessa 2 m. Kuvassa 26 havainnoidaan eri mittaustapojen syvyysvaikutuksien välisiä eroja. Kuvassa mittausme-

netelmät vasemmalta oikealle: itsemittaava jyrä, pudotuspainolaite, SSG-mittari (soil stiffness gauge), radioaktiivinen tiheysmittari sekä kevyt pudotuspainolaite (DCP). Kuvan yläreunassa havainnollistetaan jyrän ja in-situ-pistemittauksen eroja ylhäältäpäin kuvattuna. (Chang *et al.* 2014).

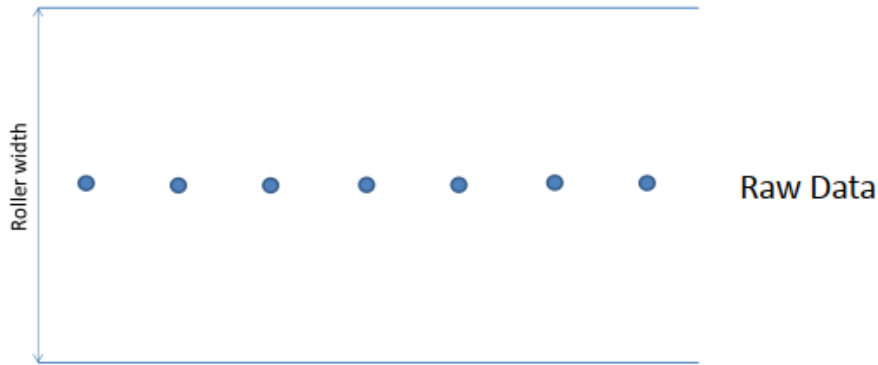


Kuva 26. Eri mittausapojen vaikutussyvyudet (Chang et al. 2014).

3.4 Tiedon prosessointi

3.4.1 Tietotyypit

Jyrien keräämä tieto on yleisesti ottaen kahdessa eri muodossa nk. raakadatana ja dataruudukkona. Raakadata tallennetaan tiivistysprosessin aikana ennen dataruudukon luomista. Raakadata koostuu yhdestä mittauspisteestä rumpua kohti, keskimäärin 10 Hz:n tai 0,3 m:n välein, siksi mittauksen ”jalanjälki” on rumpun levyinen ja 0,3 m pituinen (Kuva 27). Mittauspiste sijaitsee mittauspisteestä rumpun keskellä. Yleensä tallennetaan sekä dynaamisen että staattisen tiivistystyön data. Staattisen tiivistystyön aikana ei mitata ICMV-arvoa, koska täry ei ole käytössä. (Chang *et al.* 2016).

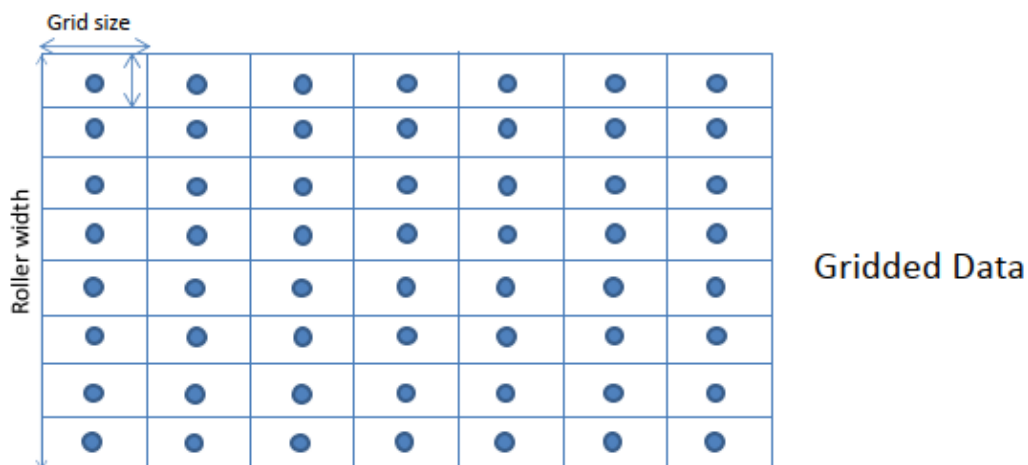


Kuva 27. Havainnekuva raakadastasta (Chang et al. 2016).

Jokainen mittauspiste sisältää ainakin seuraavat tiedot:

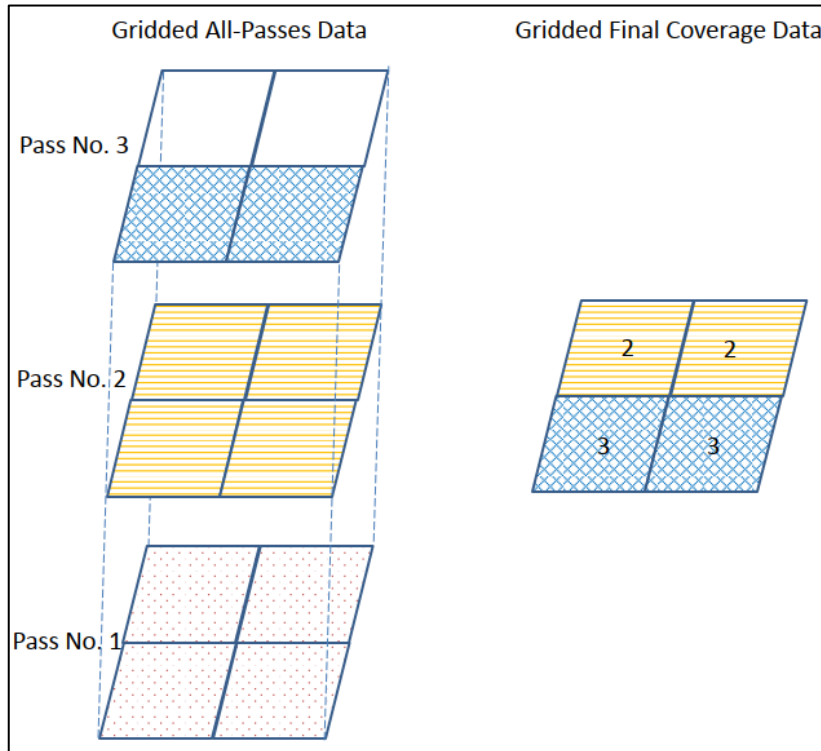
- Päivämäärä
- Kellonaika
- Koordinaatit
- Ylityskerran numero
- Ajosuunta (eteen/taakse)
- Ajonopeus
- Täryn taajuus
- Täryn amplitudi
- Päällysteen pintalämpötila
- ICMV-arvo.

Raakadata monistetaan mittausruutuina koko rummun leveydelle, toisin sanoen useat mittauspisteet kattavat koko rummun leveyden (Kuva 28). Yhden ruudun koko on yleensä noin 0,3 m x 0,3 m. Yksi tämän prosessin tarkoituksista on seurata jyrälylityskertojen päällekkäisyyksiä. Oletettavasti dataruudukko tulee olemaan standardoitu tulevaisuudessa. (Chang et al. 2016).



Kuva 28. Havainnekuva dataruudukosta (Chang et al. 2016).

Dataruudukko jakaantuu kahteen eri alamuotoon, joita ovat tieto jokaiselta ylitykseltä (=all-passes data) sekä tieto lopullisesta peitteestä (=final coverage data) (Kuva 29). Tieto jokaiselta ylitykseltä sisältää kaiken tiedon koko tiivistystyön ajalta. Tätä käytetään tavallisesti tiivistymiskäyrien muodostamiseen, jotta jyräyskaavio voidaan todentaa. Tieto lopullisesta peitteestä sisältää mittaukset viimeiseltä ylityskerralta. Kyseistä tietoa voidaan käyttää lopullisen pinnan arviointiin. Veta 4.0+ -versiossa edellytetään vain kaikkien ylityskertojen tietoa, jonka perusteella luodaan automaattisesti tieto lopullisesta peitteestä. (Chang *et al.* 2016).



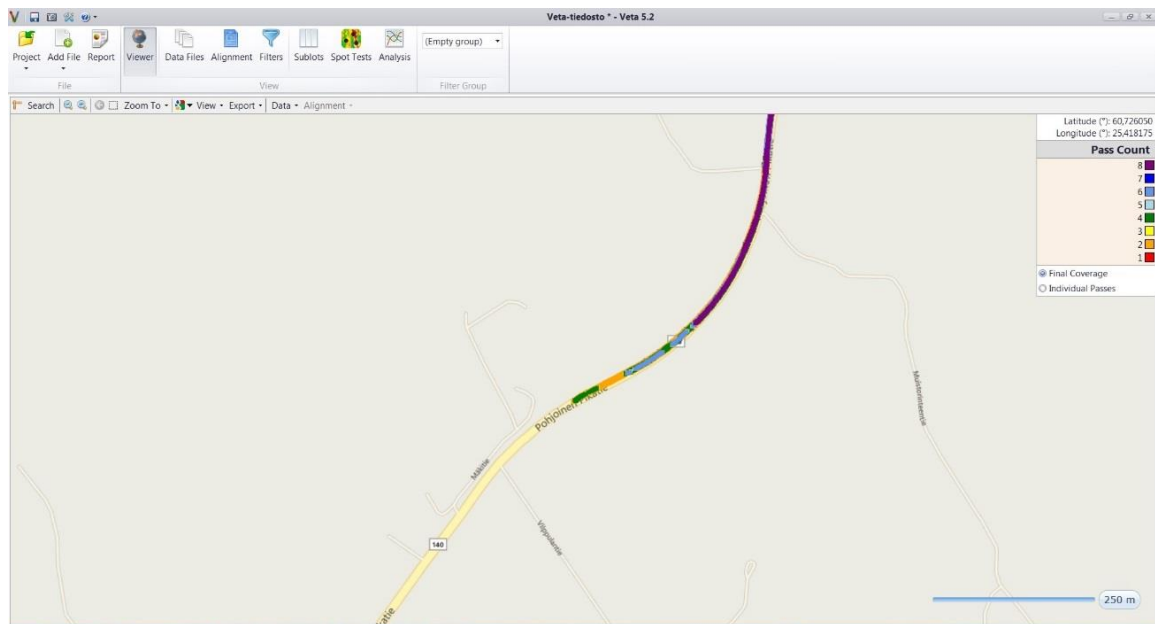
Kuva 29. Tieto jokaiselta ylitykseltä vs. tieto lopullisesta peitteestä (Chang *et al.* 2016).

3.4.2 Veta

Veta:n on kehittänyt insinööritoimisto ”The Transtec Group” ja kehitystyötä ovat rahoittaneet Minnesotan liikenneministeriö sekä Transportation Pooled-rahasto. Veta:ssa on mahdollista tarkastella jyrädataa karttapohjan päällä niin asfaltointi- kuin pohjarakennuskoh-teissa (Kuva 30). Käyttäjä voi valita kartalla tarkasteltaviksi tiedoiksi jyräylityskertojen lukumäärän, mittausarvon, täryn taajuuden tai amplitudin, jyrän nopeuden tai päällysteen pinta-lämpötilan. Dataa voi tarkastella tietyltä ylityskerralta tai lopullisesta datapeitteestä (final coverage). Ohjelmaan on mahdollista viedä myös tietoa asfalttipäällysteen lämpötilanseu-rantalaitteista. Veta:n voi ladata tietokoneelle maksuttomasti internetosoitteesta: www.intelligentcompaction.com. Ohjelma on yhteensopiva seuraavien valmistajien kanssa:

- BOMAG
- Caterpillar

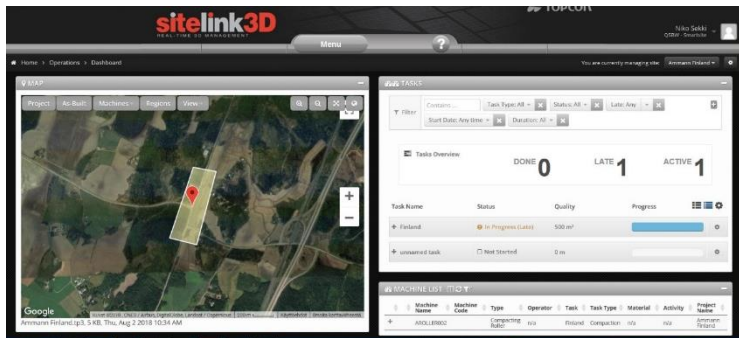
- Atlas Copco Dynapac/Dynalyzer
- Atlas Copco Dynapac/Topcon
- Sakai/Topcon
- Topcon
- Trimble
- Wirtgen/Hamm
- Volvo.



Kuva 30. Näkymä Veta -ohjelmasta, jyrän ylityskertojen lukumäärä (Sekki 2018).

3.4.3 Ammann

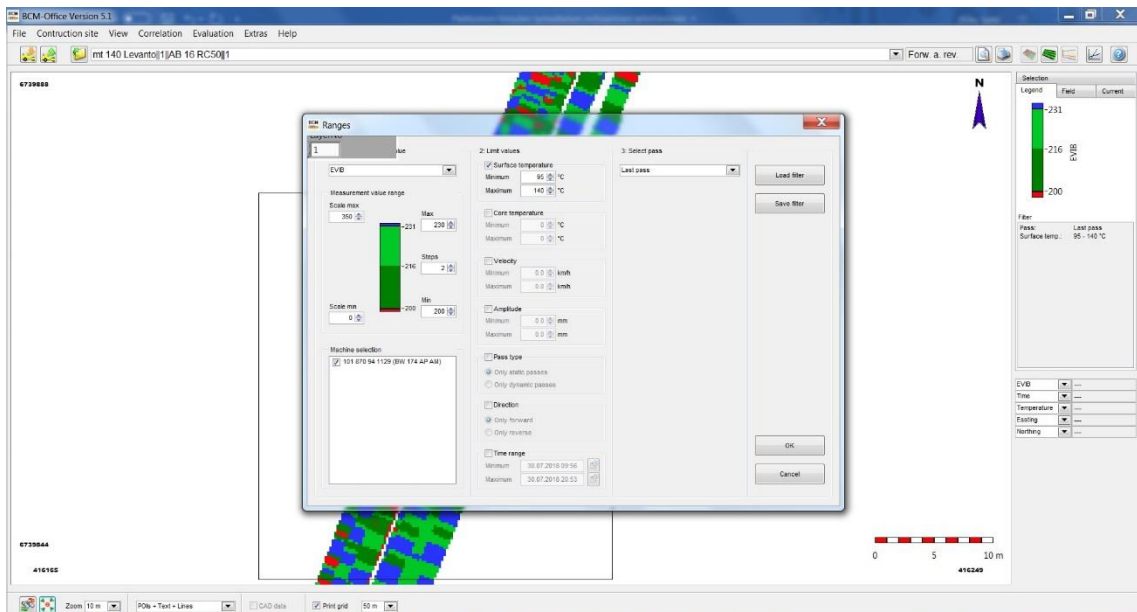
Ammannin jyrän tallentamaa tietoa voidaan analysoida joko valmistajan omalla ADS Office Tool-ohjelmalla tai Topconin tarjoamalla Sitelink3D-internetpalvelimella (Kuva 31). Tiedonsiirto jyrästä ADS Office Tool-ohjelmaan tehdään USB-muistitikun kautta. Tällä hetkellä tiedon muuntaminen Veta-ohjelman kanssa yhteensopivaksi onnistuu vain Sitelink3D:n avulla. Tämän diplomityön yhteydessä ei ollut mahdollista tutkia tarkemmin ADS Office Tool-ohjelman tai Sitelink3D:n ominaisuuksia ja käytettävyyttä.



Kuva 31. Näkymä Sitelink3D-palvelimesta (Sekki 2018).

3.4.4 Bomag

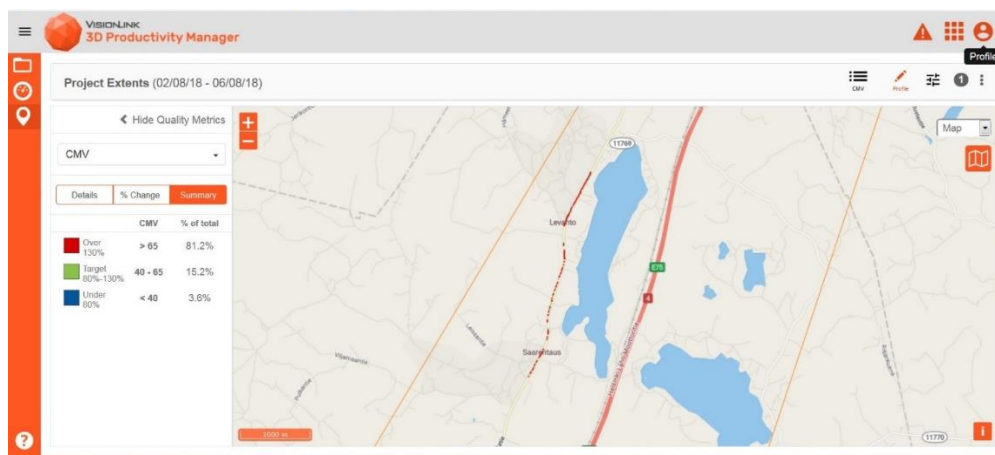
Bomag-jyrän keräämä tieto siirretään vielä toistaiseksi USB-muistikulla tietokoneeseen analysoitavaksi. Tietojen tarkastelu tehdään valmistajan omalla BCM Office-ohjelmalla (Kuva 32). Ohjelman käyttäjä voi määrittellä raja-arvot päällysteen lämpötilalle, jyrän ajonopeudelle, kulkusuunnalle, tärinän amplitudille tai kellonajalle, jossa jyrän mittaamien tietojen tarkastelu tehdään. Tarkasteltavia tietoja ovat esimerkiksi EVIB-arvo, päällysteen lämpötila sekä tiivistystapa. Käyttäjällä voi tutkia korrelaatiota EVIB-arvon sekä itse asettamansa mittausarvon välillä. Työsuorituksesta voidaan tehdä tuloste, jossa kerrotaan perustietoja tiivistystyöstä sekä toteutuneet minimi-, maksimi- ja keskiarvot suureista: EVIB, tärinän amplitudi sekä taajuus ja jyrän ajonopeus. EVIB-arvosta kerrotaan myös, miten mittausarvo on jakautunut käyttäjän määrittämille väleille. BCM Office-ohjelmasta tieto on muunnettavissa .csv-muotoon Veta-ohjelmassa tarkasteltavaksi.



Kuva 32. Näkymä BCM Office -ohjelmasta (Sekki 2018).

3.4.5 Caterpillar

Caterpillarin jyrän tallentama tieto siirretään langattomasti VisionLink'in tarjoamalle internetpalvelimelle (Kuva 33). Jyrän työskentelyä on mahdollista seurata palvelimella lähes reaaliaikaisesti. Tärkeimmät VisionLink 3D Productivity Managerin karttapohjan päällä tarkasteltavat suureet ovat jyrän ylityskertojen lukumäärä, CMV-arvo ja sen muutos kahden viimeisimmän ylityskerran välillä, ajonopeus sekä päällysteen pintalämpötila. Tietoja voidaan tarkastella erilaisten suodattimien avulla, joita ovat esimerkiksi täry kytkettynä päälle/pois, jyrän kulkusuunta, määritelty ylityskerta tai lämpötilaikkuna. Tiivistystyöstä on katsottavissa statistiikkaa ylityskertojen lukumäärästä, CMV-arvosta ja sen muutoksesta kahden viimeisimmän ylityskerran väliltä, ajonopeudesta sekä päällysteen lämpötilasta, joita verrataan ennalta-asetettuihin tavoitearvoihin. VisionLinkistä on ladattavissa erilaisia Excel-taulukoita tai Veta-yhteensopiva .csv-tiedosto tiivistystyöstä.



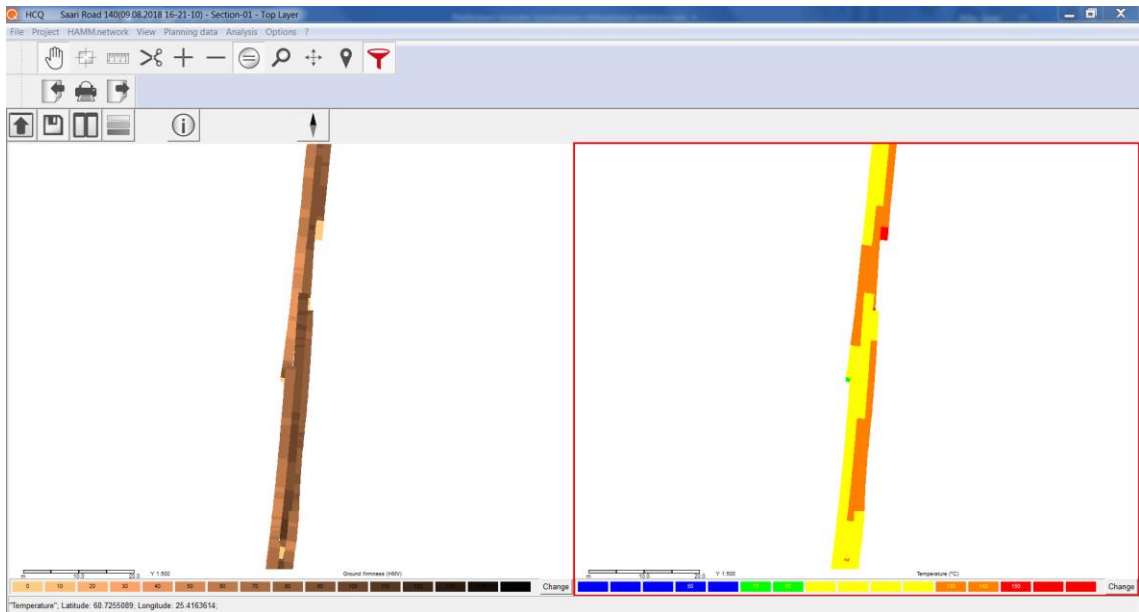
Kuva 33. Näkymä VisionLink 3D Productivity Managerista (Sekki 2018).

3.4.6 HAMM

Hamm-jyrän keräämä tieto siirretään USB-muistitikun välityksellä jyrästä tietokoneeseen tai langattomasti suoraan pilvipalveluun. Tietoa analysoidaan valmistajan omalla HCQ-ohjelmalla, jossa tarkasteltaviksi suureiksi voi valita jyrän ylityskerrat, HMV-arvon, päällysteen pintalämpötilan sekä täryn taajuuden tai amplitudin. HMV-arvo on kalibroitu käyttäjän valitseman arvon esimerkiksi Troxlerilla määritetyn päällysteen tiheyden kanssa. Suureiden tarkastelu voidaan tehdä käyttäjän määrittelemässä aika- tai lämpötilaikkunassa, jyrän tiettyssä kulkusuunnassa sekä tiivistystyypeittäin (tärinä, oskilloiva, staattinen tai kumipyörä tiivistys). Tarkastelu on mahdollista tehdä joko yhdessä tai jaetussa näkymässä (Kuva 34). Jaetussa näkymässä voidaan samanaikaisesti katsoa kahta eri suuretta, joita ovat jyrän ylityskerrat, HMV-arvo, päällysteen lämpötila, täryn taajuus ja amplitudi, jyrän ajonopeus sekä korkeusasema. Lisäksi HCQ-ohjelma näyttää kohdat, joissa rumpu on ollut kaksoishyp-pyliikkeessä. Data replay-ominaisuuden avulla tiivistystyön kulku on katsottavissa jälkikäteen.

HCQ-ohjelmalla on mahdollista muuntaa tiivistystyön aikana tallennetut tiedot Veta-yhteensopiviksi tiedostoiksi. Muunnetut tiedostot nimetään jyräkohtaisesti sekä sen mukaan, onko kyseessä etu- (F) vai takarumpu (R) jyrän pääkulkusuunnassa. Veta-ohjelmaan vietään tiedostot eturummusta, joka kerää tiedon työn aikana.

Valmistaja on julkaissut HCQ WITOS -nimisen pilvipalvelun, jossa esimerkiksi työnjohtaja voi seurata jyrän työskentelyä omalta päätelaitteeltaan reaaliaikaisesti. Valittavissa ovat vastaavanlaiset näkymät kuin tietokoneohjelmalla jälkikäteen tarkasteltaessa.



Kuva 34. Jaettu näkymä HCQ-ohjelmasta (Sekki 2018).

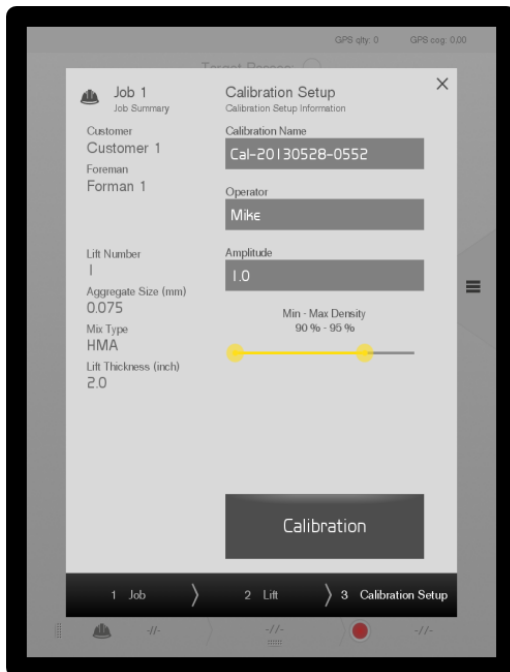
3.4.7 Volvo

Volvon tiettyihin jyrämalleihin on saatavissa Density Direct -järjestelmä, jonka avulla jyrä voidaan ennalta kalibroida tiivistettävälle materiaalille. Kalibroinnin myötä käyttäjälle luetaan tarkempi tiiviydenmittaustulos.



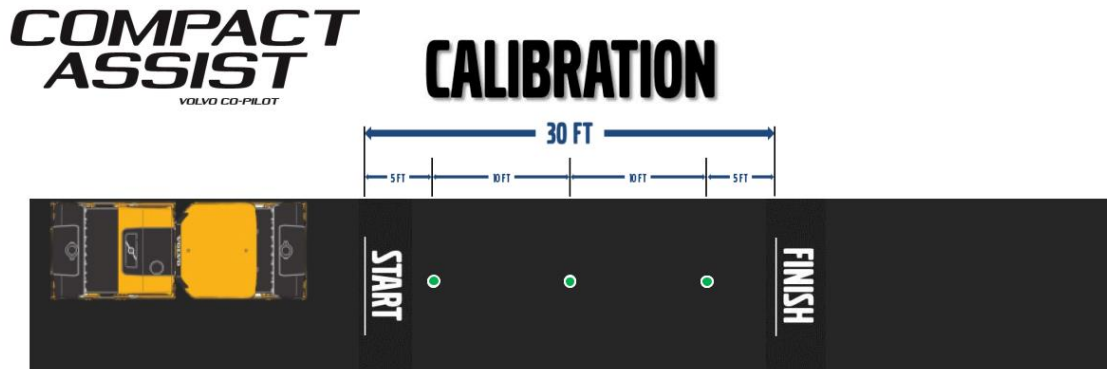
Kuva 35. Tablettitietokone Volvon jyrässä (Sekki 2018).

Jyrä kalibroidaan jyräämättömällä materiaalilla ennen varsinaista työsuoritusta. Aluksi tablettitietokoneeseen (Kuva 35) syötetään asfalttimassan maksimirakoko, asfalttimassan sekoitustapa (kuuma, matalalämpö tai kivimastiksi), päällysteen kerrospaksuus ja jyräilytyskertojen tavoitemäärä. Tämän jälkeen valitaan päällysteen tavoiteltu tiheysväli prosentteina (esimerkiksi 92 % - 97 %) sekä täryn amplitudiasetus (Kuva 36).



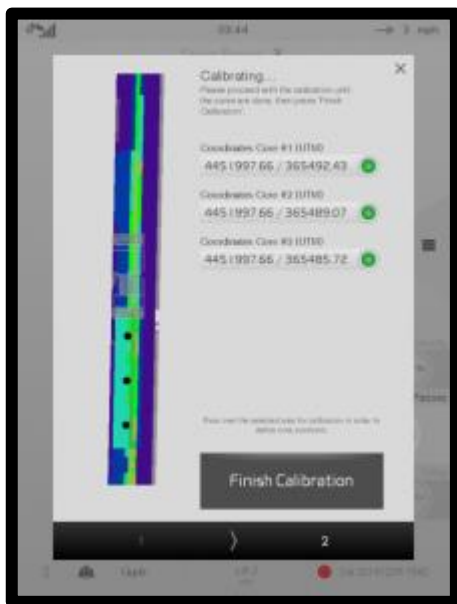
Kuva 36. Kalibroinnin lähtötiedot (lähde: Volvo 2017).

Kalibroinnin alussa jyräkuljettajan on jättäydyttävä riittävän etäälle asfaltinlevittäjästä. Kuljettaja kiihdyttää jyrän tavoitenopeuteen täry päällä ja painaa näytöltä ”Start Calibration”. Jyrällä ajetaan levittäjää kohti vakionopeutta vähintään yhdeksän metrin matka, minkä jälkeen jyrän kulkusuunta muutetaan takaisin kohti lähtöpistettä (Kuva 37).



Kuva 37. Jyrän kalibrointi (lähde: Volvo 2017).

Edestakainen ajo tehdään vielä vähintään kerran, kunnes järjestelmä antaa koskettaa painiketta ”Finish Calibration”. Järjestelmä tallentaa kolmen pisteen koordinaatit, jotka sijaitsevat perättäin noin kolmen metrin etäisyydellä toisistaan (Kuva 38).



Kuva 38. Kalibrointipisteiden koordinaatit (lähde: Volvo 2017).

Nämä pisteet voidaan etsiä GPS-vastaanottimen avulla. Pisteistä määritetään päällysteen tiheys esimerkiksi in-situ-mittalaitteen tai poranäytteiden avulla. Tutkimalla poranäytteet laboratoriossa saavutetaan tarkin mahdollinen mittaustulos. Lopuksi jyrän tablettitietokoneeseen syötetään pisteistä määritetyt tiheysarvot prosentteina.

Työnsuorituksen jälkeen järjestelmä näyttää yhteenvetoraportin tiivistystyöstä. Raportissa kerrotaan esimerkiksi, kuinka suurella osalla työkohdetta saavutettiin tavoitteenmukainen ylityskertamäärä, päällysteen tavoitetiheys ja kuinka suuri osa tiivistystyöstä tehtiin tavoitelämpötilaikkunassa. Volvolla ei ole omaa tietokoneohjelmaa jyrän tallentamien tietojen analysointiin. Tiedot tallennetaan suoraan .csv-tiedostoina, jotka ovat tarkasteltavissa Veta-ohjelmalla.

4. KENTTÄKOEEN TOTEUTUS

4.1 Koekohde

Koekohteeksi valikoitui Kaakkois-Suomen ELY-keskuksen Tienpäälystysurakan ELY Etelä 1 TP 2018 kohde 1015 maantie 140 Levanto (Kuvat 39 ja 40). Työmenetelmiksi kohteelle oli suunniteltu REM-käsittely 20 kg/m² lisämässalla, jonka jälkeen tehtiin 100 kg/m² päällystelaatta. Kohdevalinnalla pyrittiin luomaan mahdollisimman yhteneväiset olosuhteet jokaiselle kokeiltavalle jyrälle, kun REM-käsittely oli tehty etukäteen. Reunapainumat oli korjattu tasausmassalla ennen REM-käsittelyä, joka oli tehty 2.-5.7.2018. Kenttäkoe toteutettiin 30.7.-9.8.2018 välisenä aikana.

Kokeiluun osallistui viisi jyrävalmistajaa: Bomag, Ammann, Caterpillar, Hamm sekä Volvo (Kuvat 41-45). Päällysteen jyräys toteutettiin kahdella yksiköllä eli ensimmäinen jyrä suoritti sekä esi- että tiivistysjyräyksen ja toinen jyrä jälkijyräyksen. Jokaisen valmistajan jyrää kokeiltiin ainoastaan ykkösjyränä heti levittäjän jälkeen kahden työvuoron ajan, poikkeuksina kaksi viimeistä työpäivää, jolloin itsemittaavia jyrä käytettiin samanaikaisesti sekä ensimmäisenä että toisena jyränä (Taulukko 11). Viimeisen työvuoron tarkoituksena oli kokeilla kahden itsemittaavan jyrän WLAN-ominaisuuksia.

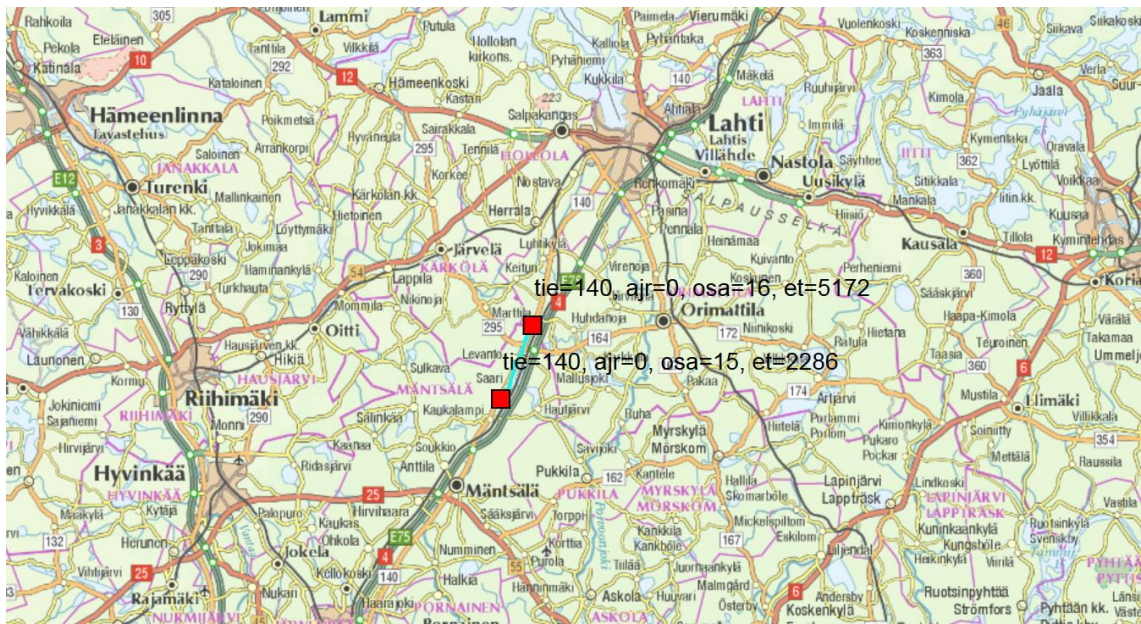
Taulukko 11. Kokeilun aikataulu.

PVM	Jyrävalmistaja
30.7.	A
31.7.	A
1.8.	D
2.8.	D
3.8.	B
6.8.	B
7.8.	E
8.8.	E/C
9.8.	C/C

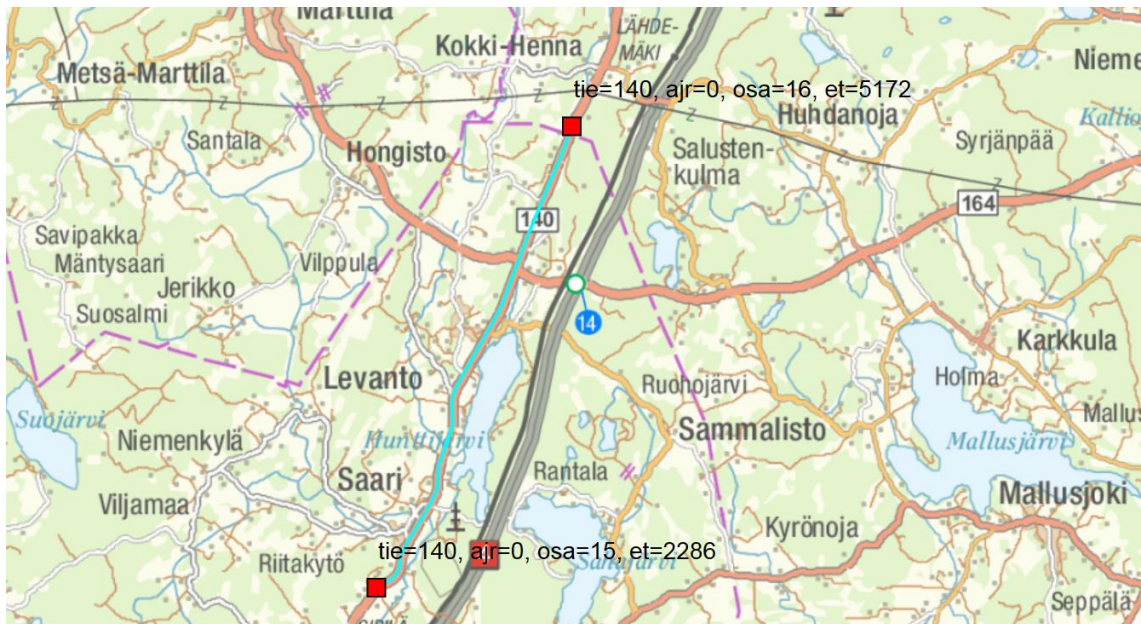
Kenttäkoekohteen perustiedot:

- Tierekisteriosoite:
 - Alkupiste: osa 15, etäisyys 2 286
 - Loppupiste: osa 16, etäisyys 5 172
- Pituus 8 960 m
- Keskimääräinen vuorokausiliikenne: 2 237
- Alustan laatu: AB

- Työmenetelmä: REM-menetelmällä tasatulle alustalle LTA
- Päällysteen laatu: AB 16/20 REM-tasaukseen ja AB 16/100 RC50 LTA
- Päällysteen laatuvaatimusluokka: C
- Päällystekiviaineksen:
 - Nastarengaskulutuskestävyysluokka: A_N 14
 - Litteysluku: FI₂₀
 - AVCP luokka: 2+
- Bitumiluokka 70/100
- Asfalttimassan suunnittelu: kokemusperäinen



Kuva 39. Koekohteen sijainti (Kartta: Väyläviraston Tiemappi 2018).



Kuva 40. Koekohteen parannettava osuus (Kartta: Väyläviraston Tiemappi 2018).

4.2 Jyrien tekniset tiedot

Taulukossa 12 esitetään kokeilussa mukana olleet jyrät sekä niitä edustavat yritykset Suomessa. Jyrien kokeilun kannalta oleellimmat tekniset tiedot esitetään taulukoissa 13-17. Jokaisella valmistajalla on hieman toisistaan poikkeavat nimitykset jyrien ominaisuuksille ja järjestelmille, minkä vuoksi tiedot esitetään niiden alkuperäisellä kielellä.

Taulukko 12. Kokeiluun osallistuneet jyrämallit ja niiden maahantuojat Suomessa.

Merkki	Malli	Maahantuojaja
BOMAG	BW174AP-4 AM	Asfalttikone ABM Oy
Ammann	ARP 95	RealMachinery Oy
Caterpillar	CD10	Wihuri Oy
Volvo	DD105	Volvo CE Finland
HAMM	DC+90i	Wirtgen Finland Oy

Bomag BW174AP-4 AM



Kuva 41. BOMAG BW174AP-4 AM (kuva: Tuomas Vasama 2018).

Taulukko 13. BOMAG BW174AP-4 AM tekniset tiedot (lähde: BOMAG 2018).

Weights		
Operating weight CECE w. ROPS-cabin	9500	kg
Axle load, front / rear CECE	5000/4500	kg
Static linear load, front / rear CECE	29,8/26,8	kg/cm
Grossweight	11100	kg
Exciter system		
Amplitude	0,46/0,20	mm
Frequency	45/45	Hz
Centrifugal force	80/34	kN
Vario system		
ASPHALT MANAGER	front	
Frequency	46	Hz
Amplitude directed (hor./vert.)	0,73	mm
Centifugal force	146	kN

Ammann ARP 95



Kuva 42. Ammann ARP 95 (Sekki 2018).

Taulukko 14. Ammann ARP 95 tekniset tiedot (lähde: Ammann 2018).

Weight and driving characteristic		
Operating weight	9 650	kg
Maximum weight	11 110	kg
Stat. lin. load of front drum	28,6	kg/cm
Stat. lin. load of rear drum	28,8	kg/cm
Max. transport speed	10	km/h
Max. working speed	-	
Climbing ability	30	%
Turning radius inner (edge)	2945	mm
Crab mode	1350	mm
Compaction forces		
Frequency I	42 (2520 VPM)	Hz
Frequency II	55 (3300 VPM)	Hz
Frequency ACE min./max.	37 (2220 VPM) / 57 (3420 VPM)	Hz
Amplitude I	0,66	mm
Amplitude II	0,26	mm
Amplitude ACE min. / max.	- / 0,85	mm
Centrifugal force I	92	kN
Centrifugal force II	62	kN
Centrif. force ACE min. / max.	- / 100 kN	kN

Caterpillar CD10



Kuva 43. Caterpillar CD10 (Sekki 2018).

Taulukko 15. Caterpillar CD10 tekniset tiedot (lähde: Caterpillar 2018).

Weights		
Standard machine	10120	kg
Maximum machine	11440	kg
Static linear load	29,5	kg/cm
Auto-Adjustable Compaction (AAC)		
Frequency	42	Hz
Amplitude Range high/low	0,84/0,18	mm
Centrifugal Force high/low	128,9/27,1	kN
Frequency	53,3	Hz
Amplitude Range high/low	0,45/0,18	mm
Centrifugal Force high/low	111,1/43,6	kN

Volvo DD105



Kuva 44. Volvo DD105 (Sekki 2018).

Taulukko 16. Volvo DD105 tekniset tiedot (lähde: Volvo 2018).

Machine weights (with cab)		
Operating weight1	10500	kg
Weight @ front drum	5330	kg
Weight @ rear drum	5170	kg
Shipping weight2	10025	kg
Vibration		
Frequency	40 / 50	Hz
Amplitude	86 / 45	mm
Centrifugal force	112 / 99	kN
Vibration and drum system		
	Auto vibration	
	Selectable vibration: front, rear, both	
	Drum offset function to both sides	
	2 frequencies, 2 amplitudes	

Hamm DC+90i



Kuva 45. Hamm DC+90i (Sekki 2018).

Taulukko 17. Hamm DC+90i tekniset tiedot (lähde: Hamm 2018).

Weights		
Operating weight with cabin	9530	kg
Operating weight, max.	12360	kg
Static linear load, front/rear	29,9/27,8	kg/cm
Vibration		
Vibration frequency, front, I/II	42/50	Hz
Vibration frequency, rear, I/II	42/50	Hz
Amplitude, front, I/II	0,61/0,40	mm
Amplitude, rear, I/II	0,61/0,40	mm
Centrifugal force, front, I/II	84/78	kN
Centrifugal force, rear, I/II	84/78	kN

4.3 Koesuunnitelma

Jokaisen jyrän tiivistämältä päällysteosuudelta otettiin poranäytteitä jyrien mittaaman tiedon perusteella. Näytteitä otettiin kolmesta eri kohdasta periaatteella: hyvä, keskiverto ja huono mittaustulos. Näytteenottokohdat määritettiin jyrien mittaaman tiedon perusteella ja niiden sijainnit merkattiin päällysteeseen GPS-vastaanottimen avulla. Jokaisesta näytteenottokohdasta otettiin neljä poranäytettä (Kuva 46). Lisäksi jokaiselta jyräosuudelta otettiin kolme yksittäistä poranäytettä, joiden sijainnit määritettiin silmämääräisesti niin, että saataisiin vaihtelua poranäytteiden tyhjätiloihin. Näiden kohtien sijaintitiedot tallennettiin myös GPS-vastaanottimella. Yhteensä poranäytteitä otettiin seitsemän kappaletta jokaisen jyrän tiivistämältä osuudelta. Kaikki näytteet porattiin päällysteestä irti 3 – 7 vuorokauden ikäisinä.



Kuva 46. Poranäytteiden ottotapa (Sekki 2018).

Valmiille päällysteelle tehtiin urakkavaatimusten mukaisesti päällystetutkamittaus. Lisäksi tätä tutkimusta varten tehtiin työnaikana lämpökameramittaus ja päällystystyön jälkeen jatkuva taipumamittaus (TSD) sekä pistelasermittaus (MPD). TSD-mittauksen tuloksista tulokittiin kohteen tierakenteen sekä pohjamaan kantavuutta. Ajatuksena oli tutkia, kuinka paljon tierakenteen ja pohjamaan kunto vaikuttavat jyrien mittausarvoihin ja löytyykö TSD:n ja jyrien mittausarvojen väliltä korrelaatiota. Pistelasermittauksen tuloksista etsittiin päällysteen lajittumakohtia ja tutkittiin, millaisia mittausarvoja jyrät näyttivät vastaavissa kohdissa.

5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

5.1 Poranäytteet ja itsemittaavat jyrät

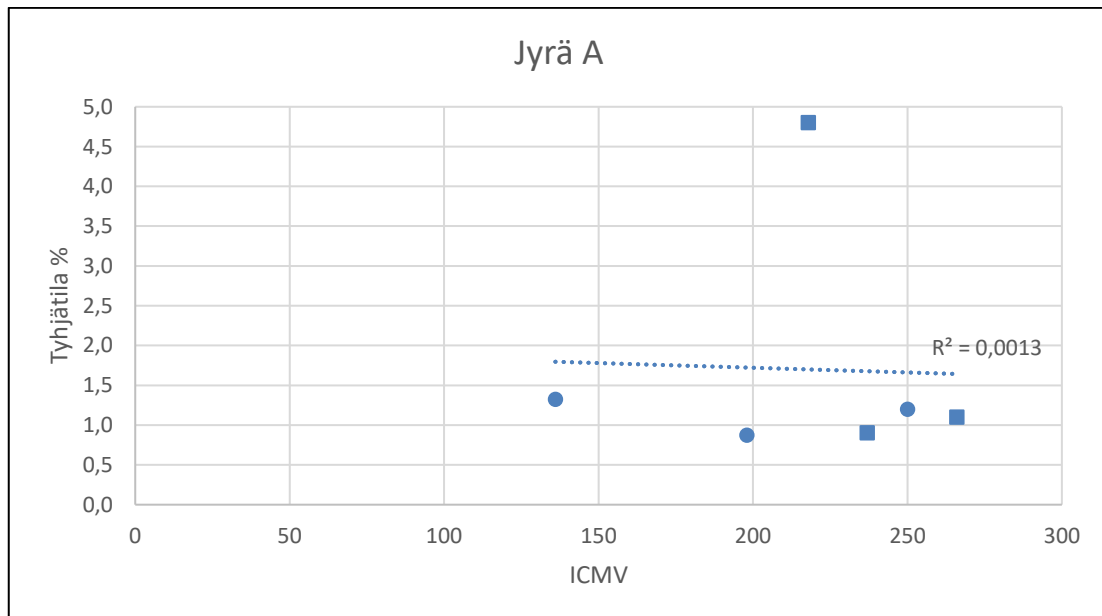
Poranäytteet tutkittiin YIT Infra Oy:n keskuslaboratoriossa. Poranäytteistä määritettiin massan tiheys menetelmällä SFS-EN 12697-5 (hydrostaattinen), päällysteen tiheys menetelmällä SFS-EN 12697-6 (kuiva) ja tyhjätila menetelmällä SFS-EN 12697-8. Jyrien keräämän tiedon perusteella otettujen poranäytteiden (4 kpl) tyhjätilojen tuloksista laskettiin keskiarvo, jota verrattiin jyrien mittausarvoihin. Kolme jyrää viidestä sai tallennettua tietoa kokeilun aikana. Jyrä B ei ollut tallentanut tietoa kahdesta silmämääräisesti määritetystä poranäytteenottokohdasta ja jyrä C:n mittausarvo oli 0 yhdessä silmämääräisesti määritetyssä näytteenottokohdassa. Syitä, miksi itsemittaavan jyrän keräämässä tiedossa on epäjatkuvuuskoh-
tia, ovat esimerkiksi: kuljettaja ei ole muistanut painaa tiedon tallentamistoimintoa päälle aloittaessaan tiivistystyön, maaston katvealue, jossa jyrä on menettänyt yhteyden satelliitteihin tai kuljettaja on käynyt täydentämässä jyrän vesi- ja/tai polttoainesäiliön, jolloin tiivistystyön on hetkellisesti hoitanut kakkosjyrä.

Tulokset esitetään jyrittäin (A-C) alla olevissa taulukoissa 18-20 sekä pistekaavioissa (Kuvat 47-49), joissa pystyakselina on poranäytteen tyhjätila (%) ja vaaka-akselina jyrän mittausarvo (ICMV). Kaavioihin on lisätty myös trendiviiva sekä korrelaatiokerroin R^2 . Mitä lähempänä nollaa korrelaatiokertoimen R^2 arvo on, sitä huonompi korrelaatio on tyhjätilan ja jyrän mittausarvon välillä. Toisaalta, mitä lähempänä R^2 arvo on lukua 1, sitä parempi korrelaatio vallitsee tyhjätilojen ja mittausarvojen välillä.

Näytteenottokohdat pyrittiin valitsemaan jyrien keräämästä tiedosta niin, että valittu kohta olisi mahdollisimman edustava. Toisin sanoen kulloinkin tarkasteltava arvo olisi mahdollisimman laajalla alueella, jotta minimoitaisiin paikannusepä tarkkuudesta johtuva muutos mittausarvoissa. Näytteenottoa määriteltäessä päällysteen minimilämpötilana pidettiin noin +80 °C, jotta jyrien hyvä mittausarvo ei johtuisi siitä, että päällysteen lämpötila olisi ehtinyt jo laskea ennen tiivistämistä. Näytteenotto kohtien sijainnit määritettiin jyrän lopullisesta peiteaineistosta (final coverage).

Taulukko 18. Poranäytteiden tulokset jyrän A osuudelta.

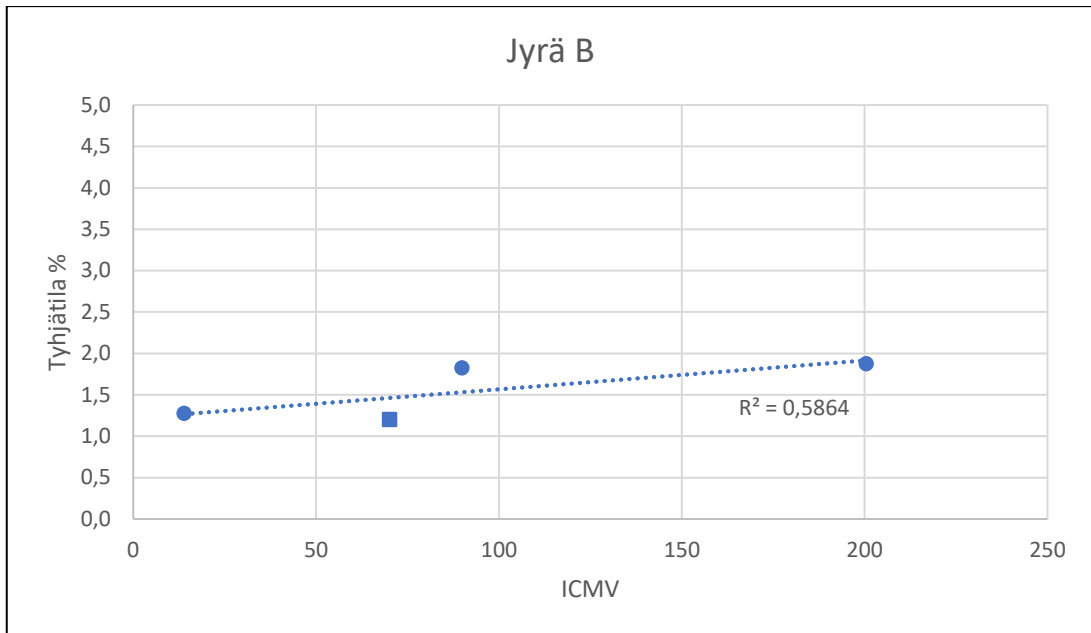
Jyrä A					
Näytetyyppi	Päällysteen tiheys (kuiva) kg/m ³	Massan tiheys (hydrostaatt.) kg/m ³	Tyhjätila %	ICMV	Tiivistys- lämpötila
Sarjanäyte	2416	2446	1,2		
Sarjanäyte	2417	2447	1,2		
Sarjanäyte	2427	2467	1,6		
Sarjanäyte	2428	2460	1,3		
Keskiarvo			1,325	136	97
Sarjanäyte	2436	2452	0,6		
Sarjanäyte	2426	2456	1,2		
Sarjanäyte	2422	2451	1,2		
Sarjanäyte	2444	2456	0,5		
Keskiarvo			0,875	198	95
Sarjanäyte	2437	2459	0,9		
Sarjanäyte	2444	2472	1,1		
Sarjanäyte	2437	2474	1,5		
Sarjanäyte	2430	2463	1,3		
Keskiarvo			1,200	250	84
Yksittäisnäyte	2433	2456	0,9	237	96
Yksittäisnäyte	2424	2452	1,1	266	109
Yksittäisnäyte	2351	2469	4,8	218	100

**Kuva 47.** Pistekaavio jyrä A:n mittausarvoista ja poranäytteiden tyhjätiloista. Ympyränmuotoinen piste=sarjanäyte, neliönmuotoinen piste=yksittäisnäyte.

Jyrä A:n mittausarvon ja poranäytteiden tulosten välinen korrelaatiokerroin $R^2=0,0013$ on erittäin huono (Kuva 47). Tähän vaikuttaa mittaustapojen keskinäiset erot. Jyrä mittaa käytännössä päällystekokonaisuutta ja poranäyte edustaa vain ylintä päällystekerrosta. Mittausten ajankohta on myös eri. Jyrän mittaus on tehty ensimmäisessä jyräysvaiheessa, kun poranäytteet on otettu vasta 3-6 vuorokauden ikäisinä. Jyrän tekemän mittauksen jälkeen päällyste on siis tiivistynyt jälkijyräyksen ja liikenteen aiheuttaman kuormituksen vaikutuksesta. Poranäytteiden vähyys lisää vertailun epävarmuutta.

Taulukko 19. Poranäytteiden tulokset jyrän B osuudelta.

Jyrä B					
Näytetyyppi	Päällysteen tiheys (kuiva) kg/m ³	Massan tiheys (hydrostaatt.) kg/m ³	Tyhjätila %	ICMV	Tiivistyslämpötila
Sarjanäyte	2421	2470	2,0		
Sarjanäyte	2441	2465	1,0		
Sarjanäyte	2458	2469	0,4		
Sarjanäyte	2428	2471	1,7		
Keskiarvo			1,275	13,9	87
Sarjanäyte	2416	2470	2,2		
Sarjanäyte	2454	2486	1,3		
Sarjanäyte	2449	2498	1,9		
Sarjanäyte	2430	2477	1,9		
Keskiarvo			1,825	89,9	92
Sarjanäyte	2429	2476	1,9		
Sarjanäyte	2414	2476	2,5		
Sarjanäyte	2439	2460	0,9		
Sarjanäyte	2428	2481	2,2		
Keskiarvo			1,875	200,4	82
Yksittäisnäyte	2370	2398	1,2	70,1	92

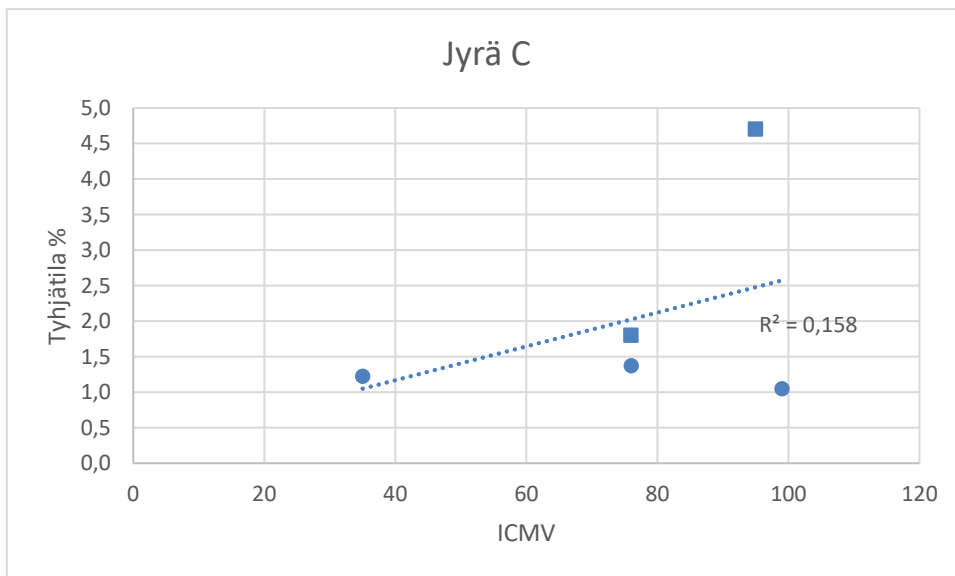


Kuva 48. Pistekaavio jyrä B:n mittausarvoista ja poranäytteiden tyhjättiloista. Ympyränmuotoinen piste=sarjanäyte, neliönmuotoinen piste=yksittäisnäyte.

Jyrä B:n tuloksien korrelaatiokerroin $R^2=0,5864$ on suurempi kuin muiden jyrien korrelaatiokerroin, mutta matemaattisesti tarkasteltuna yhä alhainen (Kuva 48). Asiaan voi vaikuttaa se, että mukana on vain yksi yksittäisnäytteen tulos kolmen tavoitellun sijaan. Mittauspisteitä on vähän tilastomatematisesta näkökulmasta tarkasteltuna. Poranäytteet on otettu 4-7 vuorokauden ikäisinä.

Taulukko 20. Poranäytteiden tulokset jyrän C osuudelta.

Jyrä C					
Näytetyyppi	Päällysteen tiheys (kuiva) kg/m ³	Massan tiheys (hydrostaatt.) kg/m ³	Tyhjätila %	ICMV	Tiivistyslämpötila
Sarjanäyte	2456	2463	0,3		
Sarjanäyte	2428	2471	1,7		
Sarjanäyte	2447	2480	1,3		
Sarjanäyte	2426	2464	1,6		
Keskiarvo			1,225	35	110
Sarjanäyte	2432	2461	1,2		
Sarjanäyte	2438	2482	1,8		
Sarjanäyte	2429	2459	1,2		
Sarjanäyte	2420	2451	1,3		
Keskiarvo			1,375	76	117
Sarjanäyte	2440	2463	1,0		
Sarjanäyte	2452	2488	1,4		
Sarjanäyte	2434	2453	0,8		
Sarjanäyte	2457	2481	1,0		
Keskiarvo			1,050	99	99
Yksittäisnäyte	2374	2492	4,7	95	110
Yksittäisnäyte	2442	2488	1,8	76	115

**Kuva 49.** Pistekaavio jyrä C:n mittausarvoista ja poranäytteiden tyhjätiloista. Ympyrämuotoinen piste=sarjanäyte, neliömuotoinen piste=yksittäisnäyte.

Jyrä C:n ja poranäytteiden välinen korrelaatiokerroin R^2 on 0,158, mikä on keskimmäisin tulos kolmesta jyrästä (Kuva 49). Tarkastelu sisälsi kaksi yksittäisnäytettä kolmesta tavoitellusta. Poranäytteet on otettu 4 vuorokauden ikäisinä.

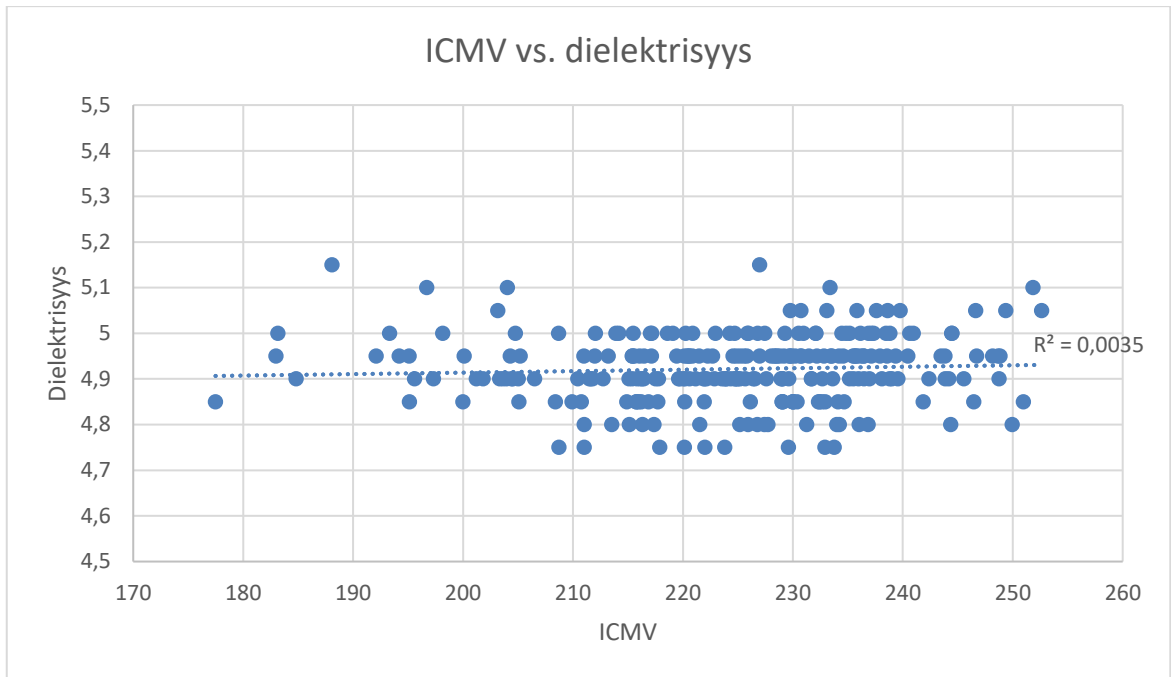
Tuloksiin vaikuttavat tiiviys välittömästi levittäjän jälkeen (ennen jyräystä), käytettävä jyrä ja sen asetukset (täryn amplitudi, taajuus), jyrän nopeus, ympäristöolosuhteet, tiivistämistyön ajoitus sekä tiivistyminen jälkijyräyksen tai liikenteen aiheuttaman kuormituksen vaikutuksesta.

Eri jyrävalmistajien mittausarvojen välillä ei ole johdonmukaista lineaarista suhdetta, mikä johtuu erilaisista laskennallisista algoritmeista ja määritelmistä (Chang *et al.* 2011). Tämän vuoksi ICMV ei ole standardi.

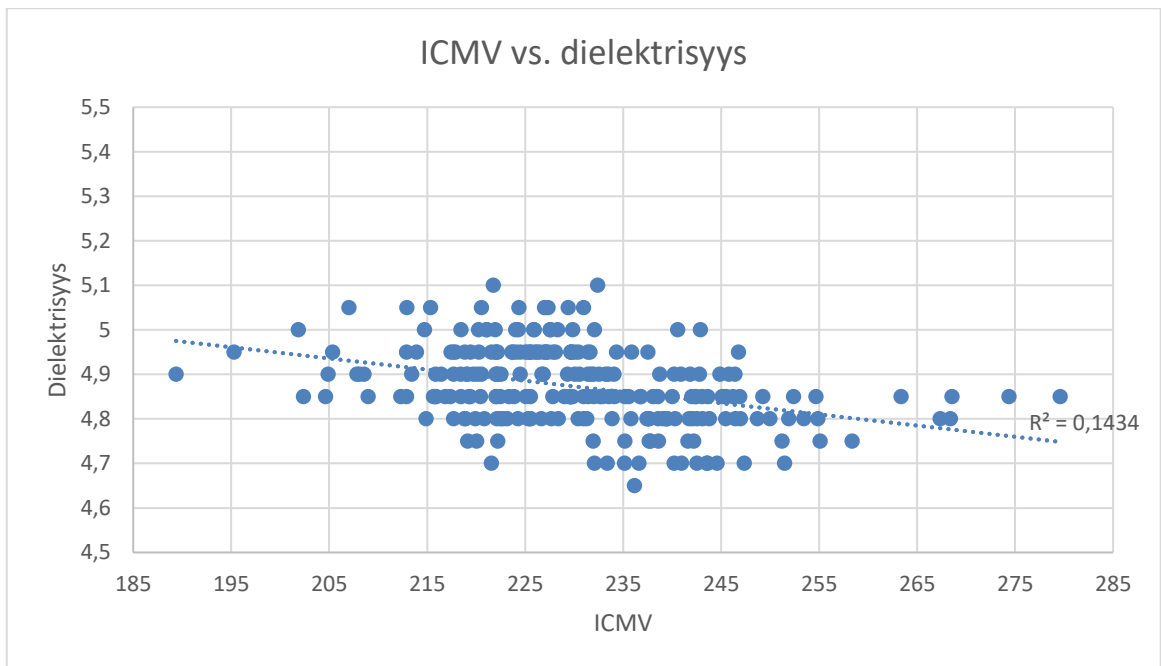
5.2 Päälystetutkamittaus

Päälystetutkamittaus tehtiin koekohteella 8.8.2018 noin 7 kilometrin matkalta. Jyrien A ja B mittausarvoja voitiin vertailla päälystetutkamittauksen dielektrisyystuloksiin. Tutka-aineistossa dielektrisyysarvot ilmoitetaan kahdesta perättäisestä mittauksesta yhden pituusmetrin välein. Vertailua varten dielektrisyystuloksesta laskettiin keskiarvo, joka on muodostettu noin 10 pituusmetrin matkalta ajokaistakohtaisesti. Jyrien mittausarvoista laskettiin keskiarvot samoilta laskentaväleiltä. Tulokset esitetään pistekaavioissa (Kuvat 50-53), joissa y-akselilla on dielektrisyysarvo ja x-akselilla jyrän mittausarvo (ICMV).

Jyrien ICMV:n keskiarvo on laskettu jyrän lopullisesta peite -aineistosta (final coverage) Excel-taulukkolaskentaohjelman avulla. Yhden jyrän mittausaineisto saatiin suoraan valmistajan omasta ohjelmasta ja kaksi muuta Veta-ohjelman kautta. Veta-ohjelmasta otetuissa aineistoissa osassa mittauspisteistä luki ”compaction”-sarakkeessa ”vibratory” sijaan ”static” mittausarvon ollessa > 0 . Tämän oletetaan johtuvan siitä, että mittausarvo on tilanteesta, jolloin täry kytkeytyy päälle tai pois päältä tiivistystyön aikana. Nämä mittauspisteet ja sellaiset, joissa mittausarvo oli 0 tai sitä ei ollut ollenkaan, jätettiin laskentojen ulkopuolelle.

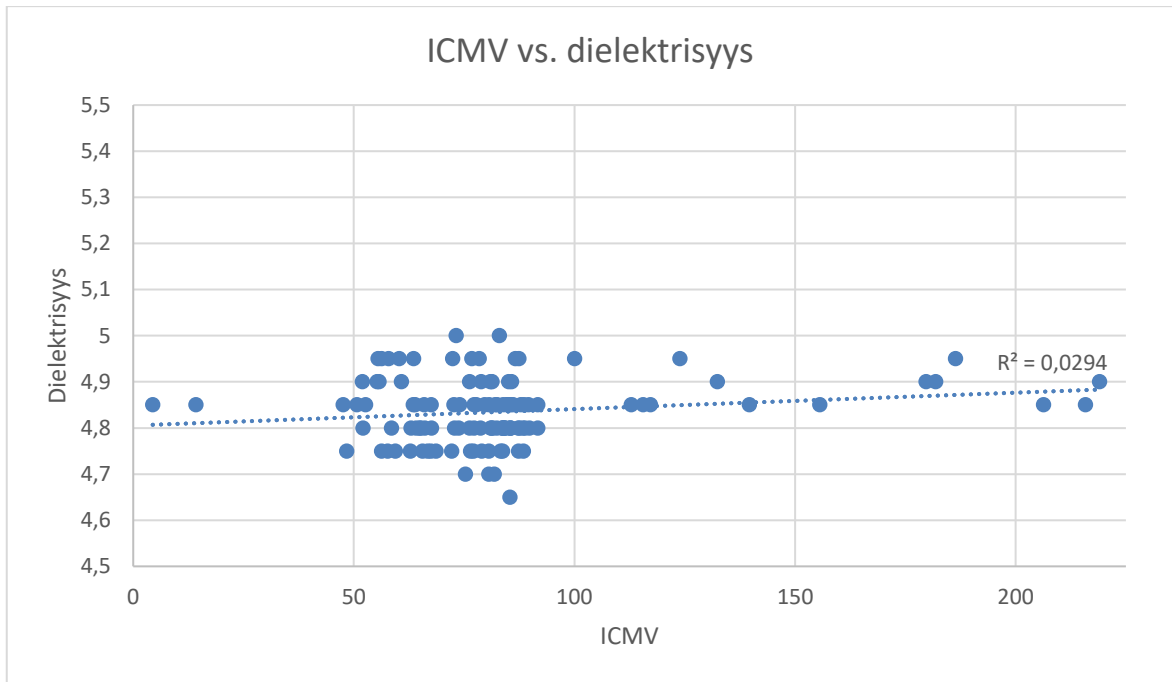


Kuva 50. Jyrä A suunta 2.

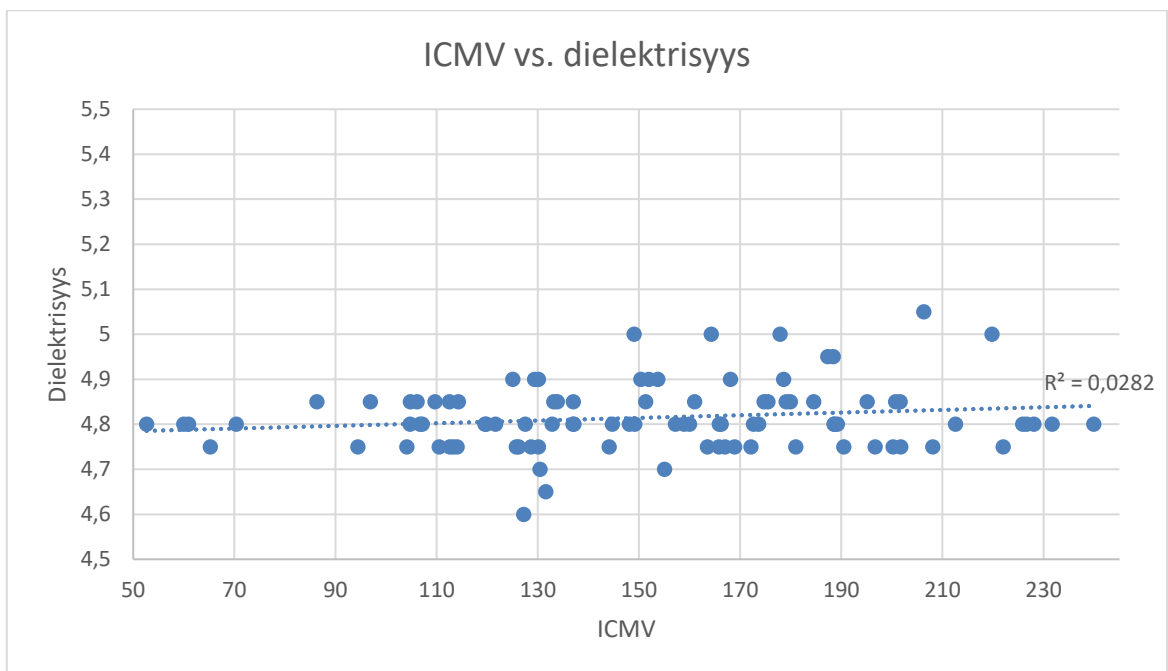


Kuva 51. Jyrä A suunta 1.

Jyrän A:n mittausarvojen ja päällystetutkamittauksen väliset korrelaatiokertoimet olivat $R^2=0,0035$ ja $R^2=0,1434$ (Kuvat 50-51). Päällystetutkamittaus on tehty 8-9 vuorokautta tiivistysjyräyksen jälkeen.



Kuva 52. Jyrä B suunta 2.



Kuva 53. Jyrä B suunta 1.

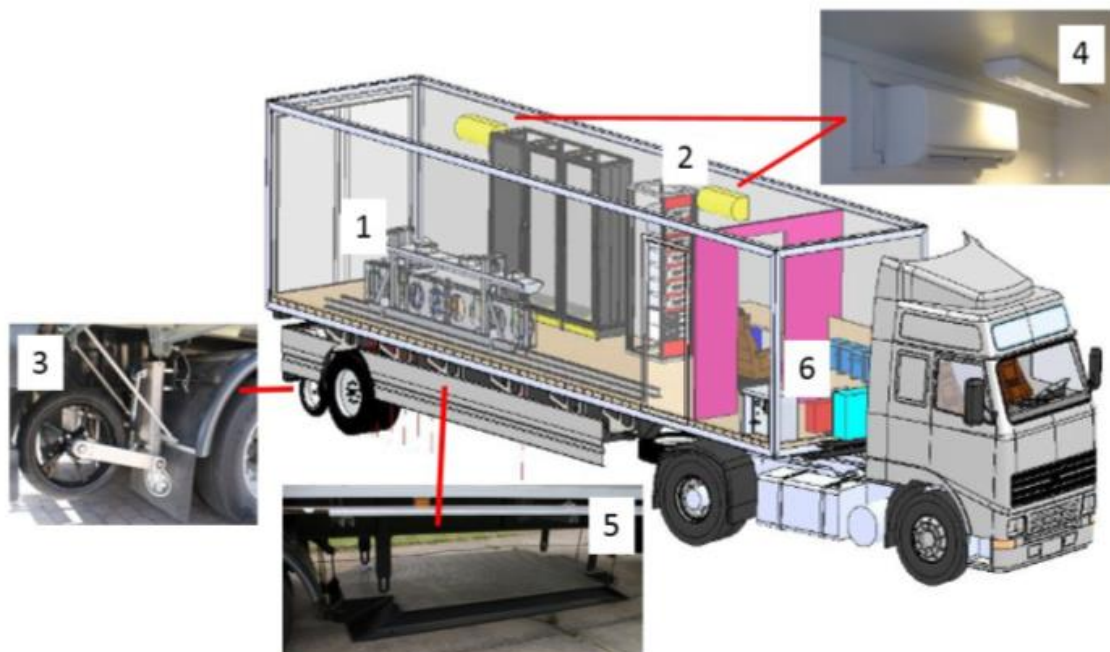
Jyrä B:n mittausarvojen ja päällystetutkamittauksen väliset korrelaatiokertoimet olivat $R^2=0,0294$ ja $R^2=0,0282$ (Kuvat 52-53). Päällystetutkamittaus on tehty 2-5 vuorokautta jyräyksen jälkeen.

Tuloksiin vaikuttaa mittaustapojen keskinäinen eroavaisuus. Päällystetutka mittaa päällysteen dielektrisyttä, kun jyrät mittaavat käytännössä päällystekokonaisuuden jäykkyyttä. Mittaukset tehdään eri kohdista päällystettyä ajokaistaa. Päällystetutka mittaa ainoastaan

ajokaistan oikeanpuoleista ajouraa, kun jyrä mittaa koko ajokaistan leveydeltä. Lisäksi mitausten ”jalanjäljet” ovat erikokoisia. Päällystetutkan yksittäisen mittapisteen pinta-ala on noin 0,3 m x 0,3 m ja jyrän mittapisteen ala on noin 0,3 m x 2,0 m.

5.3 Jatkuva taipumamittaus

Jatkuva taipumamittaus (TSD) tehdään liikennevirran nopeutta ajavalla mittausajoneuvolla (Kuva 54). Laitteistolla mitataan tierakenteen mekaanista kuormitusvastetta. TSD-mittaus tehdään ainoastaan oikeanpuoleisen ajouran kohdalta.



1) Taipuma-antureita kannatteleva palkki 2) Räkki tietokonelaitteille 3) Mittapyörä kuljetun matkan ja nopeuden tallentamiseen 4) Kuormakorin lämmönsäätelyjärjestelmä 5) Painosäiliö kuormittavan voiman säätelyä varten 6) Akusto

Kuva 54. TSD-mittausajoneuvo (Lähde: greenwood.dk, muokannut Ville Mäki 2017).

Jatkuvan taipumamittauksen tuloksista seurattiin SCI 200 ja BCI 900-1200 -indeksejä. Pintakantavuusindeksi SCI 200 kuvaa käytännössä, kuinka suuren taipuman 50 kN kuormitus aiheuttaa tierakenteen ylimpään 200 mm kerrokseen. Toisin sanoen indeksin perusteella voidaan arvioida sidottujen kerrosten sekä kantavan kerroksen yläosan jäykkyyttä. Kohteesta saatu mittausraportti ei sisältänyt SCI 200-arvoja, joten ne laskettiin taipumien d_0 ja d_{200} välisenä erotuksena. D_{200} on taipuma 200 mm etäisyydellä kuormituskeskipisteestä ja d_0 on maksimitaipuma. SCI 200-arvoja päädyttiin käyttämään, koska niiden on todettu soveltuvan paremmin Suomen päällystekokonaisuuksille kuin SCI 300 -arvot (Mäki 2017). SCI 200 -arvot on laskettu ilman lämpötilakorjauksia

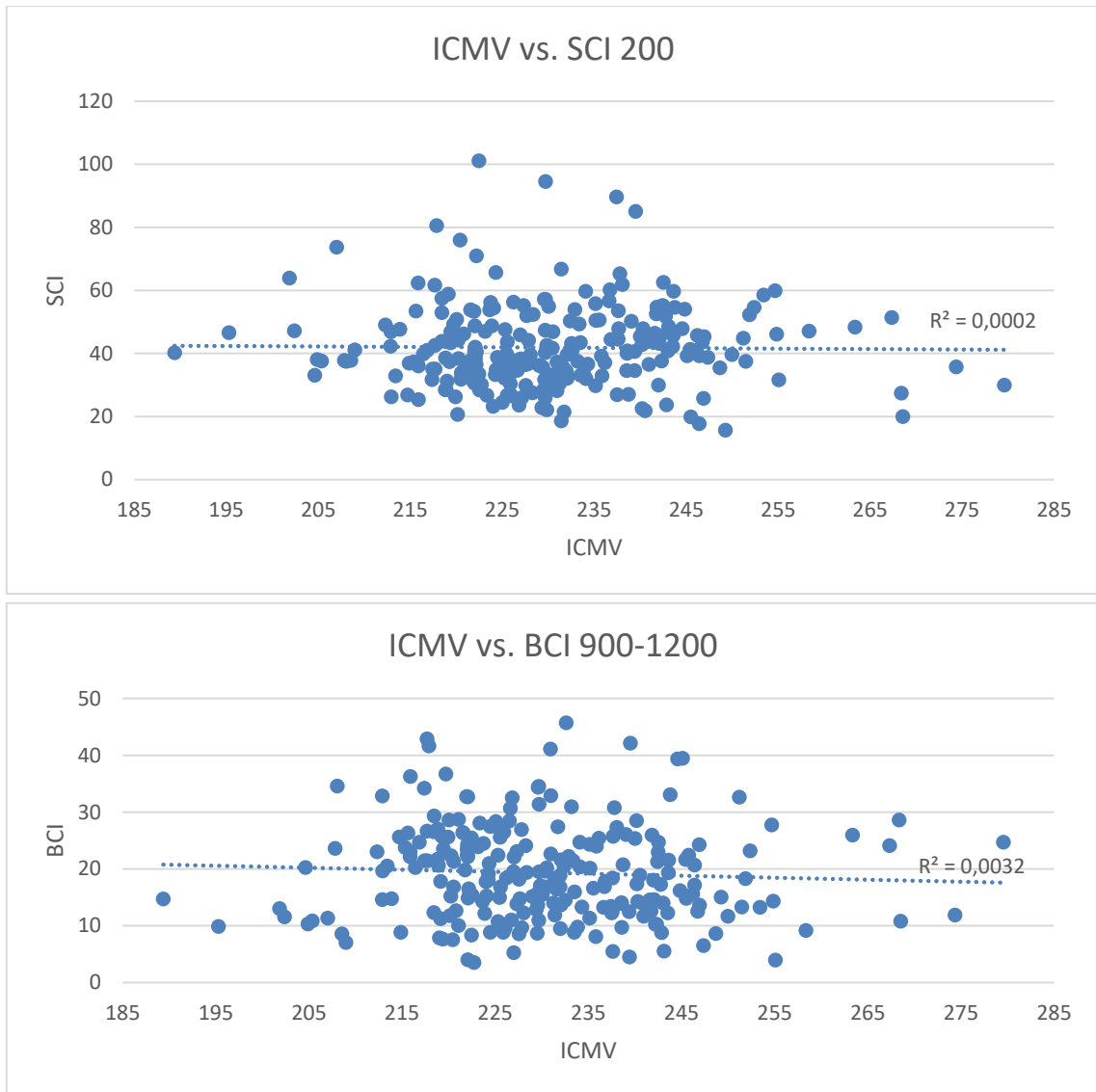
BCI 900-1200-indeksi kuvaa tierakenteen alaosan ja pohjamaan jäykkyyttä. Se muodostetaan 900 mm ja 1200 mm etäisyydellä kuormituskeskipisteestä mitattujen taipumien välisenä

erotuksena. TSD-mittauksen tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida, että mikäli mittaus tapahtuu ajouran sivusta, on mahdollista saada parempia tuloksia kuin tierakenteen todellinen kunto edellyttäisi (Mäki 2017). Tulosten tulkinnassa käytettiin avuksi Ville Mäen diplomityössä (2017) esitettyjä SCI- ja BCI-arvojen luokitteluja (Kuva 55).

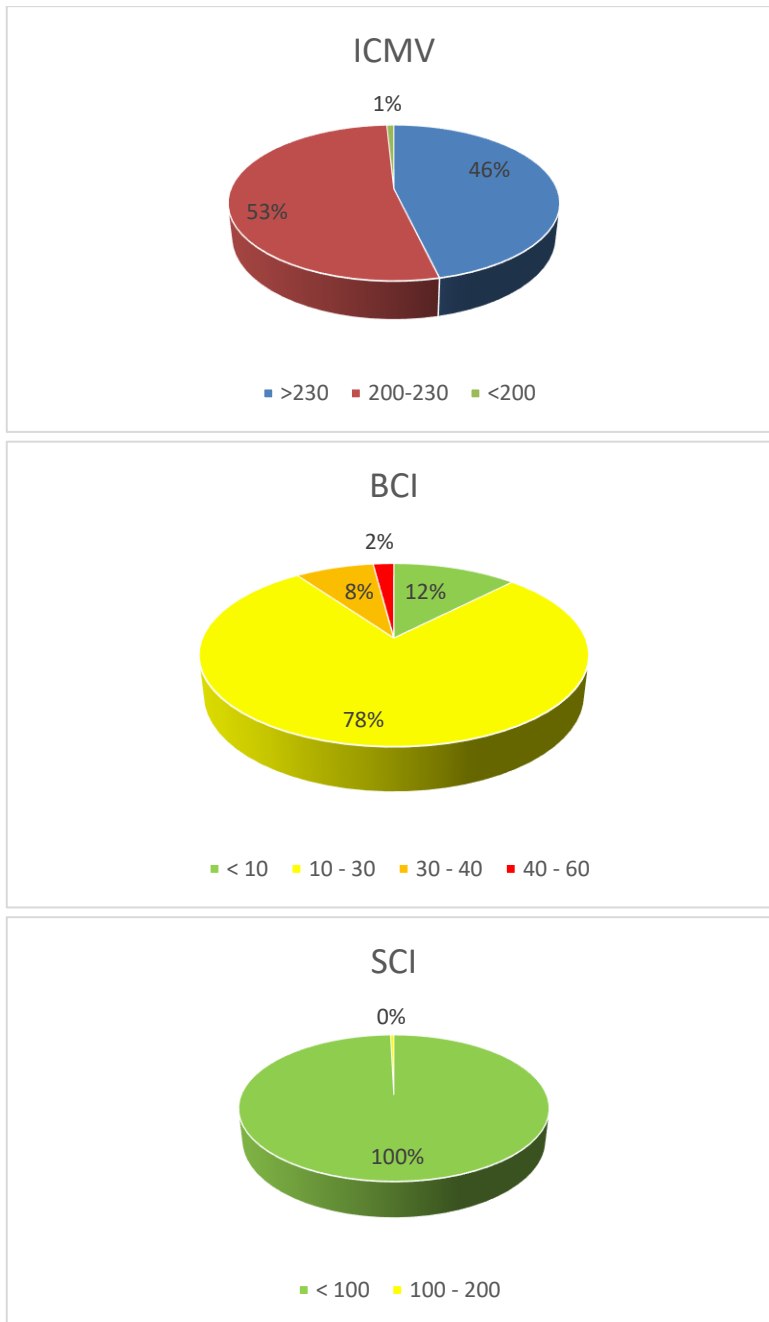
	SCI-rajat:		BCI-rajat:
Erinomainen	< 100	Erinomainen	< 10
Hyvä	100 - 200	Hyvä	10 - 30
Välttävä (ongelmia)	200 - 250	Tyydyttävä	30 - 40
Huono	250 - 400	Välttävä (ongelmia)	40 - 60
Erittäin huono	> 400	Huono	> 60

Kuva 55. SCI- ja BCI-arvojen luokittelu (Mäki 2017).

TSD-mittauksen ja ICMV:n tulokset esitetään alla olevissa pistekaavioissa (Kuvat 56, 58, 60, 62 ja 64). Jokaisen jyrän tiivistämältä osuudelta on oma kaavionsa ajokaistoittain eroteltuna. Kaavioiden pystyakselina on TSD-mittauksen arvo (SCI 200 tai BCI 900-1200) ja vaaka-akselina jyrän mittausarvo (ICMV). TSD-mittauksen tulokset ovat keskiarvoja, jotka on laskettu noin 10 pituusmetrin matkalta. Kaavioissa esitetty jyrän mittausarvo on myös keskiarvo, joka on muodostettu samoilta laskentaväleiltä kuin TSD-mittaus. Arvojen jakautuminen esitetään kuvissa 57, 59, 61, 63 ja 65. Mittaus tehtiin kohteella 18.9.2018.

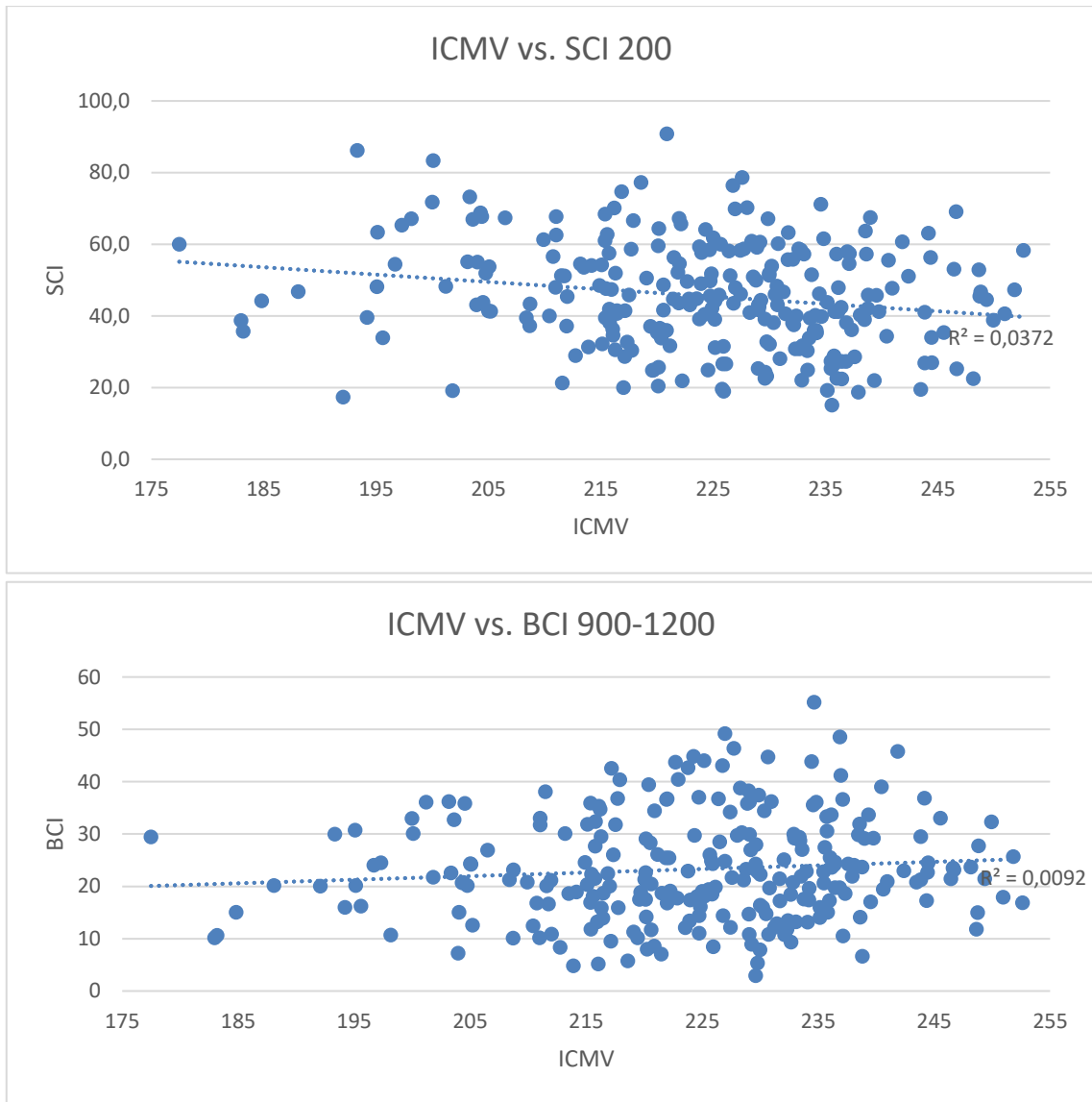


Kuva 56. Jyrän A osuus, suunta 1.

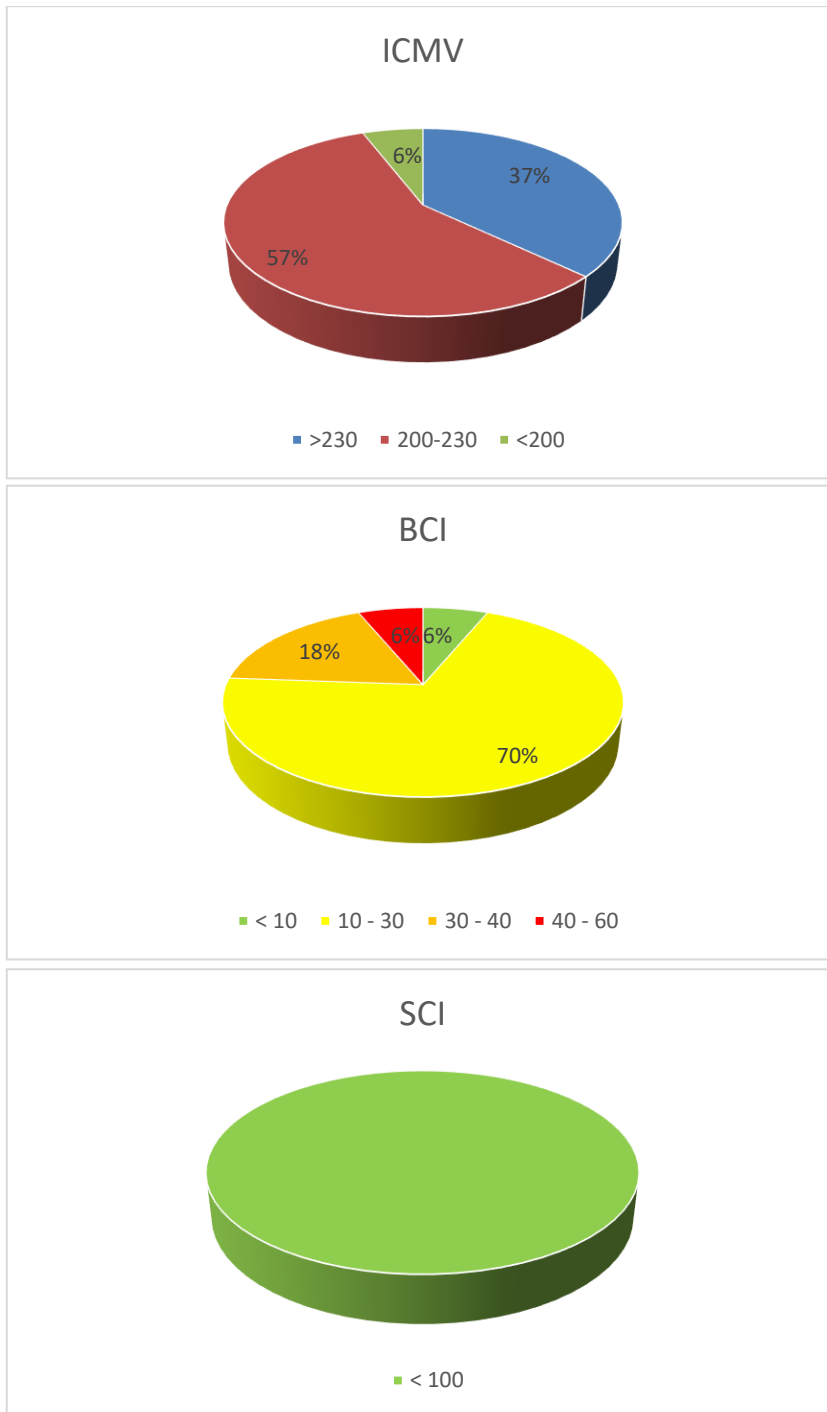


Kuva 57. ICMV:n, BCI:n ja SCI:n jakaumat suunnassa 1, jyrä A:n osuudella.

Suunnassa 1 jyrän A ICMV:n ja SCI:n välinen korrelaatio oli erittäin huono: $R^2=0,0002$, myös ICMV:n ja BCI:n välinen korrelaatio oli hyvin alhainen: $R^2=0,0032$ (Kuva 56). Mittausarvojen (ICMV) voidaan todeta olleen hyviä (Kuva 57). BCI-arvoista suurin osa oli hyviä (välillä 10-30). Kaikki SCI-arvot olivat erinomaisia (alle 100), yhtä mittausarvoa lukuun ottamatta.

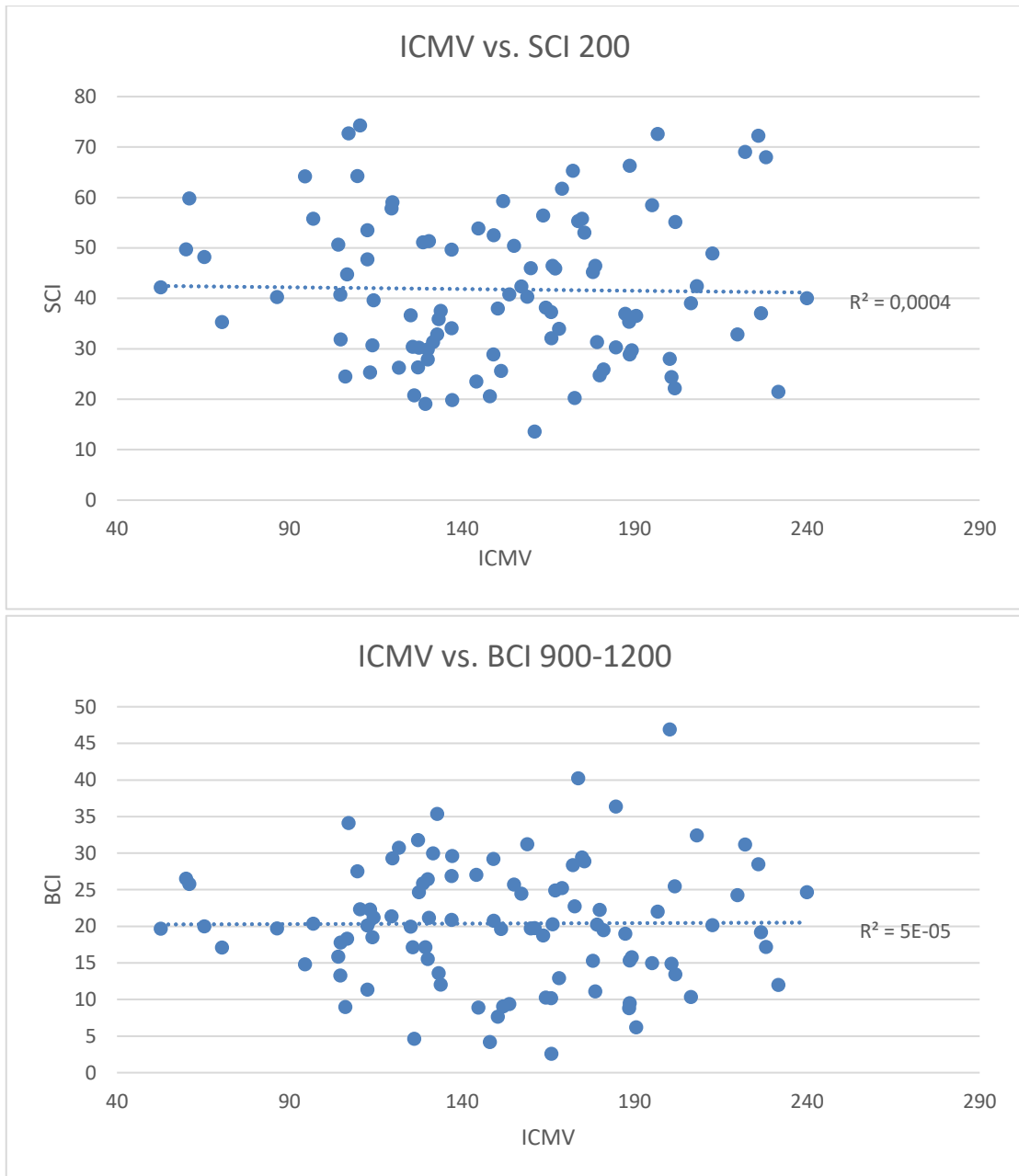


Kuva 58. Jyrän A osuus, suunta 2.

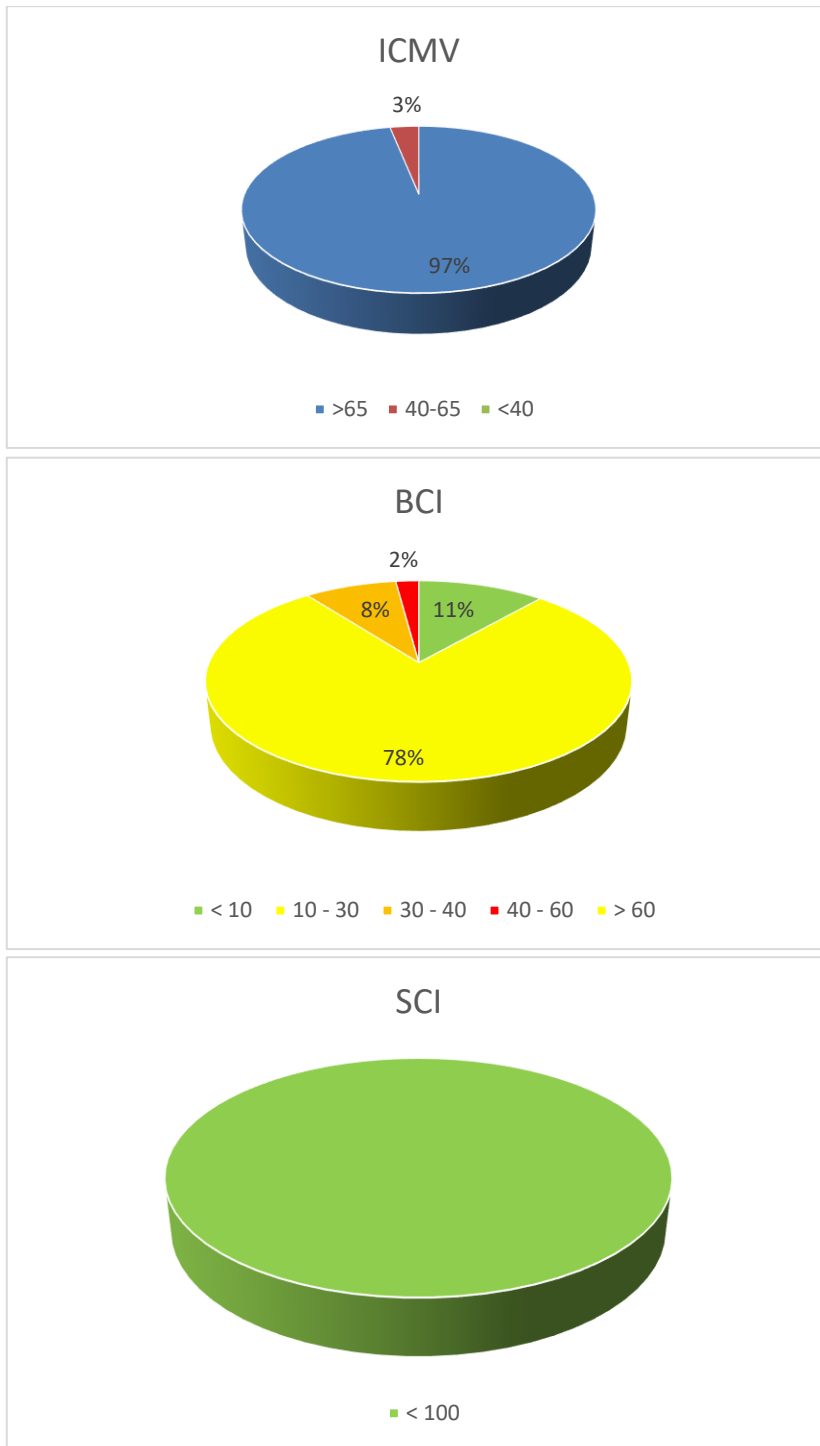


Kuva 59. ICMV:n, BCI:n ja SCI:n jakaumat suunnassa 2, jyrä A:n osuudella.

Jyrän A ICMV:n ja SCI:n välinen korrelaatio oli huono suunnassa 2: $R^2=0,0372$. ICMV:n ja BCI:n välinen korrelaatio oli myös keho: $R^2=0,0092$ (Kuva 58). Mittausarvot (Kuva 59) ja suurin osa BCI-arvoista olivat hyviä (välillä 10-30). Kaikki SCI-arvot olivat erinomaisia (<100).

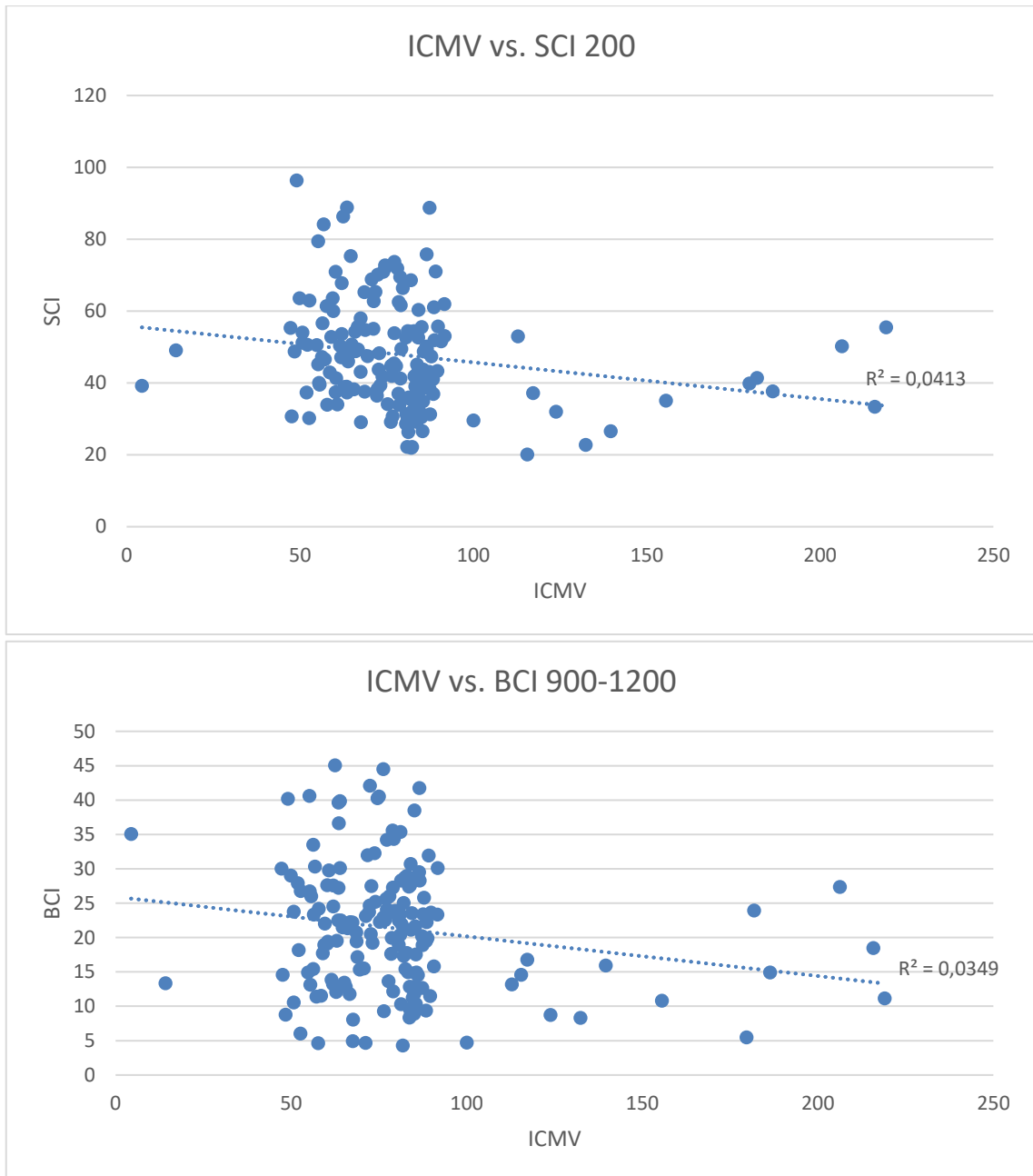


Kuva 60. Jyrän B osuus, suunta 1.

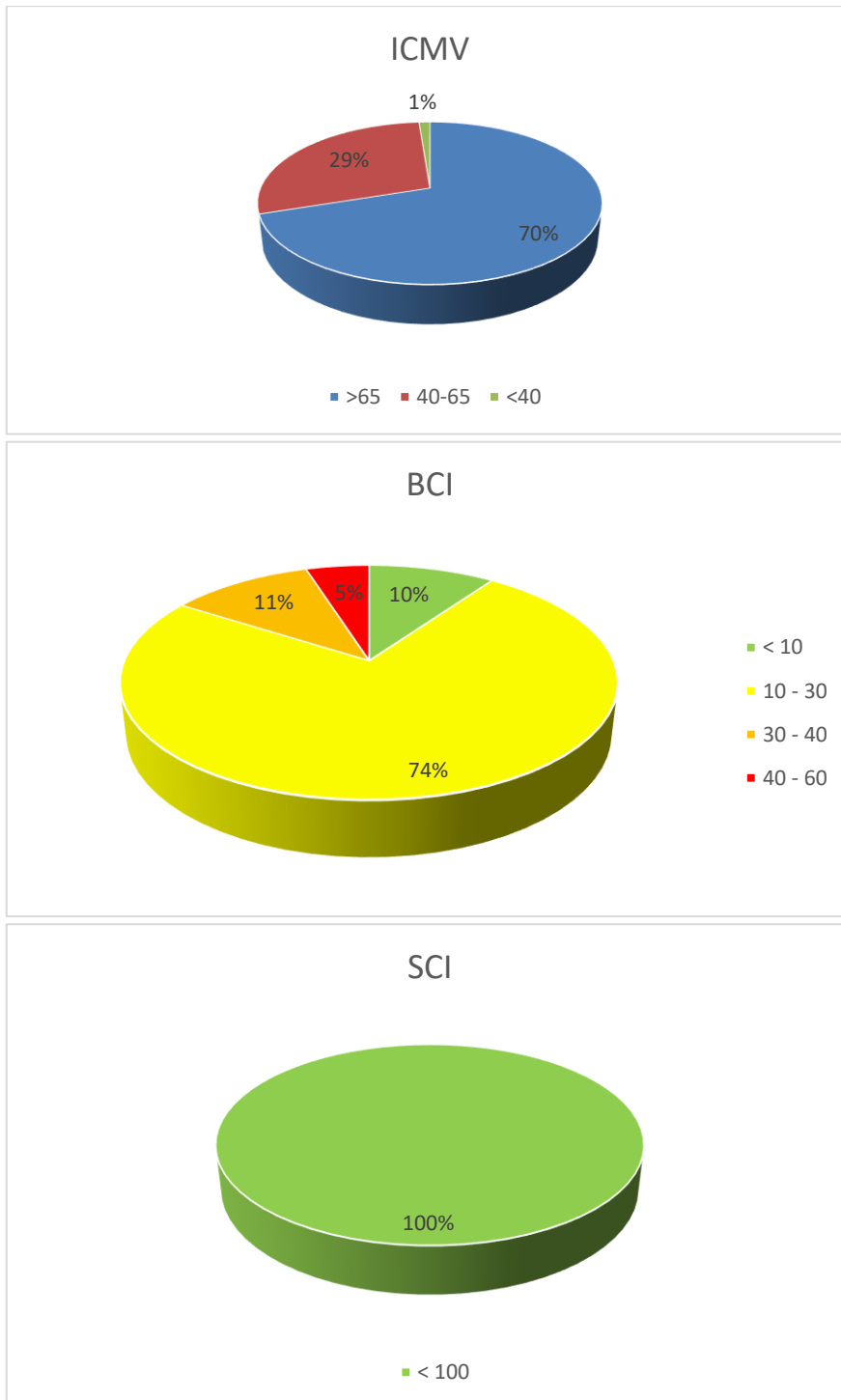


Kuva 61. ICMV:n, BCI:n ja SCI:n jakaumat suunnassa 1, jyrä B:n osuudella.

Jyrällä B suunnassa 1 mittausarvon ja SCI:n välinen korrelaatiokerroin oli hyvin pieni: $R^2=0,0004$, saman mittausarvon ja BCI:n välinen korrelaatiokerroin oli niin ikään erittäin alhainen: $R^2=0,00005$ (Kuva 60). Mittausarvoista 97 % (Kuva 61) ja BCI-arvoista 78 % olivat hyviä. Kaikki SCI-arvot olivat erinomaisia (<100).

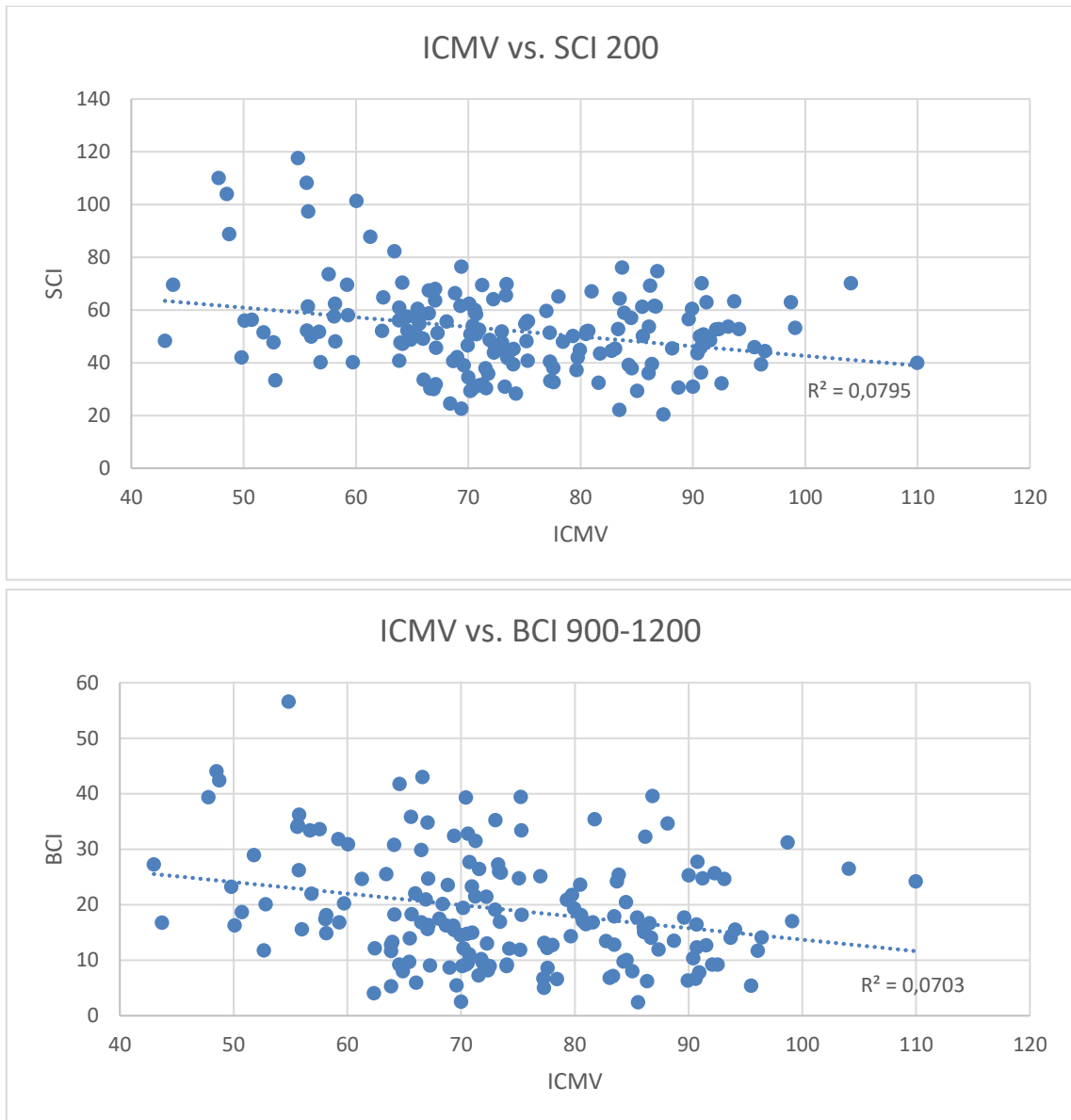


Kuva 62. Jyrän B osuus, suunta 2.

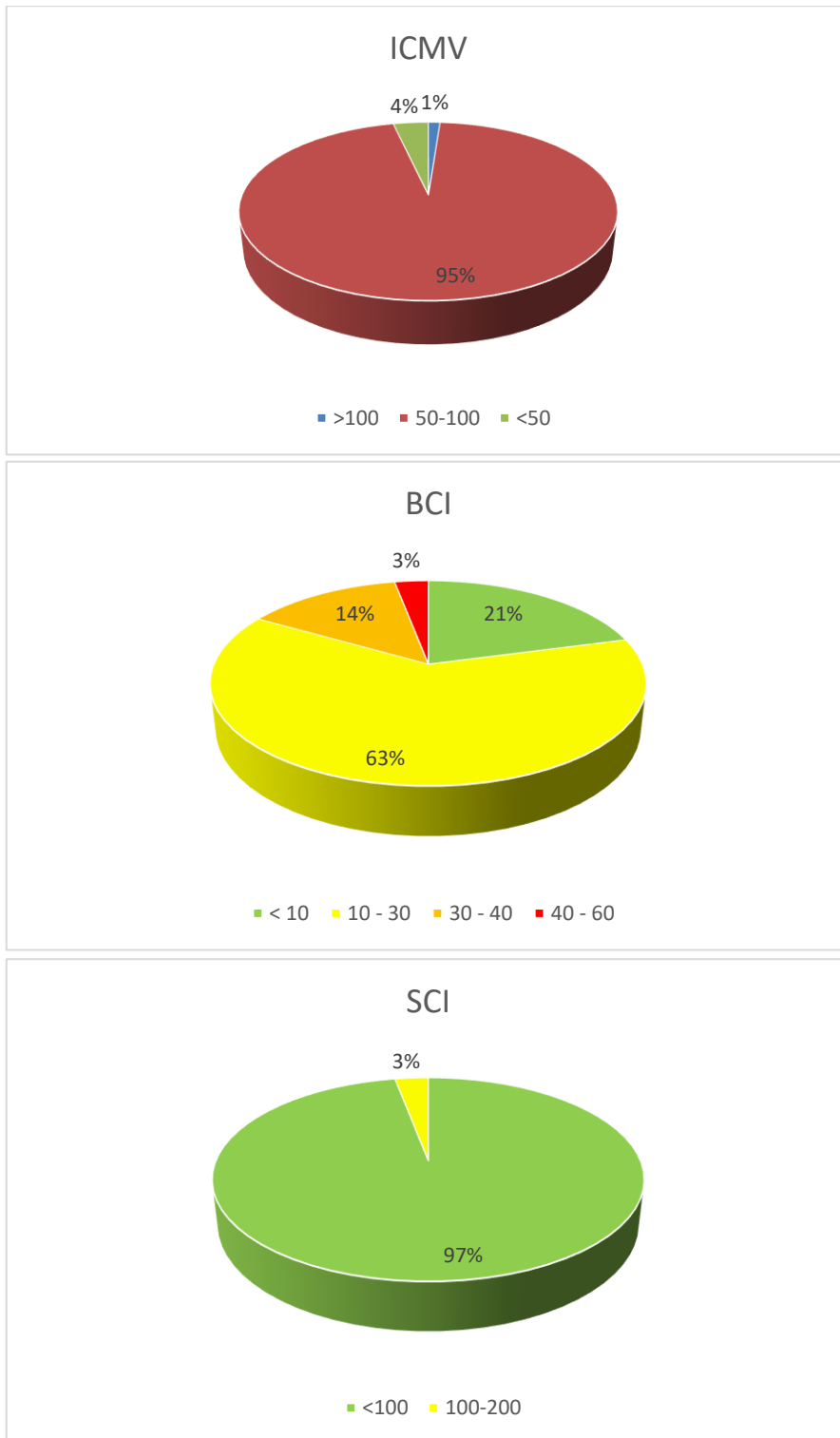


Kuva 63. ICMV:n, BCI:n ja SCI:n jakaumat suunnassa 2, jyrä B:n osuudella.

Suunnassa 2 jyrän B mittausarvon ja SCI:n välinen korrelaatiokerroin oli $R^2=0,0413$ sekä mittausarvon ja BCI:n välinen korrelaatiokerroin oli $R^2=0,0349$ (Kuva 62). Kaiken kaikkiaan jyrän mittausarvot olivat hyviä (Kuva 63). Valtaosa mitatuista BCI-arvoista olivat välillä 10-30 (hyvä). Kaikki mitatut SCI-arvot olivat alle raja-arvon 100 (erinomainen).



Kuva 64. Jyrän C osuus.



Kuva 65. ICMV:n, BCI:n ja SCI:n jakaumat, jyrä C:n osuudella.

Jyrän C ICMV:n ja SCI:n välinen korrelaatiokerroin oli $R^2=0,0795$ sekä ICMV:n ja BCI:n välinen $R^2=0,0703$ (Kuva 64). Suurin osa jyrän mittausarvoista sijaitsi välillä 50-100 (Kuva 65). BCI-arvoista suurin osa (63 %) oli välillä 10-30 (hyvä). Lähes kaikki (97 %) SCI-arvot olivat erinomaisia (<100) ja loput (3 %) olivat hyviä (välillä 100-200).

Kokonaisuudessaan kohteelta tehdyn TSD-mittauksen SCI 200-arvot olivat erinomaisia. Mittaustuloksiin vaikuttaa se, että kohteelle oli tehty REM-tasaus ennen varsinaista päällystelaatan tekemistä. Toimenpiteiden tuloksena päällystepaksuus kasvoi reilut neljä senttimetriä, mikä lisää päällystekokonaisuuden jäykkyyttä.

Tieosan 16 suunta 2 oli ainoa osuus, jossa TSD-mittauksen BCI-arvot ylittivät arvon 60 (huono). Pääasiassa koko kohteen BCI-arvot olivat välillä 10-30 (hyvä). Tuloksiin vaikuttaa se, että ICMV on mitattu jo tiivistystyön aikana ja TSD-mittaus on tehty 2-3 viikkoa myöhemmin. Jyrän tekemän mittauksen aikana päällyste ei ole vielä saavuttanut lopullista jäykkyyttään. TSD:n mittaussajankohtaan mennessä uusi päällystekerros on jo saavuttanut täyden jäykkyytensä ja näin ollen lisää myös koko päällystekokonaisuuden jäykkyyttä. TSD:n ja jyrän mittauspinta-alat ovat eri suuruiset. Lisäksi TSD-mittaus on tehty ainoastaan oikeanpuoleisen ajouran kohdalta, kun jyrän mittaussarvot on kerätty koko ajokaistan leveydeltä.

5.4 Lämpökamera- ja tasalaatuisuusmittaus

Uuden päällysteen tasalaatuisuuden mittauksella kartoitetaan päällysteen lajittumavirheitä, joita ovat bitumin pintaan nousu tai rakeisuuslajittuma eli pinnan karkeus. Mittaus tehdään 17:llä etulaserilla ja 2:lla takalaserilla mittaussuureuden ollessa 3,2 metriä. Tasalaatuisuuden määrittäminen makrokarkeuden (MPD) avulla. Suuret lukuarvot indikoivat rakeisuuslajittumaa ja pienet arvot bitumin pintaan nousua. (Päällystealan neuvottelukunta 2019).

Lämpökameramittauksessa kamera muuntaa kohteen, tässä tapauksessa asfaltin, lämpösäteilyvoimakkuuden lämpötilatiedoksi, josta muodostetaan digitaalinen kuva (Infradex Oy). Asfaltointitöissä lämpökameran käytöllä pyritään arvioimaan päällysteen tasalaatuisuutta. Kamera kiinnitetään asfaltinlevittimen perään ja se kuvaa levittimen jälkeistä, tiivistämätöntä päällystettä. Lämpökameran tuottamassa kuvassa levitystyön pysähdykset havaitaan kylminä kohtina, joita sininen väri edustaa. Näissä kohdissa päällysteen tyhjätilan voidaan olettaa olevan korkea. Kuvissa punainen väri indikoi asfaltin korkeaa lämpötilaa ja niissä päällysteen tyhjätilan oletetaan olevan vaaditun mukainen.

Koekohteella tehtyjen lämpökamera- ja MPD-mittausten tuloksia tarkasteltiin rinnakkain jyrrien mittaamien ICMV- ja lämpötila-arvojen kanssa (Kuvat 66-70). Tarkastelu tehtiin silmämääräisesti kohdista, joista oli lisäksi otettu poranäytteet (Taulukko 21). Näytteenottokohdat on merkitty mustalla rastilla jyrrien ICMV- ja lämpötilakuviin.

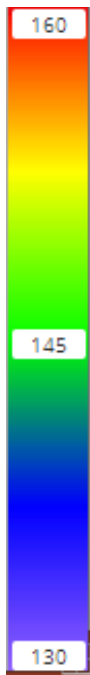
Tarkastelusuunnaksi valikoitui suunta 1, koska tältä suunnalta otettujen poranäytteiden tyhjätilarvoissa oli eniten vaihtelua. Näytteenottoa vastaavat päällysteen MPD-tulokset sovitettiin kohdilleen tierekiesteriosoitteiden, koordinaattien ja lopulta kuvien avulla. MPD-kuviin on otettu poranäytteen ympäristö noin 20,1 metrin matkalta. Kuviin on merkitty mustalla viivalla näytteen paalu ja ympyrän avulla karkeasti poranäytteen sijainti. (Huuskonen-Snicker & Pääkkö 2018).

Taulukko 21. Taulukko poranäytteistä, joiden kohdilla tehtiin MPD- ja lämpökameratar-
kastelu.

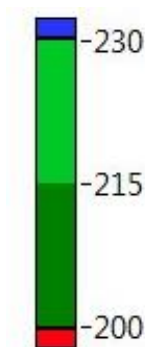
Näytetunnus	Päällysteen tiheys (kuiva) kg/m ³	Massan tiheys (hydrostaatt.) kg/m ³	Tyhjä- tila %	ICMV	Lämpö- tila °C	Tierekisteri- osoite
A	2433	2456	0,9	237	96	140/16/4783 S1
B	2424	2452	1,1	266	109	140/16/4762 S1
C	2351	2469	4,8	218	100	140/16/4689 S1
N	2374	2492	4,7	95	110	140/15/2582 S1
O	2442	2488	1,8	76	115	140/15/2426 S1

Lämpötilamattojen väriskaala

(Huuskonen-Snicker & Pääkkö 2018):

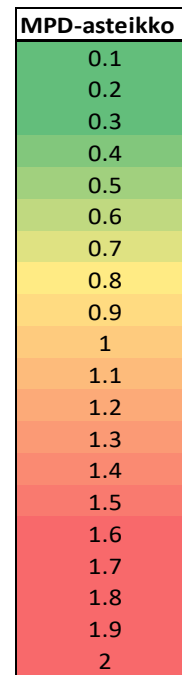


Jyrän mittausarvojen asteikko
A-näytteiden A-C kohdalla:

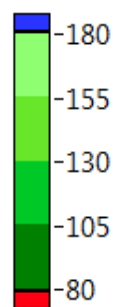


Käytetty MPD:n väriasteikko (Huuskonen

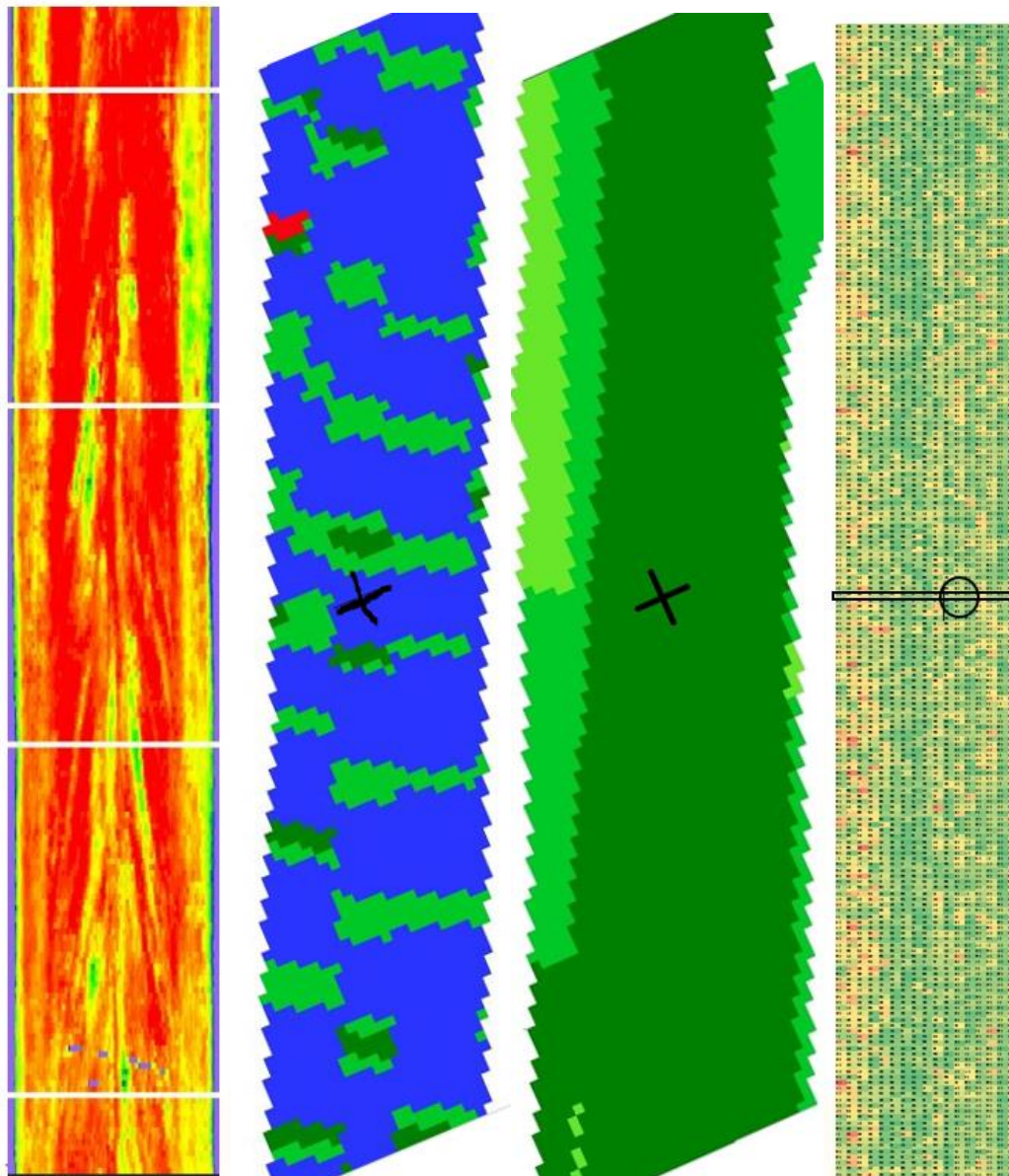
-Snicker & Pääkkö 2018):



Jyrän lämpötila-arvojen asteikko näytteiden
C kohdalla:



Näyte A (tyhjätila 0,9 %):



Kuva 66. Lämpökamera-, ICMV-, lämpötila- ja MPD-kuvat näytteen A kohdalla (Huuskonen-Snicker & Pääkkö, muokannut Niko Sekki 2019).

Lämpökamera: punainen → päällysteen lämpötila hyvä

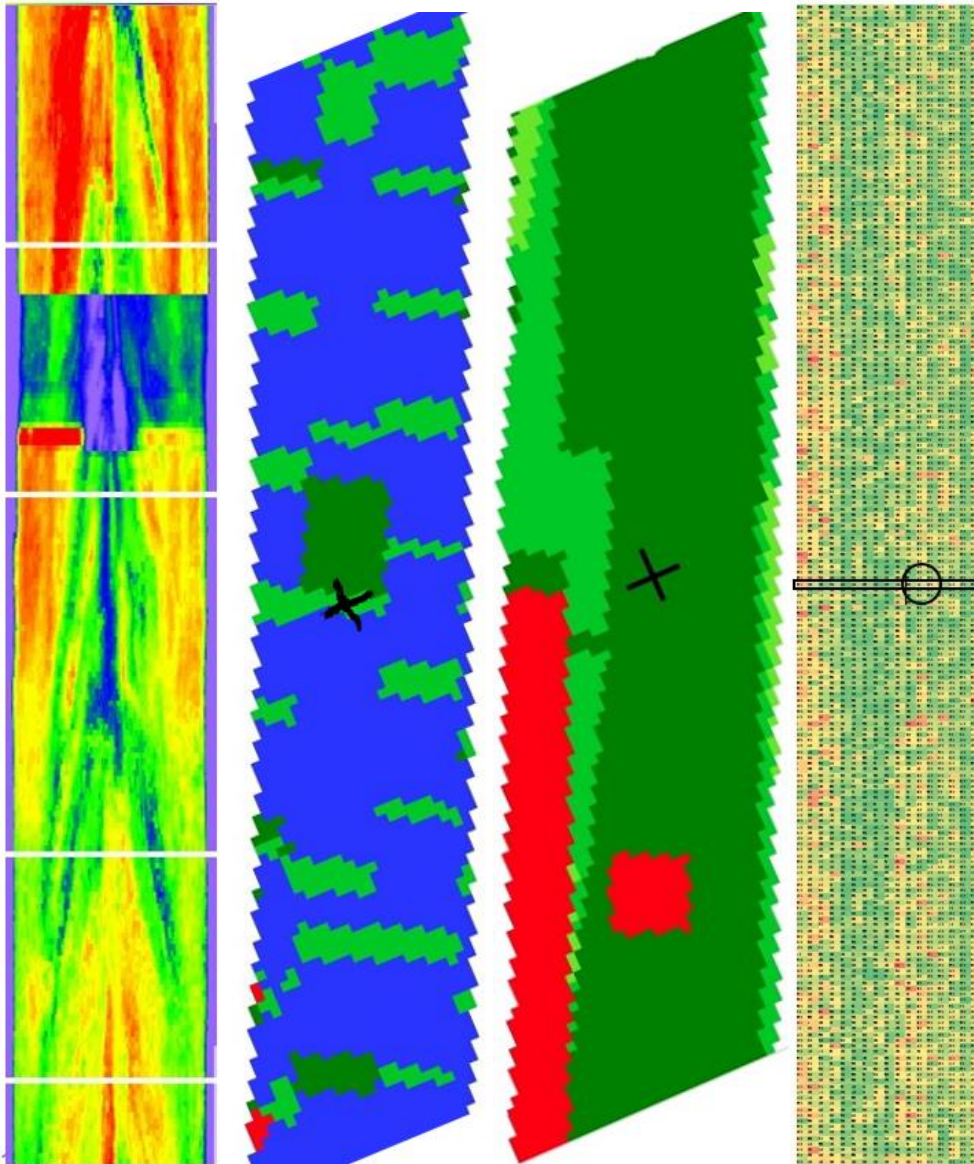
Mittausarvo: sininen → todella hyvä

Lämpötilakartta: tumman vihreä → kohtalainen

MPD: vihreä → tiivis.

Lämpökamerakuvasta voidaan päätellä, että päällysteen lämpötila on ollut hyvä levitystyön aikana. Jyräkartojen perusteella päällysteen tiiviyys on ollut hyvä ja tiivistäminen on tehty kohtalaisessa lämpötilaikkunassa. MPD-mittaus tulokset olivat hyviä näytteenottokohdassa.

Näyte B (tyhjätila 1,1 %):



Kuva 67. Lämpökamera-, ICMV-, lämpötila- ja MPD-kuvat näytteen B kohdalla (Huusko-Snicker & Pääkkö, muokannut Niko Sekki 2019).

Lämpökamera: vaalean vihreä → päällysteen lämpötila ok

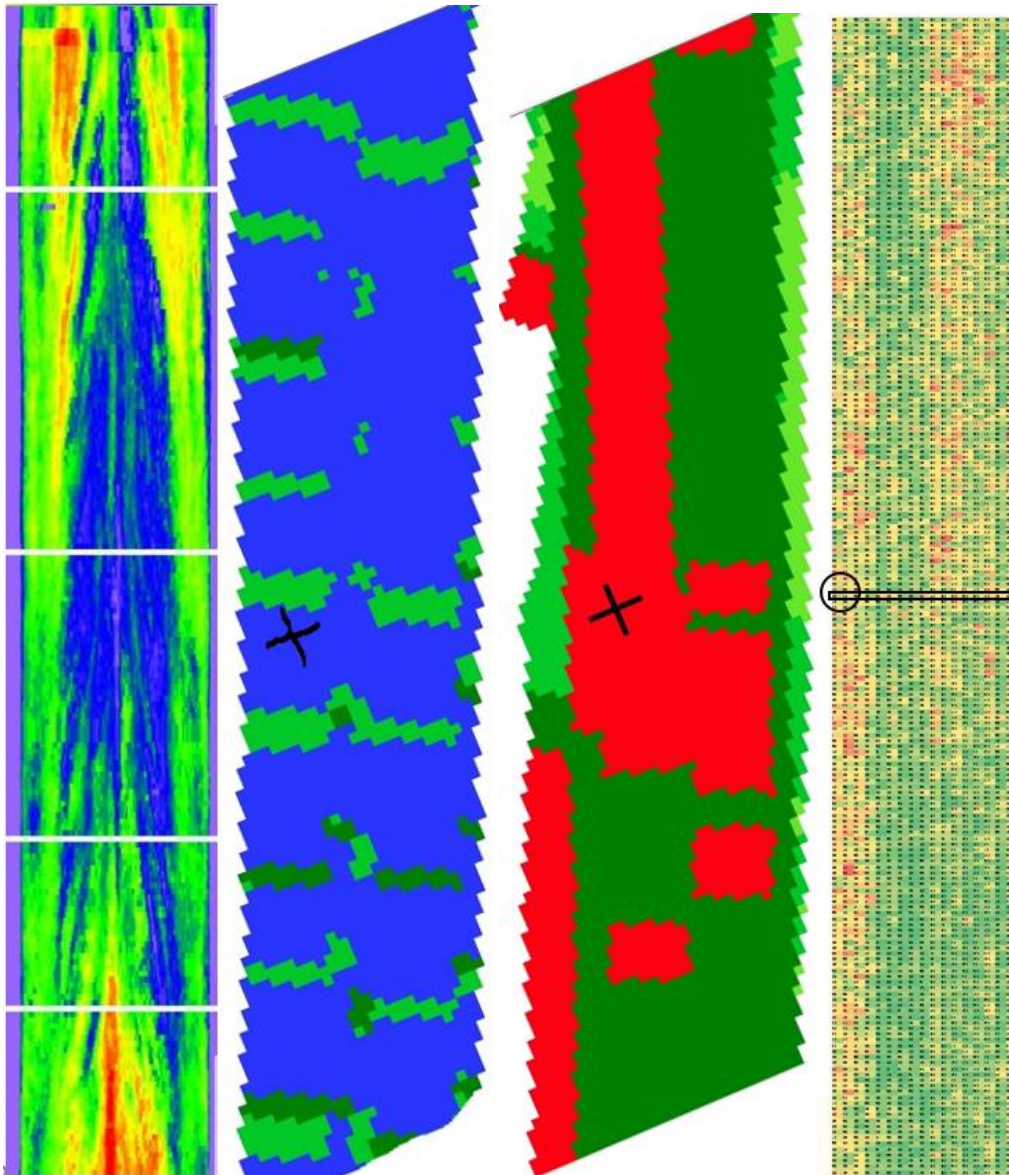
Mittausarvo: vaalean-/tummanvihreä → mittausarvo ok

Lämpötilakartta: tumman vihreä → kohtalainen

MPD: vaalean vihreä → melko tiivis.

Lämpökamerakuvan perusteella päällysteen lämpötila on ollut kohtalaisen hyvä levitystyön aikana. Jyrän ICMV-kartan mukaan päällysteen tiiviys on ollut kohtalainen ja lämpötilakartan mukaan tiivistystyö on tehty lähes liian viileällä päällysteellä. MPD-kuva indikoi siitä, että lopullisen tuloksen laatu oli johdonmukainen työnaikaisiin mittauksiin verrattaessa.

Näyte C (tyhjätila 4,8 %):



Kuva 68. Lämpökamera-, ICMV-, lämpötila- ja MPD-kuvat näytteen C kohdalla (Huuskonen-Snicker & Pääkkö, muokannut Niko Sekki 2019).

Lämpökamera: vaalean vihreä → päällysteen lämpötila ok

Mittausarvo: sininen → mittausarvo todella hyvä

Lämpötilakartta: punainen → huono

MPD: pääosin vaalean vihreä → melko tiivis.

Päällysteen lämpötila on ollut kohtalainen levitystyötä tehtäessä. Jyrän ICMV- ja lämpötilakartat ovat ainakin osittain ristiriidassa keskenään: päällysteen tiivisyys on ollut hyvä, mutta näytteenottokohdassa tiivistäminen on tehty liian viileällä päällysteellä. Kaikesta huolimatta, MPD-mittauksen mukaan lopputuloksen laatu on ollut melko hyvä.

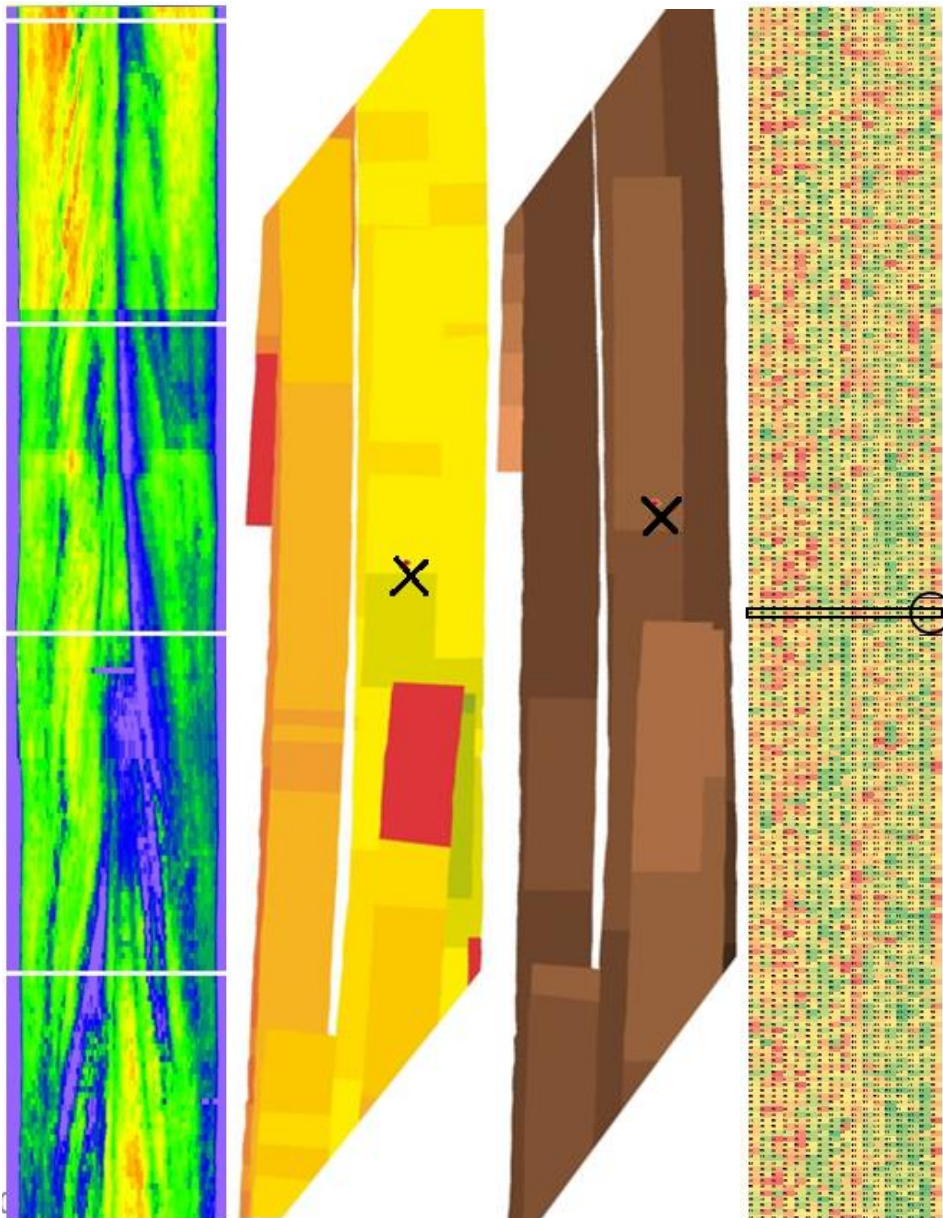
Jyrän mittausarvojen asteikko näytteiden N-O kohdalla:

Value range	Color	Level	Value range	Color
... .. 0	<	9	80 .. 90	80
0 .. 10	0	10	90 .. 100	90
10 .. 20	10	11	100 .. 110	100
20 .. 30	20	12	110 .. 120	110
30 .. 40	30	13	120 .. 130	120
40 .. 50	40	14	130 .. 140	130
50 .. 60	50	15	140 .. 150	140
60 .. 70	60	16	150 .. 160	150
70 .. 80	70	> 16	160	>

Jyrän lämpötila-arvojen asteikko näytteiden N-O kohdalla:

Value range	Color	Level	Value range	Color
... .. 20	<	9	100 .. 110	100
20 .. 30	20	10	110 .. 120	110
30 .. 40	30	11	120 .. 130	120
40 .. 50	40	12	130 .. 140	130
50 .. 60	50	13	140 .. 150	140
60 .. 70	60	14	150 .. 160	150
70 .. 80	70	15	160 .. 170	160
80 .. 90	80	16	170 .. 180	170
90 .. 100	90	> 16	180	>

Näyte N (tyhjätila 4,7 %):



Kuva 69. Lämpökamera-, ICMV-, lämpötila- ja MPD-kuvat näytteen N kohdalla (Huuskonen-Snicker & Pääkkö, muokannut Niko Sekki 2019).

Lämpökamera: vihreä → päällysteen lämpötila ok

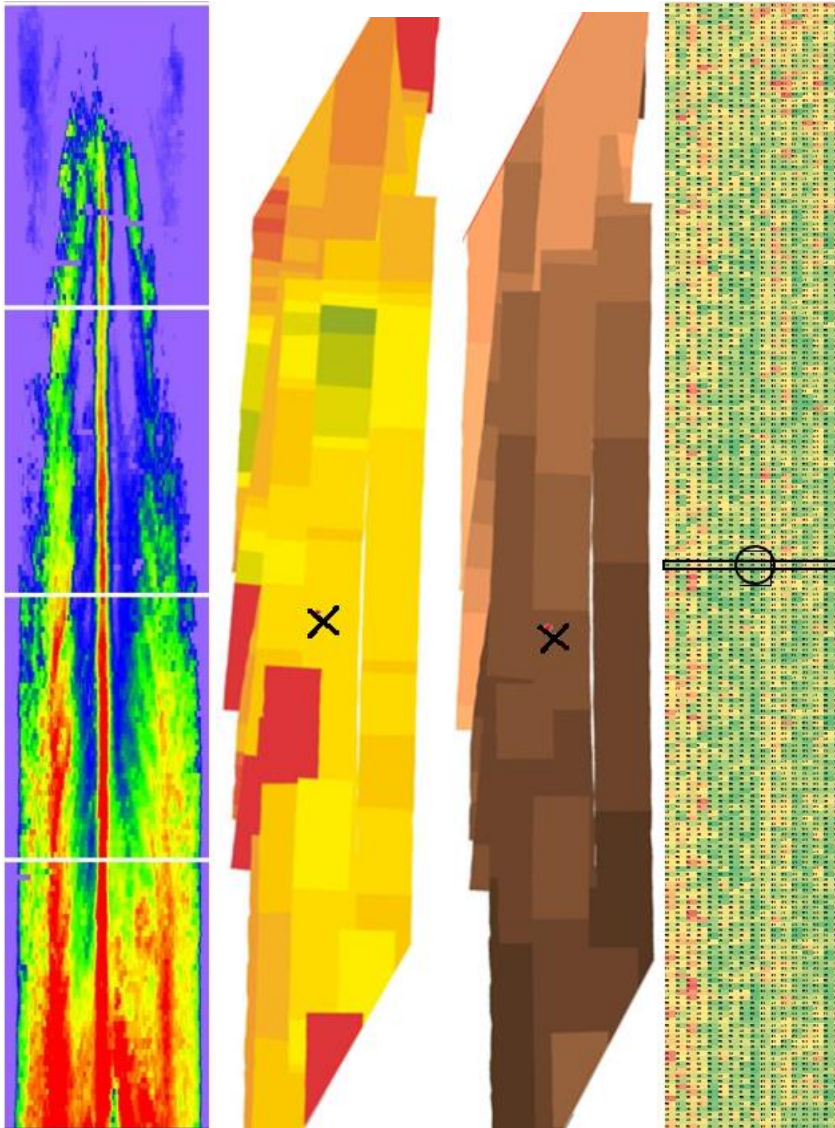
Mittausarvo: vihertävä → hyvä

Lämpötilakartta: ruskea → ok

MPD: keltainen → tiiviys ok.

Lämpökamerakuvan perusteella levitystyö on tehty päällysteen lämpötilan ollessa hyvä. Jyrän mittauksien mukaan päällysteen tiiviys ja lämpötila ovat niin ikään olleet hyviä. MPD-kuvan mukaan päällysteen lopullinen laatu vastasi työnaikaisia mittauksia.

Näyte O (tyhjätila 1,8 %):



Kuva 70. Lämpökamera-, ICMV-, lämpötila- ja MPD-kuvat näytteen O kohdalla (Huuskonen-Snicker & Pääkkö, muokannut Niko Sekki 2019).

Lämpökamera: punainen soiro, jonka ympärillä sinistä → päällysteen lämpötila soiron kohdalla hyvä, mutta ympärillä viileähkö

Mittausarvo: tumman keltainen → ok

Lämpötilakartta: ruskea → ok

MPD: vihreä → tiivis.

Lämpökamerakuvan mukaan päällysteen lämpötila on ollut kohtalainen levitystyön aikana. Kyseessä on ollut kohta, jossa levittäjä on ollut pysähtyneenä ja jatkanut sen jälkeen uuden massan levittämistä. Jyräkartat indikoivat hyvää tiivistyslämpötilaa ja päällysteen tiiviyttä. MPD-kuvasta voidaan päätellä, että myös lopputuloksen laatu on ollut hyvä.

5.5 Käyttäjäkokemukset

Kenttäkokeen jälkeen jyräkuljettajia haastateltiin. Yhteenveto kuljettajien mietteistä jyrien IC-järjestelmistä:

- Vaati hieman totuttelua aluksi
- Helpotti työskentelyä näkyvyyden ollessa heikko
- Auttoi tiivistämään päällystettä juuri haluttu määrä, kun järjestelmään oli syötetty tavoitteellinen ylityskertamäärä
- Uskottiin helpottavan kokemattoman jyräkuskin työskentelyä
- Kaipaamaan jäätiin ominaisuutta, jolla voitaisiin lähettää viesti toiseen jyrään sekä jyrän ja levittäjän välistä etäisyydentunnistusjärjestelmää, jota voitaisiin hyödyntää työskenneltäessä levittäjän välittömässä läheisyydessä
- Jyrien välillä oli vaihtelua siinä, millä tarkkuudella järjestelmä alkoi ”maalaamaan” jyräkarttaa silloin, kun täry kytkettiin päälle tai pois
- WLAN-ominaisuus koettiin hyödylliseksi ja se helpotti työskentelyn yhteensovittamisessa jyräkuljettajien kesken
- Lämpötilanseuranta auttoi työskentelyn ajoittamisessa.

6. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutustua itsemittaavien asfalttijyrien teknologiaan ja arvioida sen soveltuvuutta uuden päällysteen laaduntodentamismenetelmänä. Itsemittaavat asfalttijyrät keräävät tietoa päällysteen pintalämpötilasta, tiivistettävän materiaalin jäykkyydestä sekä jyrän ylityskerroista paikkatietoon sidottuna. Jyrän osalta materiaalin jäykkyyden laskentaan vaikuttavat eniten värähtelytapa, epäkeskinen voima, värähtelyn taajuus sekä amplitudi ja ajonopeus. Tiivistettävän materiaalin osalta merkittävimmät tekijät ovat pohjaan tyyppi ja kosteus, asfalttimassan koostumus, sekoituslämpötila sekä päällysteen alapuolinen jäykkyys.

Koekohteen päällysteelle tehtiin useita erilaisia mittauksia: päällysteestä otettujen poranäytteiden tyhjätilojen määrittäminen, päällystetutkamittaus, jatkuva taipumamittaus, tasalaatuisuus- sekä lämpökameramittaus (työnaikana).

- Poranäytteiden tutkimustulosten perusteella ICMV:n arvojen vaihtelua vaikuttaa hallitsevan muut tekijät kuin päällysteen tyhjätila, mikä vastaa aiheesta aiemmin tehtyjä tutkimuksia
- Päällystetutkamittaus tehtiin lähes koko koekohteele. Kahden jyrän mittausarvojen tuloksia voitiin verrata tutkamittauksen dielektrisyysarvoihin. Tulosten mukaan jyrien mittausarvojen ja päällystetutkamittauksen dielektrisyysarvojen välillä ei ollut korrelaatiota
- Jatkuvan taipumamittauksen tuloksista vertailtiin SCI 200 ja BCI 900-1200 -indeksejä jyrien ICMV-arvoihin. Tulosten perusteella mittausmenetelmien tulosten välillä ei vaikuttanut olevan korrelaatiota
- Lämpökamera- ja MPD-mittaus tuloksia verrattiin kahden jyrän ICMV- ja lämpötilamittauksiin. Vertailu oli haastavaa ja se jäi melko pintapuoliseksi tarkastelutavasta sekä testipisteiden vähyydestä johtuen
- ICMV-arvo on erilainen valmistajien kesken, mikä johtuu erilaisista laskennallisista algoritmeista ja määritelmistä sekä lukuasteikoista, joissa arvot esitetään.

Itsemittaavien asfalttijyrien tämänhetkinen kehitystilanne

Jyrät ja niiden järjestelmät toimivat yleisesti ottaen hyvin ja käyttöönotto oli suhteellisen yksinkertaista. Jyräkarttoihin jäi joitain hajanaisia tyhjiä alueita. Alueiden muodostuminen voi johtua esimerkiksi siitä, ettei kuljettaja ole muistanut aloittaa tiedon tallentamista työmaalle tullessaan; maaston katvealueesta, jossa jyrä on menettänyt yhteyden satelliitteihin; tai kuljettaja on käynyt täydentämässä jyrän vesi- ja/tai polttoainesäiliön, jolloin tiivistystyön on hetkellisesti hoitanut toinen jyrä. Kokeilun aikana tietoa saatiin kerättyä kolmella jyrällä viidestä. Tiedonkeruuongelmien epäiltiin liittyneen lähinnä jyrien paikannusjärjestelmiin.

Käytännössä itsemittaavat jyrät on suunniteltu suurempiin päällystysprojekteihin, eikä niiden käyttämiselle pienillä työkohteilla saada merkittävästi lisäarvoa. IC-teknologian harvinaisuuden vuoksi itsemittaavien jyrrien hankintahinta on tällä hetkellä selvästi korkeampi tavanomaiseen jyrään verrattuna. Toisaalta, teknologian yleistymisen myötä myös hankintahinta laskee.

Itsemittaavien asfalttijyriä viimeisin ominaisuus on tiivistystyön reaaliaikainen seuranta työmaan ulkopuolella. Toiminnon avulla esimerkiksi työnjohto voi tarkastella työn etenemistä pilvipalvelimella omalta päätelaitteeltaan.

Itsemittaavien asfalttijyriä hyödyntämismahdollisuudet

Itsemittaavien jyrrien teknologia edesauttaa jyräkuljettajan työskentelyä etenkin näkyvyyden ollessa heikko. Tällaisia tilanteita ovat pimeällä työskentely tai sateen aiheuttama sumu/vesihöyry. Jyräkartan avulla kuljettaja voi varmistaa kohdat, joista on tai ei ole jyrätty. Edellä mainituissa tilanteissa voidaan hyödyntää myös WLAN-ominaisuutta, jota voidaan käyttää, kun työmaalla on useampi kuin yksi itsemittaava jyrä. Ominaisuuden avulla kuljettaja voi varmistaa päällysteen tiivistämättömät kohdat palatessaan työmaalle jyrän vesi- tai polttoainesäiliön täydentämisen jälkeen.

Päällysteen lämpötilaseurannan avulla tiivistystyö voidaan ajoittaa oikein, eli liian kuumen tai kylmän päällysteen tiivistäminen voidaan välttää. Asfalttijyrissä on ollut lämpötilamittareita jo vuosia, mutta ne ovat näyttäneet päällysteen pintalämpötilan ainoastaan jyrän kohdalla. Itsemittaavien asfalttijyriä näytöltä päällysteen lämpötila on nähtävissä kokonaisvaltaisemmin.

Työnaikana jyräkuljettajan seurattuna järjestelmään syötettyä ylityskertojen tavoitteellista lukumäärää välttyään päällysteen liialliselta tai liian vähäiseltä jyräämiseltä. Ylityskertojen lukumäärä voidaan määrittää työkohteen alussa tai erillisellä testikentällä. Erillisellä testikentällä tehtävät päällysteen tiiviiden tutkimukset tuovat aikataulullisia sekä käytännöllisiä haasteita. Tällöin sekä kalusto, henkilökunta, liikennejärjestelyt ja muu tarvittava tulisi organisoida jo hyvissä ajoin ennen varsinaisen työkohteen aloittamista.

IC-teknologian avulla tiivistystyö voidaan dokumentoida sekä raportoida. Tiedonsiirto jyrästä analysointiohjelmaan tapahtuu USB-tikun välityksellä tai yhä yleisemmin langattomasti suoraan internetpalvelimelle. Analysointi ja raportointi voidaan tehdä esimerkiksi valmistajien omilla tietokoneohjelmilla tai lähes kaikkien jyrävalmistajien tukemalla Veta-ohjelmalla. Myös Excel-tilukkolaskentaohjelmalla tarkastelu on mahdollista, mutta se on haastavaa tiedostojen suuresta koosta johtuen sekä siitä, että kaikki ohjelmat eivät sellaiseen tuota kaikkia mahdollisia tietotyyppisiä (all passes/final coverage data) Excel-yhteensopivassa muodossa.

Kokeilun perusteella tehdyt havainnot

Itsemittaavia asfalttijyriä käytettäessä on syytä varmistaa niiden paikannusjärjestelmien toimivuus. Tiettyjen jyrien paikannusjärjestelmät vaativat tai niiden tarkkuuden maksimointi saattaa edellyttää kohteelta mitattuja koordinaattipisteitä jo ennen työnsuoritusta.

Oleellista itsemittaavien asfalttijyrien hyödyntämisessä on riittävän ylityskertojen määrittäminen ja se, millaisella mittalaitteella määrittäminen tehdään. Käytettävän mittalaitteen tulisi olla luotettava ja kestää korkeat mittaustilapöytätilat, joten mitä nopeammin laite suorittaa mittauksen, sen parempi. Radioaktiiviseen säteilyyn perustuvat mittalaitteet, kuten esimerkiksi Troxler ja Seaman ovat käyttökelpoisia, mutta Suomessa niiden käyttäminen vaatii lisenssin, minkä vuoksi laitteiden saatavuus on hyvin heikko. PQI-laitetta voitaisiin myös hyödyntää, eikä sen käyttäminen vaatisi vastaavia lisenssikoulutuksia kuin radioaktiiviseen säteilyyn perustuvien mittalaitteiden käyttö. Päällysteen tiiviiden kehitymistä olisi teoriassa mahdollista seurata myös porapalojen avulla, mutta tutkimustuloksien saaminen kestää vuorokausia. Lisäksi itse näytteenotto tulisi tehdä vasta, kun päällyste on riittävästi jäähtynyt. Tämän tutkimuksen yhteydessä toteutetulle koekohteelle ei saatu järjestettyä päällysteen tiiviiden seuraamiseen tarkoitettua mittalaitetta.

Jatkotutkimussuositukset

Vaikka tässä tutkimuksessa itsemittaavien jyrien tuottamille ICMV-arvoille ei löydetty korrelaatiota tiettyihin perinteisiin mittaamenetelmiin verrattaessa, on relevanttia tutkia mahdollista korrelaatiota muihin mittaamenetelmiin. Tällaisia mittalaitteita olisivat esimerkiksi radioaktiiviseen säteilyyn perustuvat mittalaitteet, PQI-laite sekä pudotuspainolaite. Oleellista on myös selvittää itsemittaavien asfalttijyrien mittaussyvyys erilaisilla tierakenteilla. Tutkimuksia on suotavaa jatkaa, jotta jyrien mittausrvoja voidaan tulkita luotettavammin ja päästäisiin lähemmäs tilannetta, jossa teknologiaa voitaisiin hyödyntää päällysteen laadunarvostelussa.

Itsemittaavien asfalttijyrien teknologia nähdään potentiaalisena laadunhallinnan työkaluna riittävän suurikokoisissa päällystystöissä, joita voisivat olla esimerkiksi lentokenttä- ja moottoritiehankkeet.

LÄHTEET

Chang, G., Dick, J. & Rutledge, J. (2016). Intelligent Compaction Data Guidelines – For Use with Veta 4.0+, The Transtec Group, Inc.

Chang, G., Garber, S., Rutledge, J., Xu, Q. (2014). A Study on Intelligent Compaction and In-Place Asphalt Density, The Transtec Group.

Chang, G., Horan, B., Michael, L., Rutledge, J., Vennapusa, P., White, D., Xu, Q. (2011). Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology for Embankment Sub-grade Soils, Aggregate Base, And Asphalt Pavement Materials - Final Report, Federal Highway Administration.

Eskelinen, P., Hartikainen, A. & Pellinen, T. (2018). Asfalttipäällysteen tyhjätilan mittausten menetelmien arviointia, Aalto-yliopisto. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/29642>

Eskola, K., Lehtonen, K., Onninen, H., Peltoniemi, H., Petäjä, S., Siitonen, P., Sikiö, M-T. & Valkeisenmäki, A. (2018a). Tierakenteen suunnittelu, Liikennevirasto.

Federal Highway Administration. (2017). Intelligent Compaction Measurement Values, Technical Brief. Saatavissa: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/ic/>

Federal Highway Administration. (2014). Intelligent Compaction Technology for Asphalt Applications, Generic – IC Specifications for Asphalt Materials. Saatavissa: <https://www.fhwa.dot.gov/construction/ictssc/specs.cfm>

Halttunen, K., Jämsä, H., Kollanen, T., Kurki, T., Laitinen, V., Peltonen, P., Saarela, A., Saarinen, L. & Vuorinen, J. (1993). ASTO: Loppuraportti, PANK ry.

Heikkilä, J. (1989). ASTO: Päällystemassan tiivistettävyyys, PANK ry.

Karlsson, H., Kettunen, U-P., Laitinen, V., Nevala, E., Pellinen, T., Pohjola, P., Wastimo, E. & Weckström, L. (1992). ASTO: Asfalttipäällysteet osa 2: Tuotanto, PANK ry.

Kloubert, H.J. & Scramm, W. (2014). Advanced direct quality control for asphalt compaction, BOMAG.

Laitinen, V. & Pellinen, T. (1992). ASTO: Vaikeasti työstettävän massan tiivistäminen, PANK ry.

Liikenneviraston ja ELY-keskusten päällysteiden ylläpidon hankinnan asiantuntijat. (2018b). Uusien päällysteiden laadunosoitusmittaukset, Liikenneviraston ohjeita 5/2018, Liikennevirasto.

Lämpösäteily ja infrapuna, Infradex Oy, verkkosivu. Saatavissa: <https://www.infradex.com/lamposateily-ja-lampokamera/>

Mäki, V. (2017). Traffic speed deflectometer -tekniikan käyttö tierakenteiden diagnostiikassa, Tampereen teknillinen yliopisto.

Olli, M. (2017). Tiiveyden tarkkailu jyräyksessä NCC Industry Oy, Liikennevirasto. Saatavissa: https://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/431718/Tiiveydentarkkailu_Digipilottiraportti.pdf/9331b02b-d832-4d6f-95e4-9a293e3ed071

PANK ry (2017) Asfalttinormit 2017. Helsinki.

Pohjola, P. (2013). Asfaltin tiivistysopas, INFRA ry.

Päällystealan neuvottelukunta. (2019). PANK-5212, Uuden päällysteen tasalaatuisuus, PTM-auto, PANK ry.

Päällystealan neuvottelukunta. (2012). PANK-4123, Dielektrisyteen perustuva pistekohmainen asfalttipäällysteen tiheyden mittaus, PANK ry.

Päällystealan neuvottelukunta. (2011). PANK-4113, Päällysteen tiheys, DOR-menetelmä, PANK ry.

Päällystealan neuvottelukunta. (2008). PANK-4122, Asfalttipäällysteen tyhjättila, päällystetutkamenetelmä, PANK ry.

Seaman Nuclear Corporation. (2010). C-200 Operator's Manual. Saatavissa: <http://seaman-nuclear.com/Docs/C200Manual.pdf>

Surface Thin Layer Density Gauge 4640-B, Troxler Electronic Laboratories, verkkosivu. Saatavissa: <http://www.troxlerlabs.com/Products/Details?prodid=4&brand=Troxler&item=4640-B+Surface+Thin+Layer+Density+Gauge>