

Pertti Virtala
Pauli Alanaatu
Timo Eskola
Erko Libe

Päällysteen pituussuuntainen epätasaisuus

Aallonpituusanalyysit ja simuloinnit



Pertti Virtala, Pauli Alanaatu, Timo Eskola, Erko Libe

Päällysteen pituussuuntainen epätasaisuus

Aallonpituusanalyysit ja simuloinnit

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 2/2017

Liikennevirasto

Helsinki 2017

Kannen kuvat: Destia Oy

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-350-7

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Pertti Virtala, Pauli Alanaatu, Timo Eskola ja Erko Libe: Päällysteen pituussuuntainen epätasaisuus. Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2017. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 2/2017. 70 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-350-7.

Avainsanat: tiet, päällysteet,

Tiivistelmä

Työssä tarkasteltiin erilaisten tien pituussuuntaista epätasaisuutta kuvaavien tunnuslukujen kykyä tunnistaa erityyppisiä epätasaisuuksia. Tunnusluvut ryhmiteltiin kolmeen ryhmään, joista ensimmäisessä ryhmässä olivat perinteiset palvelutasomittauksilla tuotettavat tunnusluvut kuten IRI tai eri aallonpituusalueilta tuotettavat RMS-tunnusluvut. Toisessa ryhmässä olivat aallonpituusanalyysillä tuotettavat tunnusluvut, joissa pituusprofiilista muodostettiin erilaisten matemaattisten muunnosten jälkeen tunnuslukuja eri aallonpituusalueille. Kolmannen ryhmän muodostivat ne tunnusluvut, jotka simuloitiin kuorma-automallilla käyttäen molempien ajourien pituusprofiileja.

Käytännössä on havaittu ainakin kuusi erilaista epätasaisuuden tyyppiä, joille on ominaista tietynlainen, muista poikkeava, profiili. Profiilin tunnusmerkkejä ovat pituussuuntainen aallonpituus, pystysuuntainen amplitudi ja epätasaisuuden toistuvuus. Yksittäisepätasaisuuksille on tyypillistä, että niissä on tietyllä melko lyhyellä matkalla havaittava kohouma tai painuma. Kohouma tai painuma voi olla terävä tai pyöreä. Varsinaiset painumat taas ovat pitemmällä matkalla havaittavia tielinjan painumisia, joilla on epätasaisuutena havaittavat alku- ja loppukohdat ja niiden välissä melko tasainen alue. Muita epätasaisuuksia ovat lyhytaaltainen jatkuva epätasaisuus ja poikkihalkeamista johtuva epätasaisuus.

Graafinen tarkastelu tuotti visuaalista tietoa siitä, miten tunnusluku reagoi tiettyyn epätasaisuutta sisältävään tien kohtaan. Sen avulla haettiin tuntumaa siihen, miten tunnusluku käyttäytyi yksittäisissä kohdissa. Ryhmittelyanalyysillä tarkasteltiin koko tien epätasaisuustunnuslukujen skaala ja haettiin vastausta siihen, mitkä tunnusluvut kuvasivat samaa asiaa, mitkä tunnusluvut sijoittuivat eri ryhmiin ja kuinka monta ilmiötä tien epätasaisuudessa oli. Tilastollisen prosessiohjauksen avulla haettiin kullekin tunnusluvulle sen tyypillisen vaihtelun ja erityisvaihtelun erottavia raja-arvoja ja siten tunnusluvun kykyä erottaa tietyn epätasaisuustyyppin olemassaolo tarkasteltavana olleella kohteella.

Ryhmittelyanalyysillä tarkasteltiin tiettyä kohdejoukkoa, joka koostui viidestä päätiekohteesta (vt3, vt 6, vt 7, kt 50 ja kt 55) ja yhdestä maantiekohteesta (mt 170). Sen avulla tutkittiin, miten monta pituussuuntaiseen tasaisuuteen liittyvää ”ilmiötä” kyseisessä aineistossa oli ja miten eri tunnusluvut ryhmittyivät. Tien pituussuuntainen profiilitieto sisälsi vähintään neljä eri ilmiötä, joita ei voitu yhdistää toisiinsa. Niitä olivat pinnan karkeus, pituuskaltevuus, epätasaisuus ja mäkisyys. Ryhmittelyanalyysi järjesti tunnusluvut niiden aallonpituusalueen määräämään järjestykseen, mikä viittaa siihen, että juuri aallonpituus on keskeinen tasaisuuteen liittyvän ilmiön mittari. Kun tien pelkkä tasaisuus ryhmiteltiin neljään ryhmään, niin ryhmiä olivat lyhytaaltainen epätasaisuus (RMS/WBA/LPV) yhdessä IRI:n kanssa, keskiaaltoiset epätasaisuustunnusluvut (RMS/WBA/LPV), RIDE-tunnusluvut ja pitkäaaltoiset tunnusluvut.

Aallonpituusanalyysien lyhyt-, keskipitkä- ja pitkäaaltoiset tunnusluvut ryhmittyivät aallonpituusalueen mukaisiin ryhmiin. Ts. WBA_SW vastasi WBA_LPV3, WBA_MW vastasi WBA_LPV10 ja WBA_LW vastasi WBA_LPV30.

Ajoneuvosimulointien liikesuuntien kiihtyvyydestä vastasivat jousituksesta ja akselistosta laskettavia tunnuslukuja. Ts. korin pystykiihtyvyys (VERT_a_std) vastasi ajoneuvon tiehen kohdistamaa rasiitusta (ESAL_std), sivuttaisheilahduskiihtyvyys (ROLL_a_std) vastasi pyöräpallon siirtymää puolelta toiselle (LTR_std) ja korin nyökkimiskiihtyvyys (PITCH_a_std) vastasi iskunvaimentimissa tehtyä työtä (Ityö).

Tilastollisen prosessinohjauksen ohjauskorteilla tarkasteltiin tunnuslukujen arvojen vaihtelua erilaisilla kohteilla ja poikkeuksellisten kohtien erottelukykyä. Ohjauskorttityyppi oli IM-yksittäishavaintojen kortti. Kortilla nähtiin yksittäisten havaintojen arvot sekä niistä laskettu keskiarvo ja sen normaalin vaihtelun raja-arvot. Epänormaalien kohtien määrää ja sijoittumista tarkastelemalla tehtiin johtopäätöksiä siitä, miten kukin tunnusluku löysi ilmiöitä.

Kaikille tunnusluvuille oli tyypillistä, että ne tavalla tai toisella reagoivat poikkeuksellisiin kohtiin. Toisinaan tunnusluku reagoi hyvin ja toisinaan lievemmin. Reagoinnin selkeys riippui tunnusluvun aallonpituusalueesta ja poikkeuksellisen tienkohdan epätasaisuuden tyypistä.

Kaikki tunnusluvut reagoivat yksittäisepätasaisuuksiin. PTM- ja WBA-tunnusluvut reagoivat tunnistaen pituusprofiilista poikkeuksellisia kohtia. RIDE-tunnusluvut reagoivat niihin ajoneuvomallin kautta. RIDE-tunnusluvuissa oli mukana ajonopeuden vaikutus ja tien epätasaisuuden haitallisuus ts. haitalliset epätasaisuudet näkyivät suurina tunnuslukujen arvoina ja lievät pienempinä riippumatta siitä, kuinka vakava tien epätasaisuus profiilista katsottuna oli.

Painumien alku- ja loppupisteet näkyivät tunnusluvuissa hyvin. Painumien alku- ja loppukohtien välistä aluetta ei tunnistettu juuri ollenkaan.

Epätasainen tie näkyi kaikissa tunnusluvuissa. Eniten epätasaisia (poikkeuksellisia kohtia) kohtia tunnistettiin RIDE-tunnuslukujen ja IRI_10:n avulla.

Tilastollisen prosessinohjauksen tuloksissa näkyi sama asia kuin ryhmittelyanalyysissä eli tiettyjen tunnuslukujen informaatio oli hyvin samanlaista. Ts. tunnusluvut kuvasivat samaa ilmiötä. Esimerkiksi aallonpituusanalyysien tunnusluvuista voidaan olla melko varmoja siitä, että SW/MW/LW vastaavat melko hyvin LPV3/LPV10 ja LPV30 –tunnuslukuja kukin aallonpituusalueensa mukaisesti. Vastaavasti RIDE-tunnusluvuissa pystykiihtyvyyttunnusluvun kanssa yhtenäinen oli tierasitus, sivuheilahdustunnusluvun kanssa yhtenäinen oli pyöräpainon siirtymä ja vastaavasti nyökkimistunnusluvun kanssa yhtenäinen oli iskunvaimentimien työ. IRI_10-tunnusluvussa on hyvin paljon samaa lyhytaaltoisten RMS-tunnuslukujen (RMS1 ja >RMS3) kanssa, mutta siitä näytti puuttuvan kuitenkin megakarkeuden alue. Vastaavasti siinä on vain lievästi mukana pitkäaaltoinen epätasaisuus.

Tasaisuuteen liittyvät tarkastelut tehtiin vain PTM-mittausten tuottamasta mittausdatasta. Vaihtoehtona oli tarkastella myös laserkeilauksesta saadusta mittausdatasta tehtyjä tunnuslukuja, mutta se jätettiin mittausdatassa olevien toistettavuusongelmien takia pois. Perinteisten tunnuslukujen ja aallonpituusanalyysin tunnuslukujen puutteena oli, että ne käsittelevät ainoastaan pituussuuntaista epätasaisuutta, kun taas RIDE-tunnusluvut käsittelevät sekä pituus- että poikkisuuntaista epätasaisuutta.

Työ tuotti arvokasta tietoa tien epätasaisuudesta. Perinteisten tunnuslukujen lisäksi tarkasteltiin muita profiilista laskettavia tunnuslukuja. Uusi tapa tuottaa tietoa tien epätasaisuudesta on käyttää yhden tie-rengas kontaktin sijasta neljää tie-rengas kontaktia ja saada samalla lisää sellaisia liikesuuntia, jotka vaikuttavat tien käyttömukavuuteen, mukaan. Klusterianalyysillä saatiin tietoa tien epätasaisuuteen liittyvistä ilmiöistä. Tilastollisen prosessin hallinnan avulla saatiin tietoa siitä mikä on normaalia vaihtelua ja mikä epänormaalia. Sen avulla pystyttiin tarkastelemaan tien epätasaisuutta ikään kuin jatkuvana tuotteena, jonka valmistusprosessi tuottaa. Tuotteella pitäisi olla speksit, jotka liittyvät tuohon jatkuvaan prosessiin.

Pertti Virtala, Pauli Alanaatu, Timo Eskola och Erko Libe: Den långitudinella ojämnheten av bälegningen. Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2017. Trafikverkets undersökningar och utredningar 2/2017. 70 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-350-7.

Sammanfattning

I denna rapport olika indexer för vägens långitudinella ojämnheter har studerats. Indexerna var delad för tre olika grupper, som var traditionella indexer som IRI (international Roughness Index) och RMS-indeksar med olika våglängder, våglängdsanalyser och indexer från dynamiskt simulation av åkande fordon på vägeytan.

I praktiken sex olika ojämnhets typer har upptäckats som har en egen individuell profil. Tre olika karakteristiker är våglängden, amplitud och upprepandet av indexen. För enstaka ojämnheter är typiskt att dom har en enskildt ojämnheter upp eller ned under en kort sträcka. En annan grupp är sådana ojämnheter som startar och slutar längre sträckor där vägeytan har djupat sig på lägre nivå än tidigare. Andra ojämnheter är kort vägband ojämnheter och ojämnheter på grund av sprickor tvärs över.

Grafisk analys givde information om hur indexen reagerade till olika ojämnheter. Den visade hur indexen uppträdde i olika ojämnheter. Klusteranalysen var gjort över hela våglängden i vägen och den svarade på frågan om vilka indexer relaterade med varandra och vilka indexer relaterade inte. Med statistisk process kontroll skillnade man den speciella variationen av den normala variationen i en index. Special variationen i process kontroll var en tacksäkerhet av att indexen skillnade den speciella ojämnheten som vägeytan hade.

Klusteranalysen var gjord med data av sex vägar. Den visade hur många fenomen det fanns i den longitudinella riktningen i vägen och hur olika indikatorerna klusterade. Det fanns minst fyra olika longitudinella fenomen i vägen som inte kunde kombineras. Dom var textur, gradienten, ojämnheter och bakigheten. Klusteranalysen sorterade indikatorerna på grund av våglängden vilken påverkade på den saken att våglängden var en viktigt mätare. När man klusterade ojämnheten på fyra grupper, klusterna var ojämnheten med kort våglängd (RMS/WBA/LPV) tillsammans med IRI, ojämnheten med mellan våglängd (RMS/WBA/LPV), RIDE-indikatorer och ojämnheten med lång våglängd.

Våglängdsanalysen klusterade alla indikatorerna på grund av våglängder. WBA_SW motsvarade på WBA_LPV3, WBA_MW motsvarade på WBA_LPV10 och WBA_LW motsvarade på WBA_LPV30.

I fordon simulering indikatorer från accelerationen motsvarade på indikatorerna kalkulerad från axel rörelser. Den vertikala accelerationen (VERT_a_std) motsvarade på belastningen av tunga fordon på vägen (ESAL_std), den laterala swingen (ROLL_a_std) motsvarade på förskjutning av hjulvikter från en sidan till andra sidan (LTR_std) och nickningen (PITCH_a_std) motsvarade på arbetet i stoddämparna (Ityö).

Med statistisk process kontroll korter analyserade man variationen av indikatorerna på olika vägar. Metoden var den individuella IM-korten. I korten hade man individuella värdena, mellanvärden och gränserna som visar den normala variationen. Mängden av ovanliga värden och lägen kunde man göra slutsatser av hur varje indikatorerna kunde hitta ovanliga värden.

Det var typiskt att alla indikatorerna kunde hitta ovanligt variation på någon sätt. I några situationer indikatorerna kunde reagera väl och i andra situationer inte. Reageringen berodde på våglängden och typen av ojämnheten. Alla indikatorerna kunde hitta enskilda ojämnheter.

Traditionella indikatorer och WBA-indikatorer kunde hitta ovanliga värden på vägen. RIDE-indikatorerna reagerade på ojämnheten genom fordon modellen.

Man kunde identifiera start och slut punkterna av depressioner men inte sträckorna mellan dom.

En ojämn väg kunde man identifiera med alla indikatorer. RIDE-indikatorer och IRI_10m kunde identifiera den största mängden av ojämnheter.

Statistisk process kontrollen visade den samma saken som kluster analysen. Några indikationer hade samma information med varandra. Till exempel våglängdsanalysens indikationer WBA_SW/MW/LW visade samma information som indikatorerna LPV3/LPV10/LPV30 respektive. RIDE-indikatorerna t.ex. vertical accelerationen visade samma informationen som fordons belastning (ESAL), osv.

Alla indikationer var kalkulerat av PTM-data. Också laserskanning var användat och några indikationer var kalkulerat med den data, men man antecknade att reperbarheten av den data var inte så bra och den var inte användat mera.

De traditionella indikatorerna var kalkulerad av en enlig längsprofilen (den högre) och dom visade bara den långitudinell dimensionen. RIDE-indikatorerna var kalkulerats av båda längsprofiler (vänstra och högre) och därför dom visade också partiellt också den transversell ojämnheter. I fordon simuleringar den begränsningshastigheter var användt så att man körde på den samma hastigheten som trafiken vanligen gör.

Analyserna producerade viktigt information av olika indikationerna och fenomen av vägens ojämnheter. Den nya sätten att producera indikatorer av ojämnheter på vägytan var i stället av sätta en hjul på den högre spåren var att sätta en full fordon med två axlar och fyra hjul på vägen (vänstra och högra spåren). Man kunde få mera rörelseriktningar av fordonet och på det sättet kunde handla relationen av komfort och ojämnheter bättre. Med klusteranalysen kunde man identifiera hur många fenomen fanns på vägens ojämnheter och vilka indikatorerna visade den samma informationen. Med statistisk process kontroll kunde man se vilka indikatorerna kunde identifiera ovanliga ojämnheter på vägen.

Pertti Virtala, Pauli Alanaatu, Timo Eskola and Erko Libe: Longitudinal unevenness of road pavement. Finnish Transport Agency, Technology and Environment. Helsinki 2017. Research reports of the Finnish Transport Agency 2/2017. 70 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-350-7.

Summary

In this report several indexes were studied to describe different phenomena of the unevenness of a road pavement. Indexes were grouped into three categories, traditional indexes taken from the high speed surveying vehicle, indexes calculated with wave band analysis and indexes simulated with full car truck model. The two first categories were based on the longitudinal profile taken from the right wheel path only and the third category was based on the longitudinal profile of both left and right wheel paths.

At least six different types of longitudinal unevennesses have been recognized in the road pavement. Unevenness of a road consists typically of different types of irregularities with different wave band, different amplitude and different repeating intervals. Singular unevenness is typically located in a short distance and they are recognized as a bump either up or down. In the vehicle those irregularities can cause vertical bounce or pitch movements. One type of unevenness on the road is a longer settlement where the whole road structure has fallen down due to weak foundation or soil. Then there is relatively continuous unevenness with short wavelength and unevenness due to transversal cracks.

A graphical study showed how each index reacted to unevenness on a road. It gave feedback of how the index behaved and which kind of differences there were in that behavior. The cluster analysis showed which of different indicators were describing the same phenomena and how many phenomenas there were in the road. A minimum number of phenomenas was four: texture, unevenness, gradient and hilliness. Unevenness of a road could be classified into several categories depending on how detailed classification was wanted. With a statistical process control was studied how the normal variation was separated from variation due to special causes.

Six roads consisting 98 sections totaling 294 km was studied with the cluster analysis. The cluster analyses grouped indexes according to their wavelength starting from short wavelength of texture. Unevenness was clustered into 1–13 clusters. Indexes were grouped into groups depending on the number of clusters. With four clusters the unevenness of a road was grouped to short wave unevenness with IRI, medium wavelength unevenness, RIDE-indexes and long wavelength unevenness. Corresponding wavelengths of RMSxx-, WBAxx- and LPVxx-indexes were grouped into same group. RIDE-indicators were grouped into three groups, vertical bounce with ESAL (Equivalent single axle load), rolling with LTR (Load transfer ratio) and pitch with the work in shock absorbers. An interesting outcome was that RIDE-indicators were grouped into different group than long wavelength indicators (RMS₃₀, WBA_LW and WBA_LPV₃₀). RMS₃ was similar with WBA_SW and WBA_LPV₃. RMS₁₀ was similar with WBA_MW and WBA_LPV₁₀. RMS₃₀ was similar with WBA_LW and WBA_LPV₃₀.

Indicators from RIDE-simulations were grouped into three groups. The vertical acceleration of chassis correlated with the ESAL's. The rolling acceleration correlated with LTR and pitch acceleration correlated with the energy used in shock absorbers.

Separate SPC-analyses with an individual value chart (IM-X) were made for individual road sections representing certain unevenness types. Each section (or part of a section) and each indicator was analysed separately. The IM-X-card showed the variation of an indicator, the average value for a section, statistical limits (UCL and LCL) corresponding the ± 3 standard deviations from the average, and the individual values as "outliers". Only the first rule out of 8 rules was used in separating the variation due to special causes ("outliers") from the normal variation.

For all indicators were typical that they reacted to the unevenness of a road in a way or other. The indicator reacted to the unevenness of a road according to the wavelength it represented. Indicators taken from the longitudinal profile (RMS, WBA) reacted only to the longitudinal unevenness. RIDE-indicators reacted also to the transversal unevenness (ROLL, LTR). Profile indicators didn't depend on the direction of calculation but RIDE-indicators did due to a small delay in the outcome compared to the actual location of a certain unevenness. RIDE-indicators were calculated by vehicle simulation and that is why the effect of simulation speed was included in them. Similar unevenness is not equally disturbing in the point of a road user. That is why disturbing values were noticed in RIDE-indicators.

In cases where there was a settlement in the road the start and end points were noticed in many indicators but they did not react in between.

A rough road was recognised with all indicators. RIDE-indicators and IRI_10 produced the highest amount of unexceptional observations (10 m sections with bad condition).

The SPC gave a similar outcome with the cluster analysis. Some of the indicators were very similar i.e. represented the same phenomena. Indicators calculated from the longitudinal profile could be grouped into the same groups according to the wavelengths they represented. Some of the simulated RIDE-indicators could also be grouped into the same group. There were three types of roughness causing uncomfot to a road user. Vertical bounce, roll and pitch. That was due to the four separate information streams fed into each of the four wheels of a vehicle in RIDE-simulations. In quarter car simulation (IRI) only one information stream can be feeded to the simulation.

From this study new valuable information was got of road unevenness. Some of the new indicators give more information of the unevenness of the road than the traditional indicators. Many of indicators are giving the same information. Four point feeding stream representing the road-vehicle interaction produces new indicators compared to one point feeding only. Statistical process control gives information about the variation due to common and special causes which makes the analysis more closer to the situation where the road represents the continuous product of a process. A new good road should have only normal variation due to common causes. The key parameters representing a good new road should be based on SPC. The recognition of irregularities in a road pavement should be based on the key parameters taken from a normal "road process".

Esipuhe

Päälysteiden pituussuuntaista epätasaisuutta on käsitelty perinteisesti neljännes-automalliin pohjautuvalla tasaisuusindeksillä, jonka puutteet ovat olleet hyvin tiedossa. Tässä työssä on käsitelty uusia tunnuslukuja ja niiden soveltuvuutta lähinnä uusien päälysteiden laadunvalvontaan. Uusia tunnuslukuvaihtoehtoja on muodostettu sekä päälysteen pituusprofiilista tehdyistä aallonpituusanalyyseistä että täys-automallilla tehdyistä simuloinneista.

Työn on tilannut Liikennevirasto ja sen ohjausryhmässä ovat olleet Kari Lehtonen, Sami Petäjä ja Juho Meriläinen.

Työn on toteuttanut Destia Oy, jossa siihen ovat osallistuneet projektipäällikkönä Pertti Virtala, aallonpituusanalysien tekijänä Erko Libe, ajoneuvosimulointien tekijänä Timo Eskola ja uusien tunnuslukujen kehittäjänä Pauli Alanaatu.

Helsingissä huhtikuussa 2017

Liikennevirasto
Tekniikka ja ympäristö -osasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	11
1.1	Taustaa	11
1.2	Painumien tunnustamiseen liittyviä selvityksiä	12
1.3	Sivukaltevuusvaihteluun liittyviä selvityksiä	13
1.4	Poikkihalkeamiin liittyviä selvityksiä	13
1.5	Tasaisuustunnuslukua koskeva kirjallisuusselvitys	15
1.6	Uuden tasaisuustunnusluvun kehittäminen ajoneuvosimuloinnilla	15
1.7	Tavoite	16
2	PITUUSPROFIILIN ANALYSOINTI	17
2.1	Mittaus	17
2.1.1	Palvelutasomittari	17
2.1.2	Laserskannaus	18
2.2	Tunnusluvut	19
2.2.1	Olemassa olevat tunnusluvut	19
2.2.2	Uudet tunnusluvut	21
2.2.3	Ajoneuvosimulointi	24
2.2.4	Laskentasuunnan vaikutus tunnuslukuihin	26
2.3	Tunnuslukujen analysointi	28
2.3.1	Graafinen analysointi	28
2.3.2	Prosessinohjaukset	29
2.3.3	Monimuuttujamenetelmät	30
3	EPÄTASAISUUSTYYPPIEN TUNNISTAMINEN	37
3.1	Uuden päällysteen epätasaisuus	37
3.1.1	PTM-tunnusluvut	37
3.1.2	Aallonpituusanalyysin tunnusluvut	41
3.1.3	RIDE-tunnusluvut	44
3.2	Pitkäaaltoinen epätasaisuus	46
3.2.1	Vahijärven painumakohta	46
3.2.2	Drägsbyn painumakohta	53
3.3	Lyhytaaltoinen epätasaisuus	58
3.4	Yksittäisepätasaisuus	61
3.4.1	Aallonpituusanalyysit	61
3.4.2	RIDE-tunnusluvut	63
3.4.3	Kehä III osa 7	64
4	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	66
	LÄHTEET	70

1 Johdanto

1.1 Taustaa

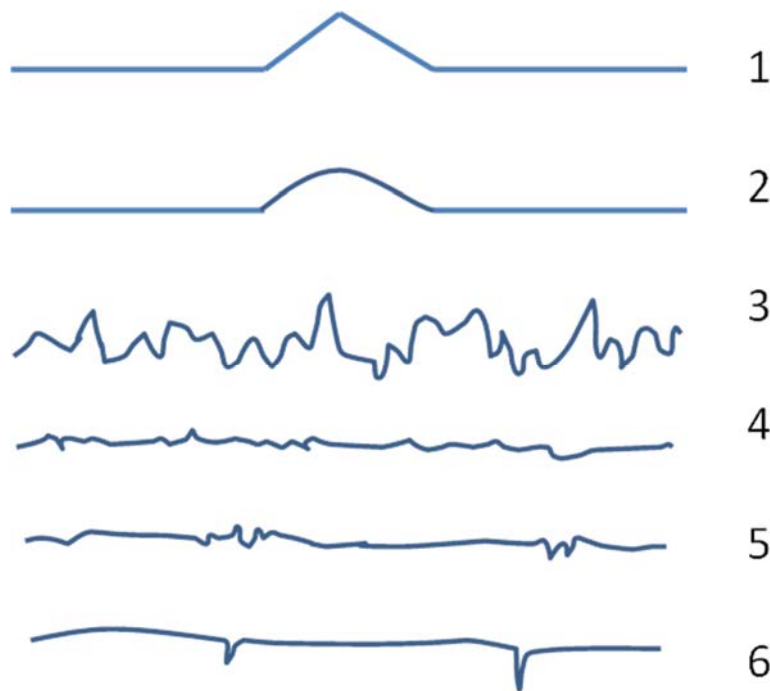
Liikennevirasto on selvittänyt tien pituussuuntaisten tasaisuustunnuslukujen sisältöä ja käyttöä eri maissa ja todennut, että pituussuuntaisen epätasaisuuden kuvaamiselle on tarvetta. Nykyisin käytössä olevaan IRI₁₀₀-tunnuslukuun (International Roughness Index) liittyy tiettyjä puutteita, joista merkittävimpiä ovat:

- Neljännesautomalli ei huomioi kaikkia liikesuuntia
- Mallin pohjana on vanha löysäjousinen ja suurikokoinen henkilöauto
- Henkilöautomalli ei ota huomioon raskaan ajoneuvon tilannetta
- Vakiosimulointinopeus ei vastaa tiellä vallitsevia nopeusolosuhteita
- Epätasaisuuden huomioinnissa aallonpituus on rajoitettu puoleen metriin
- Tunnusluku ei ota huomioon kaikkia epätasaisuuksia ainakaan 100 m jaksoilla
- Tunnusluku ei vastaa koettua ajomukavuutta riittävän hyvin
- Tunnusluku ei erittele erilaisia epätasaisuuden tyyppejä

Vuonna 2015 tehdyssä selvityksessä (*Asfalttipäällysteiden tasaisuustunnusluku. Uudet päällysteet. Liikenneviraston selvityksiä 13/2016*) annettiin suosituksia jatkotoimenpiteiksi epätasaisuuteen liittyvien tarkastelujen kehittämiseksi. Jatkotarkastelun piiriin suositeltiin otettaviksi Suomessa sellaiset tunnusluvut, jotka ovat joko määritetty, mitattavissa nopeasti ja käytössä tai joihin maailmalla selvästi tunnetaan mielenkiintoa. Tällaisia tunnuslukuja ovat profiili-indeksi, laskennalliset oikolautasovellukset, aallonpituuden perusteella tehtävät tunnusluvut sekä ajoneuvosimuloinneilla tuotettavat tunnusluvut.

Tien pituusprofiilista on tunnistettavissa ainakin kuusi erityyppistä epätasaisuuden tyyppiä, jotka on selitetty alla ja luonnehdittu oheisessa kuvassa:

- Tyyppejä 1:
 - Yksittäisepätasaisuus, joilla aallonpituus on pitkä ja aaltomuoto kulmikas.
- Tyyppejä 2:
 - Yksittäisepätasaisuus, jolla aallonpituus on pitkä ja aaltomuoto juohuva.
 - Tähän tyyppiin lukeutuu myös painumien alku- ja loppukohdat.
- Tyyppejä 3:
 - Normaali epätasaisuus. Normaalia epätasaisuutta ovat sellaiset kohdat, joilla on useita erilaisia epätasaisuuden aallonpituuksia.
- Tyyppejä 4:
 - Tasainen tie, jossa ei ole mitään muiden epätasaisuustyyppien mukaisia tunnistettavia kohtia.
- Tyyppejä 5:
 - Tasainen tie, jossa yksittäisiä epätasaisia kohtia esim. purkauksia.
- Tyyppejä 6:
 - Tasainen tie, jossa epätasaisia poikkihalkeamia. Poikkihalkeamat ovat yksittäisiä harvoin toistuvia selvästi erottuvia kohtia, jotka yleensä menevät läpi koko kaistan.



Kuva 1. Tien epätasaisuuden tyyppiä.

1.2 Painumien tunnistamiseen liittyviä selvityksiä

Painumien tunnistamista laserkeilauksen avulla on tarkasteltu julkaisussa ”Ajoneuvolaserkeilaus tien painuman mittauksessa. Pilottiraportti. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 8/2015”.

”Tämän projektin tavoitteena oli selvittää ajoneuvolaserkeilauksen soveltuvuutta väylien painumien seurantaan ja mallipohjaiseen tarkasteluun. Pilotissa selvitettiin eri ajoneuvolaserkeilauslaitteilla ja mittausmenetelmillä tuotettavien 3D-mallien tarkkuutta ja luotettavuutta sekä niiden soveltuvuutta tien painuman että pituuskaltevuuden muutosten laskennan lähtötiedoksi.”

”Tämän pilotin tulosten perusteella ajoneuvolaserkeilaus tien painumamittauksessa vaikuttaa lupaavalta. Lisätarkasteluja kuitenkin tarvitaan. Ajoneuvolaserkeilausta voitaisiin ajatella käytettävän esimerkiksi rakennetun tiekohteen takuuajan painuman korkeussuuntaisen absoluuttisen painuman selvittämiseksi. Ajoneuvolaserkeilaus on myös sovellettavissa tien pinnan pituussuuntaisten kaltevuusmuutosten laskennan lähtötiedoksi. Pituuskaltevuuksien ja niiden kulmanmuutosten laskentaan tulee käyttää riittävän pitkiä jännevälejä.”

”Tässä tutkimuksessa painumien tarkasteluun käytettiin periaatteessa samantilaista tietoa kuin vaaituksella mitattaessa. Tiedon hankintaan vain käytettiin ajoneuvolaserkeilausta. Jatkossa tulisi laajemmin tutkia kokonaisuutena uusien mittausmenetelmien ja 3D-mallien tarjoamia hyötyjä niin painumien kuin muidenkin tien kunnan muuttujien tutkimiseen.”

Tien haitallisen pituuskaltevuusmuutosten tunnistamista tarkasteltiin julkaisussa ”*Tien haitallisten pituuskaltevuusmuutosten tunnistaminen. Liikenneviraston selvityksiä 22/2012.*”

Työssä kehitettiin ajoneuvomalli, jolla voidaan simuloida ajoneuvon käyttäytymistä palvelutasomittausten perusteella tuotetulla pintaprofiililla. Parhaimmaksi ajoneuvodynamiikan perusteella tuotetuksi tunnusluvuksi osoittautui nyökkimiskulman hajoita, jolla painumakohtien tunnistustarkkuus oli 75 % ja painumia sisältämättömien kohtien tunnistustarkkuus oli 81 %. Perinteisille profiilista lasketulle pitkäaaltoista epätasaisuutta kuvaavalle tunnusluvulle, RMS30, saatiin hiukan parempi tunnistuskyky (90%, 82 %). [2]

1.3 Sivukaltevuusvaihteluun liittyviä selvityksiä

Päällysteen sivukaltevuusvaihtelua kuvaavia tunnuslukuja on kehitetty kahdessa eri työssä. Ensimmäinen niistä oli Eetu Hurtigin diplomityö, jossa tarkasteltiin ajoneuvosimuloinnin käyttöä (puolikas ajoneuvomalli) sivukaltevuusvaihtelun tunnistamisessa. Toinen oli sen jälkeen toteutettu työ, joka on raportoitu julkaisussa ”*Tien haitallisten sivukaltevuuspuutteiden tunnistaminen. Liikenneviraston selvityksiä 35/2012.*” Siinä tarkasteltiin sivukaltevuusvaihtelua ajoneuvosimulointien (täysajoneuvomalli) tuottamien tulosten avulla. Paras maastovastaavuus saatiin tunnusluvulle, joka kuvaa ajoneuvon pyöräpainosiirtymää (LTR, Load Transfer Ratio) puolelta toiselle.

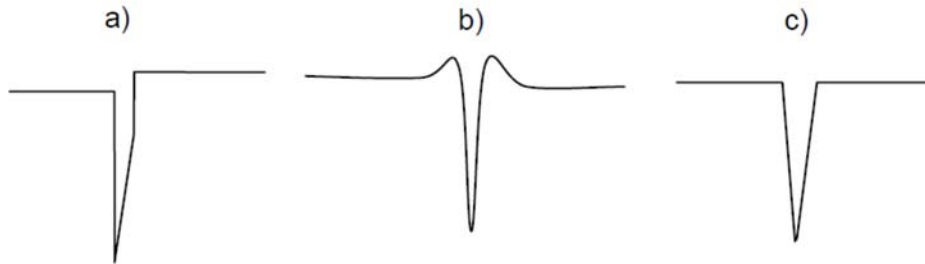
Ajoneuvon pyöräpainosiirtymä (LTR) on yksi RIDE-mallin tulos ja se sisältyy tässä työssä käytettäviin tunnuslukuihin. Pyöräpainosiirtymä on yksi ajoneuvojen suunnittelussa käytettävistä tunnusluvuista ja on siten sopiva tunnusluku myös tien sivukaltevuuksien arvioinnissa.

1.4 Poikkihalkeamiin liittyviä selvityksiä

Poikkihalkeamiin liittyvää epätasaisuutta on tarkasteltu julkaisussa ”*Poikkihalkeamien epätasaisuus. Tiehallinnon selvityksiä 44/2006.*”

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää menetelmä, jolla epätasaiset poikkihalkeamat voidaan paikallistaa tieverkolta, muuntamalla PTM-mittauksista saatavan profiilidatan keräämistä ja mahdollisuuksien mukaan verrata profiilidataa automaattisen päällysteiden vauriomittauksen (APVM) vauriokarttoihin. [4]. Sitä varten poikkihalkeamat luokiteltiin kolmeen eri tyyppiin (Kuva 2). Poikkihalkeamissa erityinen huomio kannattaa kiinnittää epätasaisiin poikkihalkeamiin. Epätasaisien poikkihalkeamien syntyyn vaikuttavat voimakkaasti sääolot. Arvioiden mukaan epätasainen poikkihalkeama syntyisi keskellä talvea olevan lämpimän jakson seurauksena. Myös tierakenteen ominaisuudet vaikuttavat rakenteen lämpötilaominaisuuksiin. Lämpötilan lasku aiheuttaa pakkas-katkon muodostumisen päällysteeseen ja mahdollinen on myös alemmasta kerroksesta johtuva heijastushalkeama. Myös raskaan liikenteen määrä vaikuttaa poikkihalkeamien syntyyn [4].

Tutkimus tehtiin keväällä 2006 Lapissa. Neljälle tieosalle suoritettiin ajopaneeli, jonka 10 m ja 300 m koettuja havaintoja ja kokemuksia verrattiin PTM-mittauksen avulla tuotettuihin tunnuslukuihin. Samojen tieosien PTM-mittaus tehtiin huhti-toukokuussa 2006 ja APVM-mittaus kesäkuun lopulla 2006. APVM:n vauriokartoista saatiin selkeät poikkihalkeamakohdat kultakin tieosalta. Lisäksi tuotettiin oheisaineistona Hämeen betoniteiden mittaustulokset. [4].



Kuva 2. Kolme erilaista poikkihalkeamatapausta, joista a) ja b) ovat tutkimuksen kannalta oleellisia. [4].

Poikkihalkeaminen reunojen tasoeron tutkimisessa käytettyjä tunnuslukuja olivat Faulting-algoritmilla ja Tasoeroalgoritmilla tuotetut tunnusluvut sekä MPD (Mean Profile Depth) ja IRI 50 mm. Näistä tunnusluvuista Faulting ja MPD saadaan PTM:n alemman tason datan avulla ja Tasoeroalgoritmin data ja IRI 50 mm erikoismittauksena tuotetun pituusprofiilin avulla. [4]

Faulting on määritetty AASHTOn tekemissä ohjeissa seuraavasti [5]:

- Faulting is defined for HPMS purposes as the absolute value of the difference in elevation across a joint in a jointed concrete (PCC) paved surface. It is recommended that AASHTO Standard Practice R 36-04 along with the LTPP Distress Identification Manual be followed as a guide to reporting faulting in jointed, rigid (PCC) pavement types. These include un-bonded jointed concrete overlays on PCC pavement and bonded PCC overlay of jointed PCC. For HPMS purposes, report the average joint faulting value for the section to the nearest tenth on an inch (0.1"). Faulting that occurs in other areas of the paved section away from the joint should be ignored for HPMS.

Tunnuslukujen soveltuvuutta arvioitiin tilastollisten seikkojen (ajopaneelin 10 m ja 300 m vastaavuudet) sekä lähtötietona käytettävän mittausdatan ja laskentatulosten käytettävyyden perusteella. Lähtötiedoksi mitatun datan käytettävyyden kannalta Faulting ja MPD olivat parhaita, koska tunnusluvuissa käytettävä data saatiin periaatteessa miltä tahansa mitatulta tieltä (tieto tallennustarpeesta vaadittiin ennen mitausta). Laskentatulosten käytettävyys oli hyvä Faulting-tunnusluvulla. Ajopaneelin 10 m havaintoihin verrattuna vastaavuusprosentti oli paras Tasoeroalgoritmilla, mutta kaikilla muilla tunnusluvuilla myös hyvä. Tasoeroalgoritmin huonona puolena olivat toisaalta liialliset havaintomäärät. Vertailussa ajopaneelin 300 metrin havaintoihin olivat parhaita Faulting ja MPD.[4].

Kokonaisuus huomioiden asfalttipäällysteisten teiden epätasaisten poikkihalkeamien havainnointiin suositellaan Faulting-tunnuslukua ja vaihtoehtona MPD:tä. Betoniteiden osalta Faulting vaikutti soveltuvalta, minkä lisäksi APVM:n vauriokartat antoivat erittäin hyvän havaintomateriaalin betonilaattojen saumakohtien avonaisuuden selvittämiseen. [4]

Työn lopputuloksena oli todettu seuraavaa:

- Faulting oli kokonaisuutena paras tutkituista tunnusluvuista, perustuen oikeiden kohtien löytymiseen ja erityisesti tunnusluvun käytettävyyteen.
- MPD oli Faultingin jälkeen seuraavaksi käytettävien tunnusluku poikkihalkeamien tunnistamiseen.
- Tasoero toi liikaa sietämättömiä poikkihalkeamia erityisesti käytettäessä kolmea eri pituusprofiilia. Yhden profiilin käyttö oli selkeämpää. Laskentaohjelmassa on kehitettävää.
- IRI 50 mm ei ollut kovin käyttökelpoinen johtuen tulosten liiallisista peräkkäisistä suurista arvoista.
- Jatkokehittämisen pohjaksi suositeltiin kahta parasta tunnuslukua Faulting ja MPD.

1.5 Tasaisuustunnuslukua koskeva kirjallisuusselvitys

Julkaisussa ”*Asfalttipäällysteiden tasaisuustunnusluku. Uudet päällysteet*. Liikenneviraston selvityksiä 13/2016” [1] selvitettiin mitä tasaisuustunnuslukuja eri maissa oli käytössä pääasiassa uusien päällysteiden tasaisuuksien arvioinnissa. Erilaisia tunnuslukuja oli yli tusinan verran. Osa tunnusluvuista oli käytössä ja osa melko harvinaisia. Tunnuslukujen käyttökelpoisuuden arvioinnissa kiinnitettiin huomiota siihen, miten helposti ja nopeasti tunnusluvun vaatimat mittaukset ovat mahdollisia, miten hyvin tunnusluvun avulla voitiin tunnistaa epätasaisuutta paikallisesti ja miten laajassa käytössä ne olivat tai miten kiinnostaviksi ne kehittämisen kannalta todettiin. Suositeltuja tarkastelutapoja olivat aallonpituusanalyysi (WBA), painotettu pituusprofiili (WLP) ja erillissimuloinneilla tuotettavat pystykihtyvyydestarkastelut (LWI, RIDE).

1.6 Uuden tasaisuustunnusluvun kehittäminen ajoneuvosimuloinnilla

Olemassa olevien eri-ikäisten päällysteiden tasaisuuden hallintaa varten on kehitetty uutta tasaisuustunnuslukua työssä, joka on raportoitu julkaisussa ”*Tien epätasaisuustunnusluvun kehittäminen. RIDE-ajoneuvomalli*. Liikenneviraston selvityksiä 46/2016”. Sen keskeisimmät löydökset ja suositukset ovat:

- RIDE-ajoneuvomalli on sovitettavissa vastaamaan suomalaisia tyyppiajoneuvoja
- Se ottaa huomioon kolme eri liikesuuntaa
- Ajomukavuus koostuu ainakin kolmesta eri komponentista, jotka pitäisi kaikki huomioida
- Liikekiihtyvyys korreloi paremmin ajomukavuuden kanssa kuin pelkkä liike (vrt. IRI) tai liikkeen nopeus.
- Sadan metrin tarkastelupituus keskiarvoistaa transientteja ja on usein liian karkea ja siksi suositeltavampi tarkasteluväli on 10 m.
- Suositeltava ajomukavuutta kuvaava tunnusluku on kolmen eri liikesuunnan kiihtyvyysskomponenttien muodostama kokonaisuus. Ajomukavuutta voidaan tarkastella joko kaikilla kolmella tunnusluvulla erikseen tai niiden yhdistelmänä.

Mallia on tarkasteltu tarkemmin luvussa Ajoneuvosimulointi ja sen tulokset ovat yksi vaihtoehto tässä työssä käytettävistä tarkastelutavoista.

1.7 Tavoite

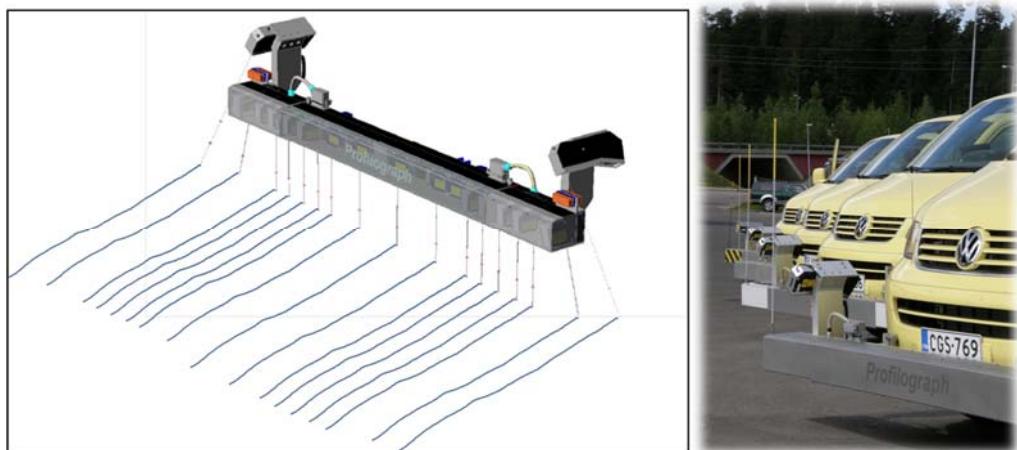
IRI tunnusluvun ongelma on se, että sen lukuarvosta on mahdoton erotella mistä kuvan 1 epätasaisuustyypeistä suurin arvo aiheutuu. Tämän työn tavoitteena oli löytää tunnuslukuja, joilla voidaan tunnistaa epätasaisuuden tyyppi tai tyyppien yhdistelmä. Työssä kokeiltiin erilaisten aallonpituusanalysien laskemista ja tarkasteltiin niillä saatujen tunnuslukujen ominaisuuksia ja käyttökelpoisuutta. Tarkastelussa arvioitiin, miten hyvin kullakin tunnusluvulla voitiin erotella kuvassa 1 mainittuja epätasaisuuden eri tyyppisiä. Työstä rajattiin poikkihalkeamiin liittyvät epätasaisuudet pois.

2 Pituusprofiilin analysointi

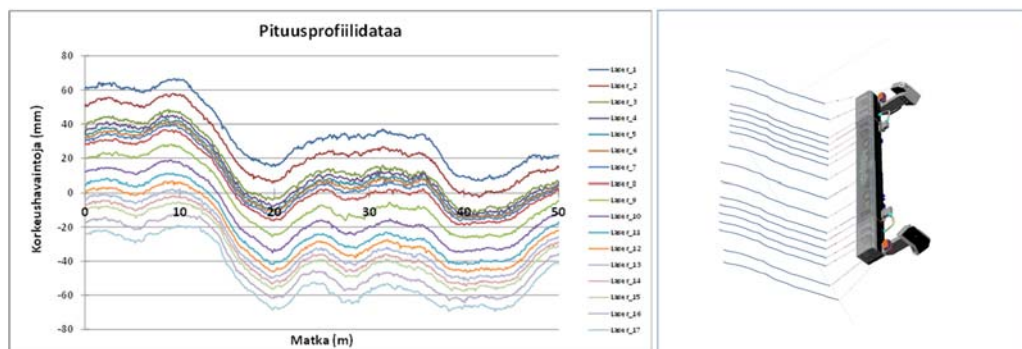
2.1 Mittaus

2.1.1 Palvelutasomittari

Päällysteiden pituusprofiilit mitataan pääsääntöisesti palvelutasomittarilla, joka tuottaa päällysteen poikkileikkauksesta 3,2 m leveydeltä 17 eri pituusprofiilia (Kuva 3, Kuva 4). Profiilin mittaus tapahtuu 16 kHz (16 kpl) tai 64 kHz (3 kpl) etäisyyslaser-antureilla, mutta sen yhteydessä mitataan matkaa, paikkaa ja ajoneuvon heilumista inertialaitteilla. Etupalkin laseranturit on numeroitu vasemmalta oikealle 1-17, joista anturit 3-7 tuottavat vasemman ajouran mittaustiedon, anturit 11-15 tuottavat oikean ajouran mittaustiedon ja keskianturi 9 tuottaa ajourien välisen mittaustiedon. Pituusprofiili on perinteisesti laskettu urien kohdalta ja niiden välistä, vaikka se on laskettavissa kaikista antureista. Anturit 18 ja 19 sijaitsevat ajoneuvon takana etupalkin antureiden 5 ja 13 kohdalla.



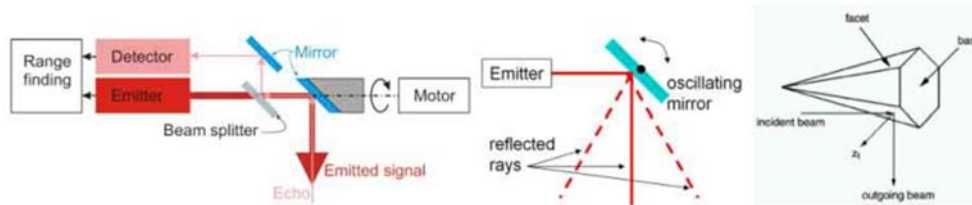
Kuva 3. Palvelutason mittauslaitteen mittauspalkki ja anturit.



Kuva 4. Pituusprofiilia 50 m matkalla kaikilta mittausantureilta 100 mm välein keskiarvoistettuna.

2.1.2 Laserskannaus

Laserskannaus tapahtuu ajoneuvoon kiinnitetyn skannerin avulla. Laitteessa on pyörivä skanneri noin 2.5 m korkeudessa sijoitettuna yleensä ajoneuvon taka-osaan (Kuva 5).



Kuva 5. Skannausperiaatteita. Vasemmalla pyörivä peili, keskellä peili, oikealla monikulmapeili (Lapytov, 2005).

Laserskannerilla mitataan kohteen pistepilveä. Mittaustulos on heijastavan kohdan alue ja kulma. Pistepilvi sidotaan ensin laserskannerin koordinaattijärjestelmään, josta se muunnetaan muihin koordinaattijärjestelmiin. Skannereita on valmistettu useisiin eri mittauksikokoihin, joista yleisimpiä ovat erilaiset ympäristön kartoitusmittaukset. Pienessä mittakaavassa skannausta voidaan tehdä myös tien päällysteen pinnasta (Taulukko 1).

Taulukko 1. Skannaustekniikoita [9].

Vendor	Product	Application(s)	Specifications
Acuity Research www.acuityresearch.com	AccuRange Line Scanner and AccuRange 4000 Distance Measurement Sensor	Scans and collects distance data over a full circle. High-speed interface available.	<ul style="list-style-type: none"> • 780nm (near IR) laser • 0.25mm resolution • 0 to 165m range • ± 2.5mm accuracy • Class I laser • Highest resolution
RIEGL Laser Measurement Systems www.riegl.co.at	LMS-Z210	Scene acquisition for virtual reality modeling applications, 3D imaging of buildings, topographic mapping, and dimensional measurements.	<ul style="list-style-type: none"> • 900nm (near IR) laser • 25.4mm resolution • 0.5 to 300m range • ± 25.4mm accuracy • Class I laser • Last Pulse feature (see section 6.2.2)
RMD Radiation Monitoring Devices www.rmdic.com	Laser RADAR (in research stage)	3D imaging of surroundings, measurement of objects.	<ul style="list-style-type: none"> • 900nm (near IR) laser • N/A resolution • 0 to 410m range • N/A accuracy • Class I laser • One line at a time
SICK Optic-Electronic www.sickoptie.com	Laser Measurement System (LMS) Scanner	For measurement of objects and position determination, monitoring areas and vehicle guidance and collision control.	<ul style="list-style-type: none"> • Near IR laser • 10mm resolution • 0 to 30m range • ± 15mm accuracy • Class I laser • Used in Antarctic exploration

Tässä työssä käytettiin skannauksilla tuotettua mittaustietoa niistä kohteista, joita oli mitattu vuonna 2015 tehdyssä selvityksessä [3]. Mittaustietoja saatiin Jussi Leinoselta (Destia Oy) ja Markku Pienimäeltä (Finnmap). Suomessa on käytössä mm. Trimble MX8 -laite (Geotrim Oy) (Kuva 6).



Kuva 6. Laserskannauslaite [3].

2.2 Tunnusluvut

2.2.1 Olemassa olevat tunnusluvut

Liikenneviraston tilaamissa palvelutasomittauksissa tuotetaan useita erilaisia tasaisuuteen liittyviä tunnuslukuja (Taulukko 2). Tasaisuustunnusluvut lasketaan pituusprofiileista, jotka on tuotettu erikseen sekä oikeasta että vasemmasta ajourasta sekä joidenkin tunnuslukujen kohdalla myös ajourien välistä. Kun pituusprofiilia mitataan 3,2 m leveydeltä 17 eri anturilla niin keskimäinen anturi tuottaa ajourien välistä laskettavien tunnuslukujen mittaustiedon ja siitä ± 76 cm päässä olevat anturit tuottavat ajourista laskettavien tunnuslukujen mittaustiedon. Päällysteen pituussuuntaisen epätasaisuuden eniten käytetyt tunnusluvut ovat neljännesautomallilla oikeasta ajourasta simuloidut IRI_{100} ja sen katkaistu versio IRI_4 . Tunnuslukujen laskentaperiaatteet on määritetty tarkemmin päällysteiden palvelutasomittaukset 2013–2018 mittausurakan sopimusasiakirjoissa.

Lyhytaaltoisinta epätasaisuutta on makrokarkeus, jonka aallonpituusalue on standardin mukaan 0,5–50 mm. Se kuvaa lyhytaaltoista epätasaisuutta pinnan ja renkaan kosketuspinnassa. Sillä on todettu olevan vaikutusta meluun, kitkaan ja vierintävastukseen.

Aallonpituusalueen mukaan seuraava tunnusluku on megakarkeus, jonka aallonpituus on standardin mukaan 50–500 mm. Se tuntuu ajoneuvossa lyhytaaltoisena tärinänä ja vaikuttaa mm. jousitusjärjestelmän nivelten kestävyYTEEN. Aallonpituusalueeltaan siitä ylöspäin olevat tunnusluvut kuvaavat kaikki varsinaista epätasaisuutta. IRI perinteisenä on perustunnusluku ja eri aallonpituusalueille tuotetut RMS-tunnusluvut vastaavasti kukin aallonpituusalueensa mukaisesti. Kaikki tasaisuuteen liittyvät tunnusluvut tuotetaan molemmista ajourista ja osa myös ajourien välistä kaistan keskeltä. Laskentapituutena on 100 m. Tässä työssä IRI on kuitenkin laskettu 10 m laskentavälillä.

Taulukko 2. Päällysten palvelutasomittauksissa tuotettavat tasaisuustunnusluvut (21 kpl).

Tunnusluku	Aallonpituus- alue	Vasen ura	Urien väli	Oikea ura
Makrokarkeus (MPD)	0,5–50 mm	MPD vasen	MPD keski	MPD oikea
Makrokarkeus (RMS)	0,5–50 mm	Makro vasen	Makro keski	Makro oikea
Megakarkeus (RMS)	50–500 mm	Mega vasen	Mega keski	Mega oikea
IRI ₁₀₀	0,5–30 m	IRI vasen	-	IRI oikea
IRI ₄	0,5–4 m	-	-	IRI ₄ oikea
RMS 1	0,5–1 m	RMS 1 vasen	-	RMS 1 oikea
RMS 3	1–3 m	RMS 3 vasen	-	RMS 3 oikea
RMS 10	3–10 m	RMS 10 vasen	-	RMS 10 oikea
RMS 30	10–30 m	RMS 30 vasen	-	RMS 30 oikea
Pituuskaltevuus	-	Oikean ja vasemman uran kohdalta yhteisvaikutuksena		

Tasaisuustunnuslukujen toistettavuudet ovat toistokorrelaatioina välillä 90–99% (Taulukko 3). Muilla toistokorrelaatiot ovat yli 97 % paitsi lyhytaaltoisella RMS1-tunnusluvulla, jolla se on alhaisempi. Kokonaisvaihteluun suhteutettu mittausepävarmuus on kaikilla tunnusluvuilla alle 30 % mikä vastaa luokittelutarkkuutena 5 tai enemmän.

Taulukko 3. Tasaisuustunnuslukujen mittausten tyypillisiä toistettavuuksia [7].

Tunnusluku	Yks.	Aallonpituusalue	Toistokorrelaatio (%)	Mittausepävarmuus (%)
RMS_Mikrokarkeus	mm	0,1-0,5 mm	-	-
RMS_Makrokarkeus	mm	0,5-50 mm	98	20
MPD_Makrokarkeus	mm	0,5-20 mm	98	20
RMS_Megakarkeus	mm	50-500 mm	97	20
RMS1	mm	0,5-1 m	90	30
RMS3	mm	1-3 m	97	20
IRI	mm/m	0,5-30 m	99	10-15
RMS10	mm	3-10 m	99	10
RMS30	mm	10-30 m	99	10
Pituuskaltevuus	%		99	10

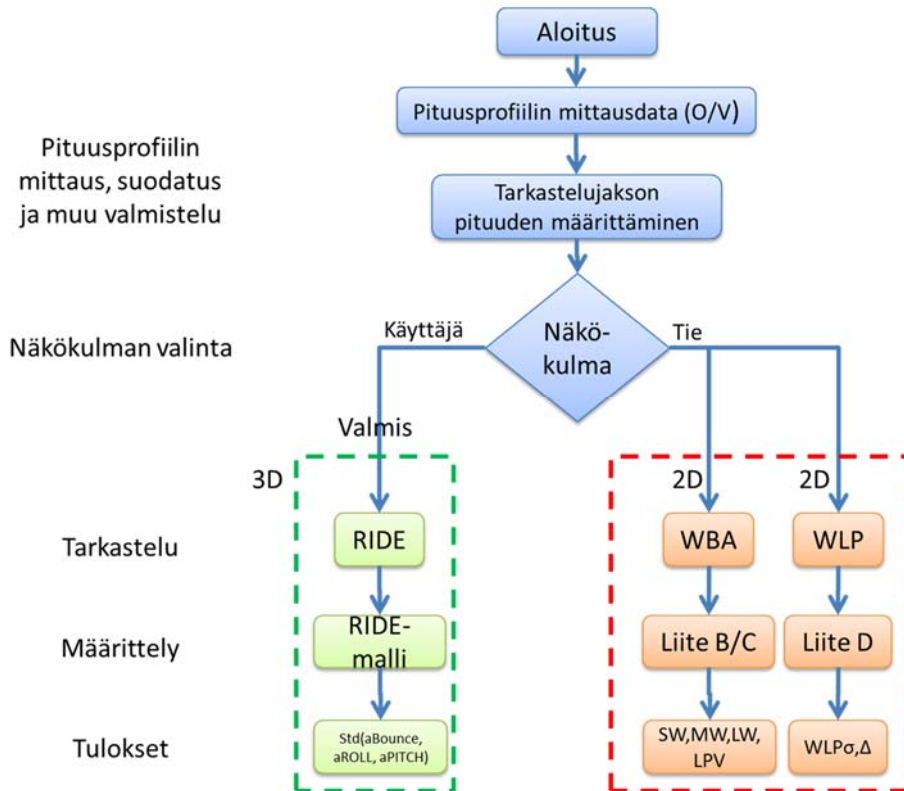
2.2.2 Uudet tunnusluvut

Pituusprofiilista tuotettavat tunnusluvut voidaan jakaa karkeasti kahteen eri ryhmään sen mukaan tuotetaanko ne suoraan tien pinnasta saadusta mittaustiedosta vai tiellä liikkuvan ajoneuvon simuloituista liikkeistä (Kuva 7). Tien pinnasta tuotettavat tunnusluvut ovat eräänlaisia aallonpituusanalyysijä, joissa pinnan profiili käsitellään tietyn pituisina jaksoina erilaisten suodattimien kautta. Tällaisia ovat mm. Wave Band Analysis (WBA) ja Weighted Longitudinal Profile (WLP). Ajoneuvosimulointien tuottamat tunnusluvut ovat puolestaan simuloinnissa käytettävän ajoneuvon liikkeistä saatavia vasteita, kun ajoneuvo liikkuu mitattua pituusprofiilia pitkin. Tällaisia ovat erilaiset neljännes-, puoli- tai täysautomalleilla simuloitujen vasteet. Perinteinen tasaisuustunnusluku, IRI, on simuloitu neljännesautomallilla. Tässä työssä tehdyt muut simuloinnit on tehty ns. RIDE-täysautomallilla (kuorma-auto). Ajoneuvosimuloinneissa ajourien pituusprofiileina käytetään noin 50 cm leveältä alueelta mitattuja pituusprofiileja (5 kpl).

Kummatkin aallonpituusanalyysit (WBA ja LWP) on kuvattu standardiluonnoksessa prEN 13036-5:2006 liitteissä C/D ja E. WBA ja LWP ovat joidenkin maiden ehdotuksia standardiin. Standardi ei käsittele varsinaisesti niitä, mutta niiden määrittelyt on laitettu sen liitteisiin. RIDE-ajoneuvomalli on kuvattu julkaisussa ”*Tien epätasaisuustunnusluvun kehittäminen. RIDE-ajoneuvomalli. Liikenneviraston selvityksiä 46/2016*” [6]. Julkaisussa on kuvattu ajoneuvomalli, tyyppiajoneuvot sekä laskettavat tunnusluvut. Tunnuslukujen raja-arvojen validointi on tätä työtä tehtäessä vielä kesken.

Tien epätasaisuutta kuvaavia tunnuslukuja laskettaessa lähdetään liikkeelle tiheällä välillä tuotetuista mittauksista. Yleensä käsitellään jompaakumpaa ajouraa, useimmiten oikeaa, mutta ajoneuvosimuloinneissa simuloitaessa täysautomalleilla käytetään molempien ajourien profiilia. Aallonpituusanalyysit tuottavat nimensä mukaisesti tunnuslukuja tien profiilista erilaisten suodatusten kautta ja ne kohdistuvat pinnan profiiliin ottamatta kantaa siihen minkälaisella tiellä ajaminen ajoneuvossa voi tuntua. Simuloinnit puolestaan tuottavat tunnuslukuja simuloitun ajoneuvon liikkeistä ja ne kohdistuvat enemmän siihen miltä ajaminen tiellä tuntuu. Osa simuloituista tunnusluvuista liittyy juuri ajomukavuuteen ja osa itse ajoneuvon tai tien rasiin. Simuloinneissa mielenkiinto kohdistuu koettavaan ajomukavuuteen, mutta siinä on kuitenkin muistettava, että tunnuslukujen laskennassa käytettävä ajoneuvomalli on yksinkertaistettu ja vakioitu. Todellisuudessa liikenteessä olevien ajoneuvojen ajo-ominaisuudet ja käyttäytyminen vaihtelevat ajoneuvosta ja sen iästä riippuen.

Tunnuslukujen laskemiseen liittyy keskeisesti profiilin suodatus ja tarkastelupituuden valinta. Profiilista suodatetaan yleensä mäkisyyskomponentti pois (vaikka se saattaa olla merkittävä tekijä ajoneuvosimuloinneissa). Mäkisyyden suodatusta on käsitelty lähteessä [6].



Kuva 7. Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden analysointimenetelmiä Liitteiden B-D viittaukset standardiehdotukseen prEN 13036-5:2014 (E).

2.2.2.1 Aallonpituusanalyysi

Aallonpituusanalyysiä varten profiili jaetaan aallonpituusalueisiin seuraavan kuvan mukaisesti. Aallonpituusalueet on valittu siten, että ne kuvaavat ajomukavuuteen vaikuttavia erilaisia ominaisuuksia. Kuvan osat tarkoittavat seuraavia asioita:

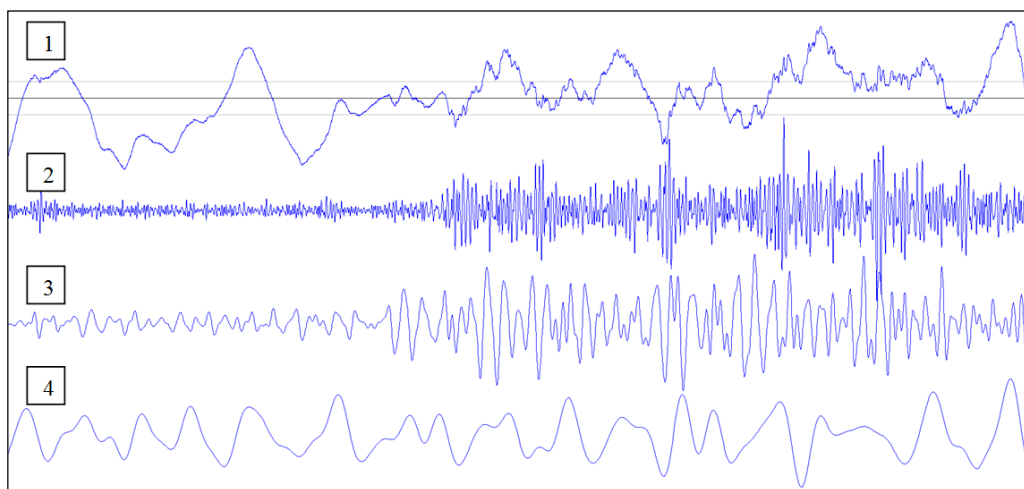
- esiprosessoitu profiili (1)
- lyhytaaltainen profiili (2)
- keskipitkäaaltainen profiili (3)
- pitkäaaltainen profiili (4)

Aallonpituustarkastelusta syntyy kuusi tunnuslukua, jotka ovat taulukon mukaisesti kahden erilaisen tarkastelun tunnusluvut kolmelle eri aallonpituusalueelle (Taulukko 4). WBA_SW-MW-LW tunnusluvut kuvaavat kullekin aallonpituusalueelle ja raportointiväleille laskettuja profiilin pystysuuntaisia RMS-arvoja millimetreinä. Niiden tarkempi määrittely on tehty julkaisun [9] liitteessä C.

WBA-LPx-tunnusluvut ovat kullekin aallonpituusalueelle ja raportointiväleille laskettuja pystysuuntaisen profiilin variansseja millimetreinä. Niiden tarkempi määrittely on tehty julkaisun [9] liitteessä D. Tunnusluvut eivät ole kovin yleisesti käytössä. Eniten niitä on käytetty Ranskassa ja Englannissa [10].

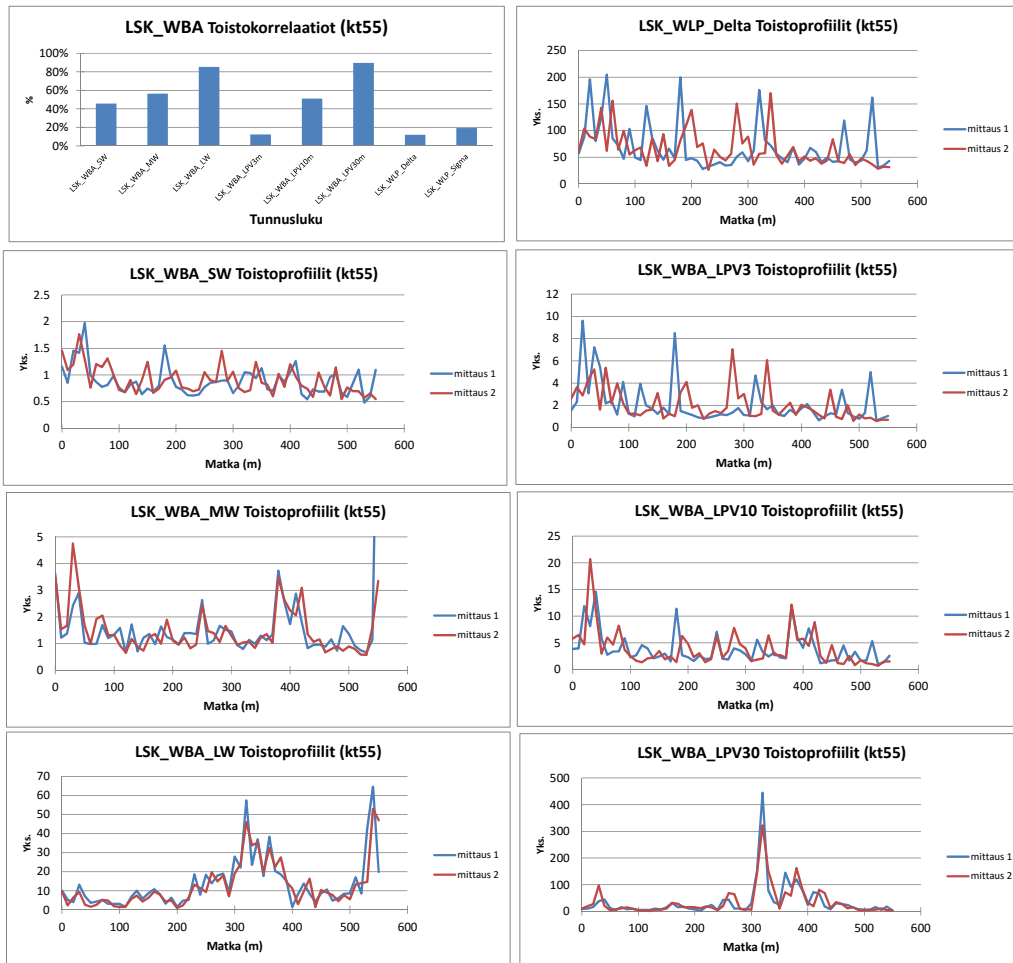
Taulukko 4. Aallonpituusanalyysin tunnusluvut [9].

Aallonpituus- alue	Tunnusluvut			
	Yksikkö	Tunnusluku	Yksikkö	Tunnusluku
Lyhyt- aaltoinen alue	mm	WBA_SW	mm	WBA_LPV3
Keskipitkä- aaltoinen alue	mm	WBA_MW	mm	WBA_LPV10
Pitkä- aaltoinen alue	mm	WBA_LW	mm	WBA_LPV30



Kuva 8. Esimerkki yhden signaalin pilkkomisesta aallonpituuden mukaan eri alueisiin.

Tässä työssä oli tarkoitus käyttää sekä perinteisellä palvelutasomittarilla tuotetusta mittaustiedosta laskettuja tunnuslukuja että laserkeilauksella tuotetun mittaustiedon perusteella laskettuja tunnuslukuja. Laserkeilauksen toistomittauksista tuotettujen aallonpituusanalyysien toistettavuudet osoittautuivat kuitenkin niin huonoiksi, ettei sitä otettu käyttöön (Kuva 9).



Kuva 9. Aallonpituusanalysien toistokorrelaatiot ja -profiilit laserskannatusta mittausdatasta.

2.2.2.2 Painotettu pituusprofiili

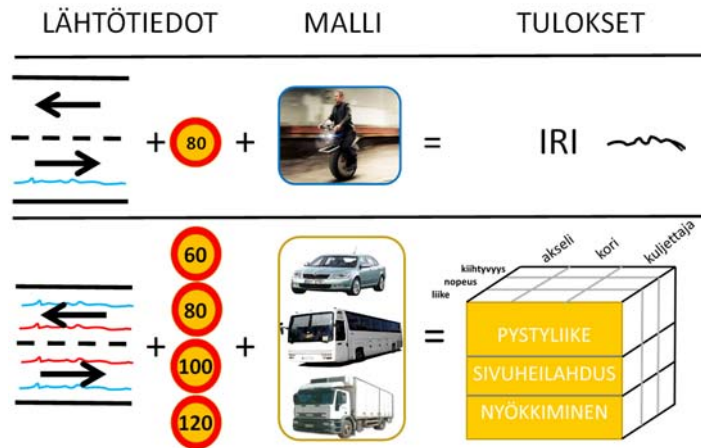
Painotettu pituusprofiili on tuotettu mitatusta pituusprofiilista useiden erilaisten muunnosten ja suodatusten kautta lähteen [9] liitteen E mukaisesti. Siitä syntyy kaksi tunnuslukua, jotka ovat käsitellyn profiilin vaihtelualue ja sen keskihajonta millimetreinä. Sen käyttö on melko harvinaista. Sitä on käytetty mm. Saksassa ja Itävallassa [10].

2.2.3 Ajoneuvosimulointi

Ajoneuvosimulointi täysautomallilla poikkeaa IRI-simuloinnista monella tavalla (Kuva 10). Kun IRI-malliin syötetään vain yhtä pituusprofiilia vakionopeudella 80 km/h, niin RIDE-malliin syötetään kummankin ajouran profiilia (kaikille pyörille) sillä vakionopeudella, joka on kullekin tielle sen nopeusrajoituksen perusteella ominaista. Kuorma-automallissa nopeuteen vaikuttaa myös sen ajoneuvo kohtainen rajoitus.

IRI-mallissa simuloidaan vain yhden pyörän aiheuttamaa pystyliikettä. RIDE-mallissa simuloidaan korin kolmen eri liikesuunnan kaikkia liikekomponentteja. Liikesuuntia ovat pystyliike (z-akselin suunnassa), sivuheilahdusliike (x-akselin ympäri) ja nyökkimisliike (y-akselin ympäri). Korin liikkeiden lisäksi voidaan simuloida myös akselin ja kuljettajan liikkeitä.

RIDE-mallissa on kolme liikekomponenttia: liike, liikenopeus ja liikekiihtyvyys. Kustakin liikekomponentista tuotetaan keskiarvo, keskihajonta ja maksimiarvo valitulle raportointivälille (oletuksena 10 m). Tässä työssä käsiteltiin liikekiihtyvyyksien keskihajontoja, koska niiden selektiivisyys epämukavien kohtien tunnistamisessa on todettu parhaaksi [6].



Kuva 10. RIDE-mallin ja IRI-mallin periaatteelliset erot [6].

Lähteessä [2] selvitettiin erilaisten ajoneuvomallien ominaisuuksia ja laskennan vasteaikoja ja päädyttiin suosittelemaan D-mallia, joka on suhteellisen yksinkertainen kaksiakselisen ajoneuvon 7 vapausasteen täysajoneuvomalli (Taulukko 5). Se on parametrien osalta helposti ylläpidettävissä ja se mahdollistaa melko nopeat laskennat. Samalla se kuitenkin tarjoaa useampien liikesuuntien vasteita kuin yksinkertaisemmat mallit ja tarjoaa siten monipuolisemman kuvan ajomukavuuteen vaikuttavista tekijöistä.

Taulukko 5. Erilaisia ajoneuvomallien vaihtoehtoja (RIDE-malli = D-malli) [2].

			Malli						
			A	B	C	D	E	F	G
			1 pyörä	1 akseli	Puoli-ajoneuvo	Koko ajoneuvo	Koko ajoneuvo	Koko ajoneuvo	Yhdistelmä ajoneuvo
Vapausasteet (DOF)			2	4	4	7	14	33	100+
Herätteet Vasteet	Pituusprofiili	Oikea	x	x	x	x	x	x	x
		Vasen	x	x	x	x	x	x	x
	Geometria	Vaaka	-	-	-	-	x	x	x
		Pysty	-	-	-	-	x	x	x
Pystysuunnan liikkeet	S_z, V_z, a_z	2z	3z	3z	5z	5z	5z	nz	
Vaakasuunnan liikkeet	S_{xy}, V_{xy}, a_{xy}	-	-	-	-	xy	xy	nxy	
Nyökkimisliike	Pitch	-	-	Pitch _y	Pitch _y	Pitch _y	Pitch _y	Pitch _y	
Heilahdusliike	Roll	-	Roll _x	-	Roll _x	Roll _x	Roll _x	Roll _x	
Kierähdysliike	Yaw	-	-	-	-	Yaw _z	Yaw _z	Yaw _z	
Normaalivoimat	F_z	F_{eo}	F_{eo-ev}	F_{eo-to}	$F_{eo-to-ev-tv}$	$F_{eo-to-ev-tv}$	$F_{eo-to-ev-tv}$	$F_{eo-to-ev-tv}$	
Tie-rengaskontakti	F_x, F_y, M_z	-	-	-	-	F_x, F_y, M_z	F_x, F_y, M_z	F_x, F_y, M_z	

RIDE-mallin tunnusluvuista liikekiihtyvyyksien hajonnat ja yhdistetyn kiihtyvyyden RMS ovat parhaita (Taulukko 6). Kiihtyvyyksikomponentti korreloi parhaiten ajoneuvossa olijan tuntemaan ajomukavuuden kanssa ja eri liikekomponentit ottavat huomioon erilaisia epätasaisuuksia. RIDE-mallin tunnusluvut korvaavat siten IRI-mallin tunnusluvussa olevat puutteet [6].

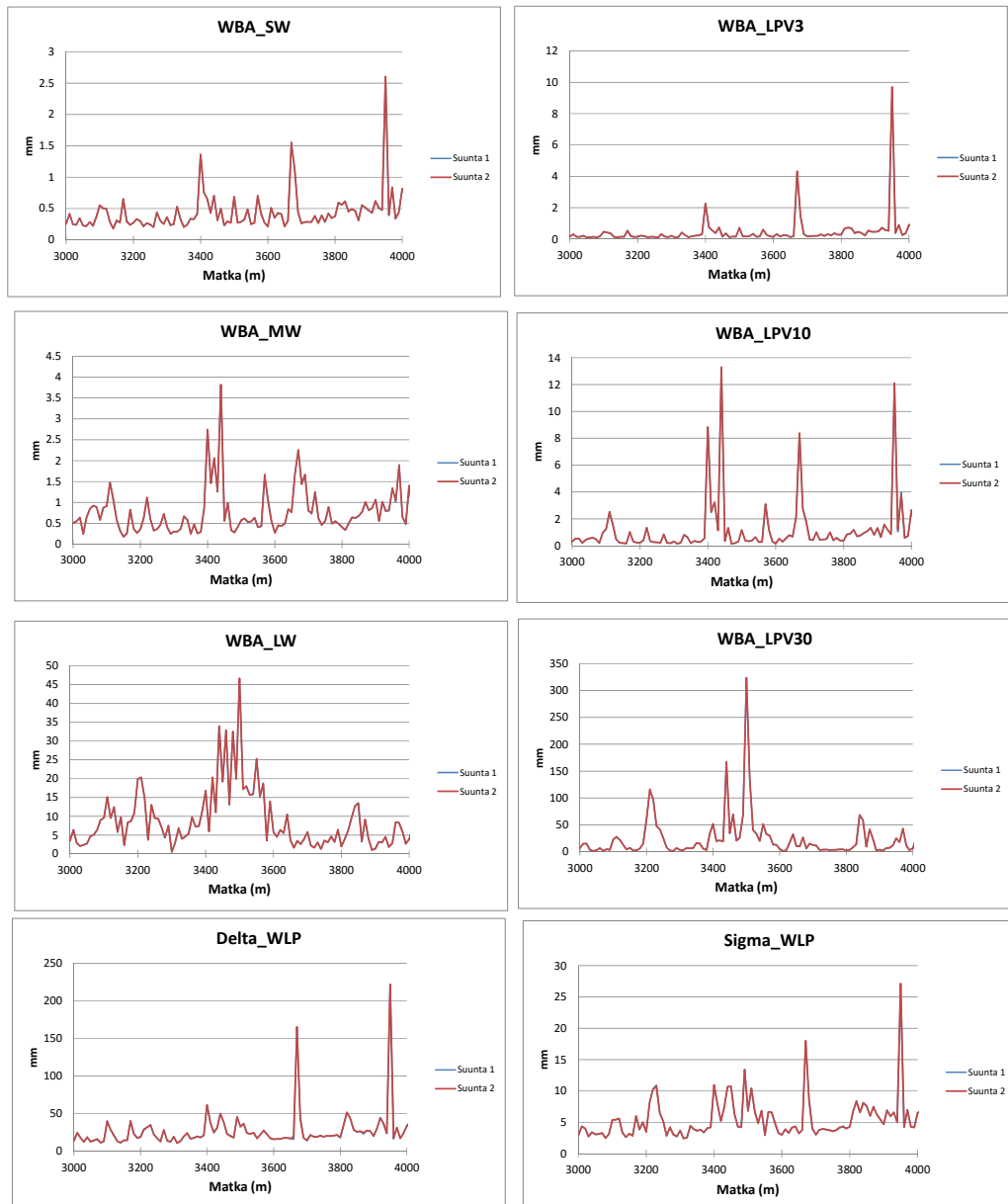
Taulukko 6. RIDE-mallilla tuotettujen tunnuslukujen käyttökelpoisuus [6].

Vaste	Tunnus	Keskiarvo	Hajonta	Maksimiarvo
ajoneuvon korin pystyliike	VERT_s	huomioi epätasaisuutta, muttei sen haitallisuutta	paikallistaa ongelmakohtia hiukan paremmin kuin keskiarvo	paikallistaa suuret poikkeamat
ajoneuvon korin pystyliikenopeus	VERT_v	huomioi epätasaisuutta, mutta saa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja ja on vaikea mieltää	paikallistaa suuria pystyliikenopeuksia paremmin kuin keskiarvo	paikallistaa suuret pystynopeuden kohdat
ajoneuvon korin pystyliikekiikkyvyys	VERT_a	huomioi epätasaisuutta ja sen haitallisuutta, mutta saa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja ja on vaikea mieltää	huomioi epätasaisuutta ja sen haitallisuutta ja paikallistaa ne hyvin	paikallistaa suuret pystykiikkyvyyskohdat
ajoneuvon korin sivuttaishäilähduskulma	ROLL_s	huomioi poikittaista epätasaisuutta, mutta saa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja ja on vaikea mieltää	paikallistaa sivusuuntaiset heilumisen muuttumiskohdat	paikallistaa suuret sivuhäilähduskohdat
ajoneuvon korin sivuttaishäilähduskulmanopeus	ROLL_v	huomioi poikittaista epätasaisuutta, mutta saa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja ja on vaikea mieltää	paikallistaa sivusuuntaisen heilumisen nopeuksien muuttumiskohdat	paikallistaa suuret sivuhäilähduskulmanopeudet
ajoneuvon korin sivuttaishäilähduskulmakiikkyvyys	ROLL_a	huomioi poikittaista epätasaisuutta ja sen haitallisuutta, mutta saa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja ja on vaikea mieltää	huomioi poikittaista epätasaisuutta ja sen haitallisuutta ja paikallistaa ne hyvin	paikallistaa suuret sivuhäilähduskiikkyvyyskohdat
ajoneuvon korin nyökkimisliike	PITCH_s	huomioi epätasaisuutta, mutta saa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja ja on vaikea mieltää	paikallistaa nyökkimisliikkeen muuttumiskohdat	paikallistaa suuret nyökkimisliikkeet
ajoneuvon korin nyökkimiskulmanopeus	PITCH_v	huomioi epätasaisuutta, mutta saa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja ja on vaikea mieltää	paikallistaa nyökkimiskulmanopeuksien muuttumiskohdat	paikallistaa suuret nyökkimiskulmanopeudet
ajoneuvon korin nyökkimiskulmakiihtyvyys	PITCH_a	huomioi epätasaisuutta ja sen haitallisuutta, mutta saa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja ja on vaikea mieltää	huomioi pituussuuntaista epätasaisuutta ja sen haitallisuutta ja paikallistaa ne hyvin	paikallistaa suuret ja haitalliset pituussuuntaiset epätasaisuudet
ajoneuvon pyöräpainon siirtymä	LTR	huomioi epätasaisuutta ja varsinkin sivuhäilähduksiä	paikallistaa sivusuuntaisen epätasaisuuden muuttumiskohdat	paikallistaa sivusuuntaisen epätasaisuuden suuret arvot
ajoneuvon aiheuttama tierasitus	ESAL	huomioi varsinkin pituussuuntaista epätasaisuutta	paikallistaa tierasituksen muuttumiskohdat	paikallistaa tierasituksen suuret kohdat
ajoneuvon iskuvaimentimien tekemä työ	Ityö	huomioi erittäin hyvin kaikkensuuntaista epätasaisuutta ja sen haitallisuutta ja paikallistaa ne hyvin	-	-

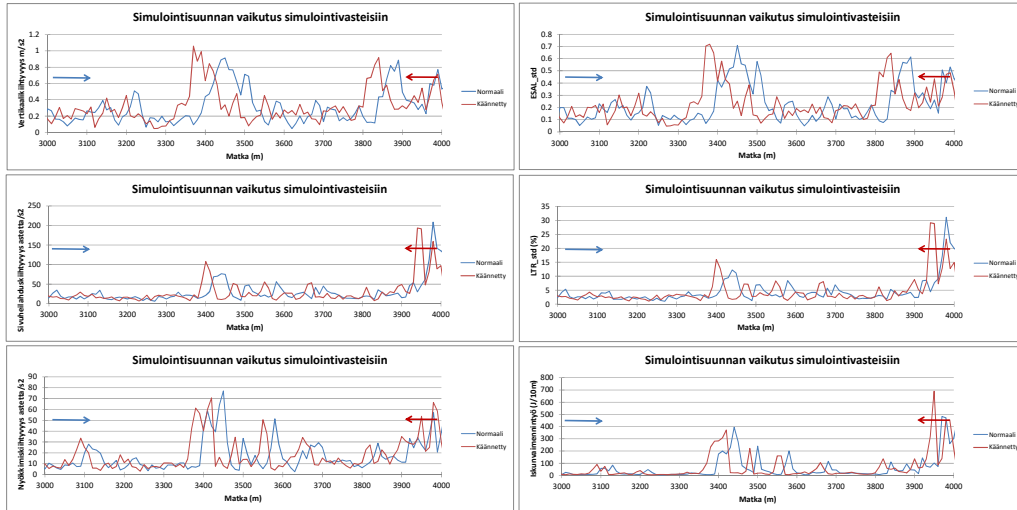
2.2.4 Laskentasuunnan vaikutus tunnuslukuihin

Suunnan vaikutusta tunnuslukuihin tutkittiin Vahijärven painumakohdan mittauksista (kt55 osa 3) syöttämällä sama pituusprofiili käänteisessä järjestyksessä laskentaan (ei siis vastakkaisen suunnan ajokaista). Aallonpituusanalyysin tunnusluvuissa laskentasuunnalla ei ollut mitään vaikutusta tunnuslukujen arvoihin (Kuva 11).

Sen sijaan laskentasuunta vaikutti RIDE-tunnuslukuihin (Kuva 12). Koska pituusprofiili oli ajoneuvon kannalta erilaista, kun samaa profiilia ajettiin vastakkaiseen suuntaan, olivat simuloinnilla saadut vasteetkin erilaisia. Itse vasteiden profiili hiukan muuttui ja sen huippukohtien suuruus ja paikka muuttuivat. Huippukohtien paikan muuttuminen riippuu simulointinopeudesta ja oli 80 km/h nopeudella noin 30 m. Muiden nopeuksien vaikutusta ei tutkittu.



Kuva 11. Aallonpituusanalyysin tunnusluvut Vahijärven painumakohdasta, kun laskentasuunta vaihtuu (mittausdata anturilta 12 vuodelta 2014).

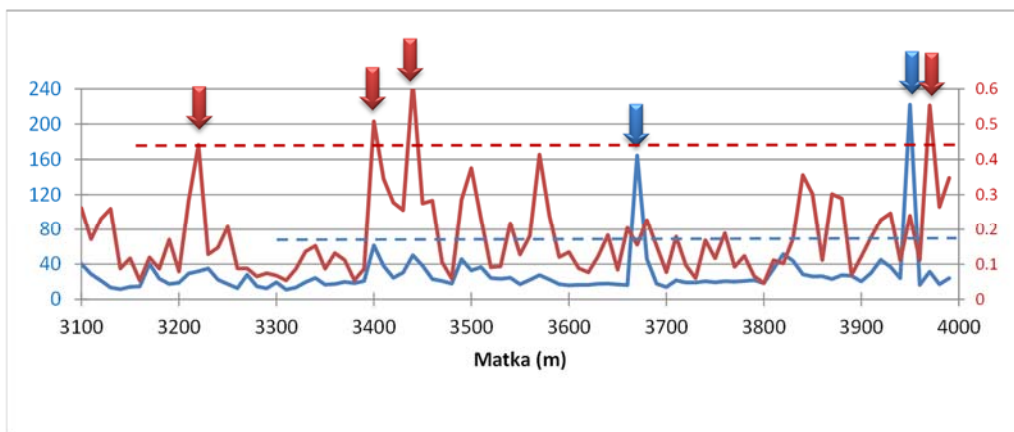


Kuva 12. RIDE-tunnusluvut Vahijärven painumakohtasta, kun laskentasuunta vaihtuu (mittausdata anturilta 12 vuodelta 2014).

2.3 Tunnuslukujen analysointi

2.3.1 Graafinen analysointi

Tunnuslukujen graafinen analyysi on graafisten kuvien tarkastelua ja johtopäätösten tekemistä niistä (Kuva 13). Koska työssä ei ollut käytettävissä eri tasaisuustyyppisiä edustavien kohtien tarkkoja kuvauksia eikä siten tarkkoja paikkatietoja, oli tunnuslukuja ja niiden käyttökelpoisuutta tarkasteltava visuaalisesti. Visuaalinen tarkastelu ei ole kovin tarkkaa ja sen tulokset ovat siten suuntaa antavia. Sen pääasiallinen anti olikin tehdä uudet tunnusluvut ja niiden arvoalueet tutuksi ja luoda pohjaa jatko-tarkasteluille.



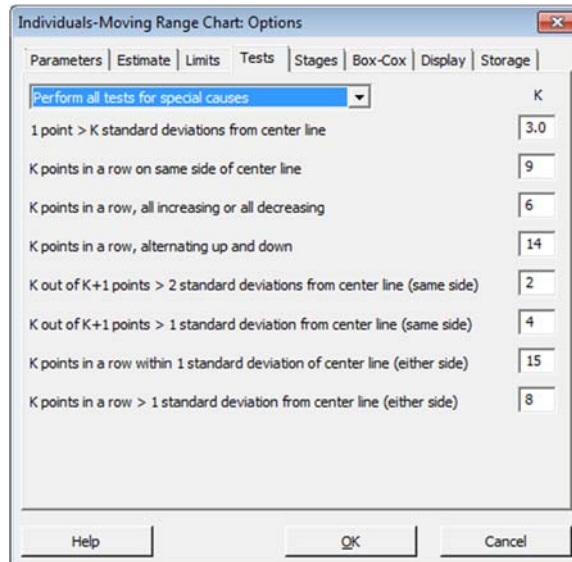
Kuva 13. Esimerkki tunnuslukujen graafisesta tarkastelusta. Tunnuslukujen avulla löytyy poikkeavia kohtia. Erilaiset tunnusluvut löytävät erilaista poikkeavuutta.

2.3.2 Prosessinohjauskortit

Tilastolliset prosessinohjauskortit ovat tapa tarkastella yhtä tunnuslukua kerrallaan ja erotella sen erityisyyistä johtuva vaihtelu satunnaisesta vaihtelusta. Tien pinta ajatellaan prosessin tuottaman tuotteen laatuominaisuudeksi, jonka tulisi olla mahdollisimman vakaata. Ts. sen tulisi olla vapaata erityisyyistä johtuvasta vaihtelusta. Kun siinä sitten on erityisyyistä johtuvaa vaihtelua, jonkin tyyppin epätasaisuutta, niin se löydetään prosessinohjauksen menetelmin. Tilastollisen prosessinohjauksen menetelmissä on tyypillisesti kahdeksan kriteeriä, jolla erityisvaihtelua tunnistetaan (Kuva 14). Eniten käytetty kriteeri on ensimmäinen kriteeri, joka tarkastelee sitä, mitkä yksittäiset havainnot poikkeavat keskiarvosta enemmän kuin kolmen keskihajonnan verran. Kuvassa 15 nämä arvot näkyvät punaisena pisteenä, joiden vieressä on koodi 1.

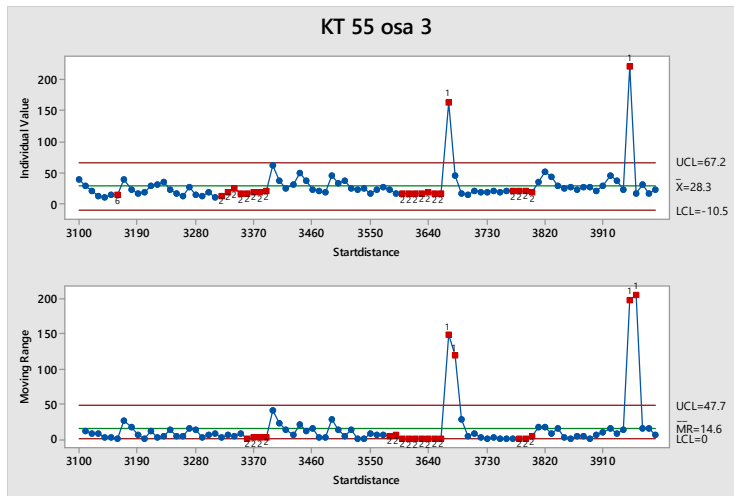
Seuraava kriteeri 2 tutkii, onko prosessissa yli 9 tai useampi toistuva arvo samalla puolella keskiarvoon nähden peräkkäin. Jos on, niin piste tulostuu kuvaan punaisella täpällä, jonka vieressä on koodi 2 jne.

Samalla tavalla testataan kaikki halutut kriteerit. Tilastollisissa ohjelmissa on mahdollisuus muuttaa kriteerien perusteita asettamalla omat kriteerit. Jos tarkasteltava prosessi ja sen stabiilin tilan tunnusmerkit tunnetaan hyvin, niin näin voidaan menetellä. Tässä tapauksessa prosessia ei tunneta niin hyvin, eikä kriteerejä muutettu. Kriteerien käyttöä jopa yksinkertaistettiin siten, että muut paitsi kriteeri 1 jätettiin käyttämättä. Ykköskriteeri on tyypillisesti se ensimmäinen, jonka avulla prosessia kannattaa tarkastella.



Kuva 14. Erityisvaihtelun tunnistamisen kriteerit prosessinohjauksessa [8].

Se mitä ohjauskortti kertoo, on tunnusluvun keskiarvo ja sen satunnaisen vaihtelun sallitut rajat. Rajoja käytetään erityisyyistä johtuvan vaihtelun tunnistamiseen. Tunnusluvun tyypillinen keskiarvo esimerkin tapauksessa on 28,3 ja sen ala- ja ylärajat -10,5 ja 67,2. Koska tunnusluvun vaihtelu on ei-normaalialia ja sitä rajoittaa nolla-arvo, ei negatiivista raja-arvoa käytetä. Ohjausrajana käytetään siten vain yläohjausrajaa, joka on 67,2. Vastaavasti alemman kuvan muutosta kuvaavassa tilanteessa keskiarvo on 14,6 ja yläohjausraja 47,7. Erityisyyistä johtuvaa kriteerin 1 mukaista vaihtelua on esimerkin mukaan kohdissa 3670 ja 3950 m. Kyseinen tunnusluku tunnisti jonkun tiessä olleen poikkeavuuden.



Kuva 15. Esimerkki erityisistä johtuvan vaihtelun tunnistamisesta tilastollisen prosessinohjauksen avulla. Yläkuvassa tunnusluvun keskiarvo, kriteerin 1 vaihtelun rajat ja tunnusluvun arvot ja alakuvassa tunnusluvun muutokselle samat tiedot.

2.3.3 Monimuuttujamenetelmät

Monimuuttujamenetelmiä käytetään mm. seuraaviin tarkoituksiin:

- pelkistää muuttujiltaan laajan aineiston antamaa informaatiota
- luoda yleiskatsaus tarkasteltavaan ilmiöön
- löytää selittävien muuttujien kombinaatio, joka mahdollisimman hyvin ennustaa selitettävän muuttujan arvoja (esim. usean muuttujan regressioanalyysi)
- yhdistää muuttujia ryhmiin, joiden sisällä käyttäytyminen on samanlaista, mutta ryhmien välillä on eroa (esim. faktorianalyysi)

Monimuuttujamenetelmät voidaan ryhmittää esim. seuraavassa taulukossa esitetyn mukaisesti (Taulukko 7).

Taulukko 7. Monimuuttujamenetelmät.

Menetelmä	Käyttö
Monisuuntainen varianssianalyysi	Selittäminen
Korrelaatiot	Selittäminen
Regressioanalyysi	Selittäminen
Pääkomponenttianalyysi	Muuttujien ryhmittely korreloimattomiin ryppäisiin, perusteena muuttujien vaihtelun selittäminen
Faktorianalyysi	Korreloivien muuttujien ryhmittely ryppäisiin, jotka yleensä myös korreloivat
Ryhmittelyanalyysi (klusterianalyysi)	Tapausten ryhmittely, typologisointi, tyyppi-jako, luokittelu-peruste tuntematon
Erotteluanalyysi	Tunnettujen ryhmien vertailu, luokitteluperuste tunnettu
Monisuuntainen skaalaus	Rakenteen eli ”kartan” löytäminen etäisyyden mittaamisen perusteella
Kanoninen korrelaatio	Kahden ryhmän välisen suhteen tarkastelu

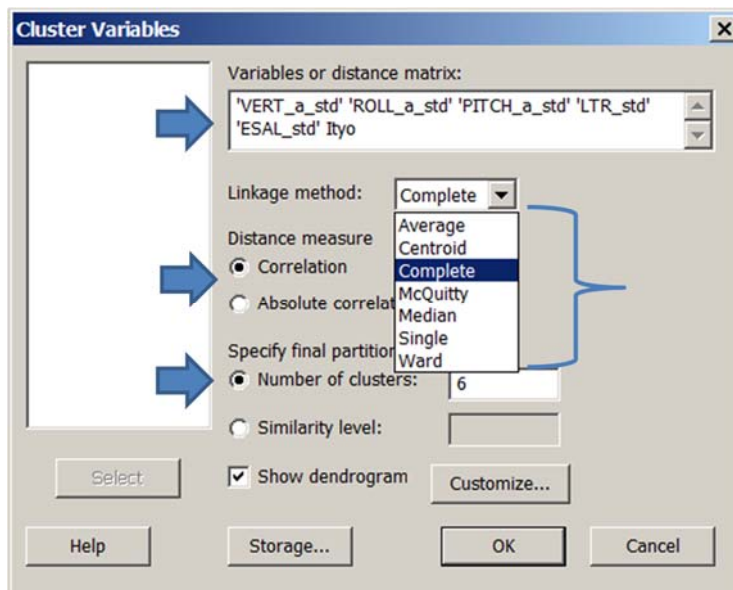
Tien kunnan tarkasteluissa käyttökelpoisia monimuuttuja-analyysejä ovat mm. ryhmittelyanalyysi ja pääkomponenttiansalyysi. Ryhmittelyanalyysin eli klusterianalyysin avulla etsitään aineistosta erilaisia profiileja ennalta tuntemattomissa ryhmissä. Tavoitteena on siis identifioida tapausjoukosta tietyn muuttujajoukon suhteen samankaltaisia ryhmiä. Muuttujien tulisi olla keskenään korreloimattomia. Lisäksi ryhmittelyn perusteena olevat muuttujat tulisivat olla kvantitatiivisia ja mitattuna samalla asteikolla.

Ryhmittelyanalyysi pyrkii ryhmittelemään joko *havaintoja* (kymmenmetriset) tai *muuttujia* (tasaisuuden tunnusluvut) mahdollisimman samankaltaisiin ryhmiin (klustereihin). Vastaavan tyyppisiä analyysejä ovat erotteluanalyysi (discriminant analysis, DA) ja luokitteluanalyysi (classification analysis, CA). Ryhmittelyanalyysia voidaan verrata myös faktorianalyysiin, mutta ilman latentin piirteen oletusta. Normaali faktorianalyysi ryhmittelee muuttujia, mutta on myös olemassa ns. Q-faktorointi, jossa havaintomatriisi on käännetty ja pyritäänkin ryhmittelemään vastaajia latentin piirteen mukaisiin faktoreihin.

Ryhmittelyanalyysissä ryhmittely voidaan tehdä joko tarkastelemalla havaintoja (rivit) tai tarkastelemalla sekä havaintoja (rivit) että muuttujia (sarakkeet). Havaintojen perusteella tehtävä ryhmittelyanalyysi on *K Means Cluster Analysis* ja havaintojen ja muuttujien perusteella tehtävä ryhmittelyanalyysi on *Hierarchical Cluster Analysis*. Tässä työssä käytettiin jälkimmäistä (Kuva 16).

Tien pituussuuntaisesta tasaisuudesta on käytettävissä useita erilaisia tunnuslukuja. Tunnusluvut poikkeavat toisistaan mm. aallonpituusalueen suhteen. Osa tunnusluvuista perustuu suoraan pituusprofiiliin ja osa välillisesti esimerkiksi simuloinnin kautta. Ongelmana on, ettei tunnuslukujen käyttökelpoisuusjärjestystä tiedetä. Kohteiden joukossa on erilaisia epätasaisuustyyppisiä sisältäviä kohtia, joita ei ole tarkkaan luokiteltu eikä paikallistettu. Epätasaisuustyyppit edustavat ikään kuin eri dimensioita, joiden suhteen tien tasaisuutta tulisi tarkastella. Ongelmaksi muodostuu niiden suuri määrä sekä se, ettei tiedetä mitkä niistä kuvaavat samoja asioita.

Monimuuttujamenetelmistä käytettiin tässä työssä ryhmittelyanalyysiä, jolla haluttiin toisaalta erotella erilaiset tunnusluvut toisistaan eri ryhmiin ja toisaalta löytää samantyyppiset tunnusluvut yhteen. Ryhmittelyanalyysin tekemisessä oli aluksi määritettävä muuttujat ja annettava joitain parametreja. Analyysi tarjoaa monipuolisen mahdollisuuden tarkastella asiaa. Tässä työssä käytettiin perusparametreja sen enempää tutkimatta, miten eri parametrivaihtoehdot olisivat vaikuttaneet. Muuttujien lisäksi analyysissä kysyttiin linkkausmenetelmää, etäisyyden mittaustapaa ja ryhmien lukumäärää. Linkkaustavaksi valittiin oletusarvo eli *Complete*, etäisyyden mittaamiseen valittiin *korrelaatio* ja ryhmien lukumäärää vaihdeltiin.



Kuva 16. Ryhmittelyanalyysiin syötettävät parametrit [8].

Muuttujia tarkastelemaan ryhmittelyanalyysi (klusterianalyysi) syötettiin eri epätasaisuustyyppisiä sisältävien kohteiden kaikki saatavilla olevat 35 pituussuuntaista tunnuslukua. Aineistona olivat 10m havainnot valtateiltä 3, 6 ja 7, kantateiltä 50 ja 55 ja maantieltä 170. Analyysi tuotti ryhmittelyn, missä kohteiden epätasaisuutta kuvaavat tunnusluvut ryhmiteltiin samanlaista epätasaisuutta sisältäviin klustereihin. Analyysissä annettiin klusterien lukumäärä ja sen tuloksena saatiin klustereihin kuuluvat tunnusluvut. Ryhmittelyanalyysi oli siten ryhmien muodostumisen tutkimista eri klusterimäärillä.

Kun käsiteltäviksi tunnusluvuiksi valittiin kaikki saatavilla olevat tunnusluvut alkaen makrokarkeudesta päätyen mäkisyttä kuvaavaan pituusprofiiliin, todettiin, että klusterien minimimäärä oli neljä. Näiden klusterien nimet ovat *karkeus*, *pituuuskaltevuus*, *epätasaisuus* ja *mäkisyys*. (Teoreettinen maksimimäärä on tietysti tunnuslukujen määrä eli 35). Tarkastelun päätarkoitus oli tutkia tien tasaisuutta, mutta pinnan karkeus, pituuuskaltevuus ja mäkisyys pidettiin mukana skaalausta tukevinä tekijöinä.

Kun klustereiden lukumäärää kasvatettiin, tunnusluvut jakaantuivat (ryhmittyivät) hienojakoisemmin. Viides ja kuudes klusteri ryhmittelivät epätasaisuutta pienempiin ryhmiin;

- RIDE-tunnusluvut, aallonpituusanalyysien tunnusluvut sekä perinteiset PTM-RMS-tunnusluvut luokittuivat eri ryhmiin.
- IRI_{10} luokittui samaan ryhmään lyhytaaltoisten RMS-tunnuslukujen kanssa aina 15 klusteriin saakka.
- Vasen ajoura alkoi erottua oikean ajouran tunnusluvuista klusterien lukumäärän ylittäessä 11 kpl.

Epätasaisuuden ryhmittymisestä klusterianalyysissä voitiin tehdä seuraavat huomiot:

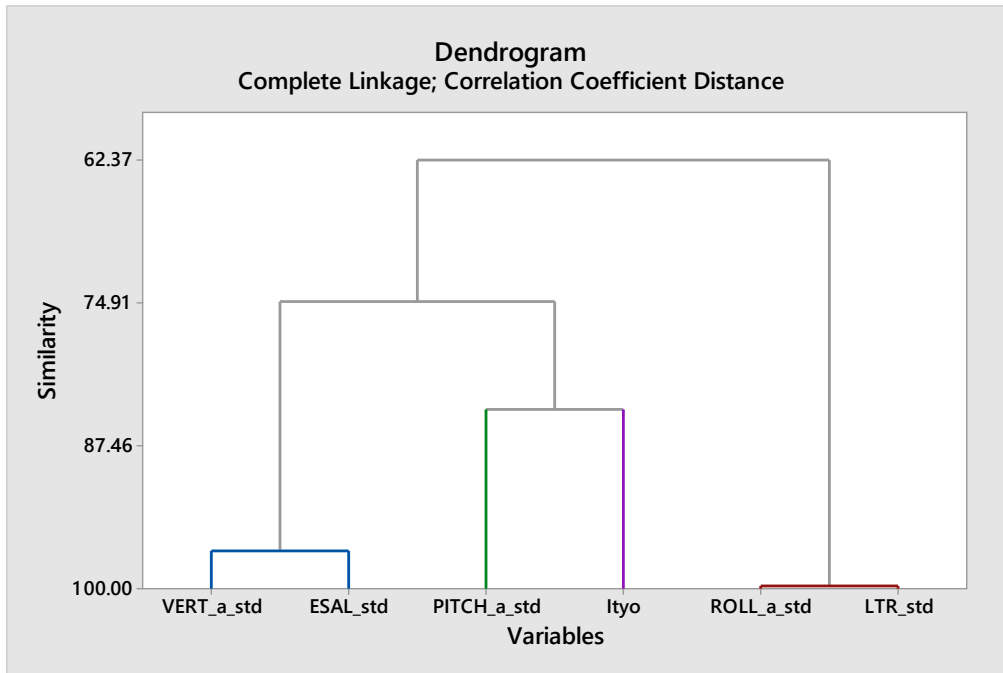
- Neljällä klusterilla kaikki epätasaisuustunnusluvut ryhmittyivät samaan *epätasaisuusklusteriin*.
- Klusterien kokonaismäärällä 15 epätasaisuus luokittui kahdeksaan klusteriin ja määrällä 20 kolmeentoista klusteriin.
- Epätasaisuuden aallonpituus määräsi tunnuslukujen järjestyksen eri klustereissa ja se pysyi samana klustereiden lukumäärien muuttuessa.

- Pitkäaaltoiset WBA-tunnusluvut (WBA_LW ja WLP_LP30) luokitteivat epätasaisuustunnusluvuista kaikkein alimmaksi (ennen korkeusprofiilia).
- Kun klusterien määrä kasvoi, niin analyysi eritteli tunnuslukuja pitkäaaltoisimmasta päästä lähtien.
- IRI₁₀-tunnusluvut (vasen ja oikea) luokitteivat samoihin klustereihin lyhytaaltoisten RMS-tunnuslukujen (RMS₁ ja RMS₃) kanssa.
- WLP-tunnusluvut (WLP_Sigma ja WLP_Delta) luokitteivat samaan klusteriin lyhytaaltoisten WBA-tunnuslukujen kanssa
- Simuloidut tunnusluvut luokitteivat aluksi keski- ja pitkäaaltoisten aallonpituuksien tunnuslukujen kanssa samaan klusteriin, mutta lopuksi omaksi klusterikseen.
- Megakarkeus luokitteuu samaan ryhmään makrokarkeuden kanssa ja saa oman ryhmän vasta klusterien lukumäärän ylittäessä 13 (vasen) tai 14 (oikea).

Ryhmittelyanalyysin mukaan tien pituussuuntaisessa profiilissa on usealla eri tunnusluvulla kuvattavia ilmiöitä. Epätasaisuus on ilmiönä pintakarkeuden ja mäkisyyden välissä. IRI-tunnusluku oli hyvin lähellä lyhytaaltoisia RMS-tunnuslukuja (RMS₁ ja RMS₃). Megakarkeus oli IRI₁₀:stä erillään oleva ilmiö, mikä tietysti oli pääteltävissä jo niiden laskentaperiaatteista.

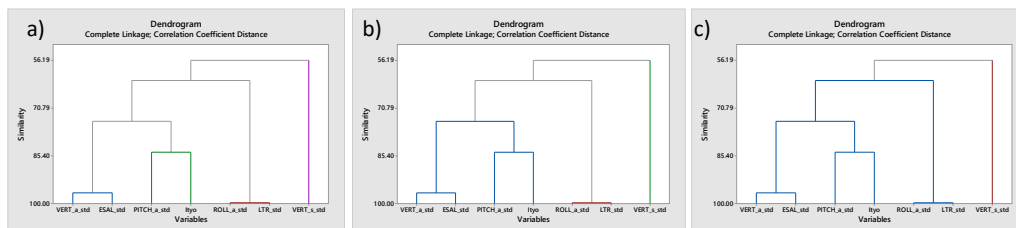
Aallonpituusanalyysien SW/MW/LW-tunnusluvut ovat hyvin lähellä LP₃/LP₁₀/LP₃₀-tunnuslukuja. SW- ja LP₃ kuvaavat lyhytaaltoista epätasaisuutta, MW- ja LP₁₀ kuvaavat keskiaaltoista epätasaisuutta ja LW- ja LP₃₀ kuvaavat pitkäaaltoista epätasaisuutta. SW/MW/LW- ja LP₃/LP₁₀/LP₃₀-tunnusluvut erottuvat PTM:n RMS-tunnusluvuista melko aikaisessa vaiheessa (jo 8 klusterilla). Ryhmittelyanalyysin eräs tulos oli, että aallonpituusanalyysien kaksi erilaista tapaa tuottaa tunnuslukuja kolmelle eri aallonpituusalueelle olivat kuitenkin melko yhtenäisiä ja toinen niistä on turha (tai riittäisi jos käytettäisiin vain jompaa kumpaa).

Ajoneuvosimuloinnin tunnusluvut olivat samassa klusterissa aina 10 klusteriin sakka, minkä jälkeen ne alkoivat erottua omiksi ryhmikseen. Tunnuslukuparit vertikaalikiikkyvyys ja tierasitus, sivuheilahduskiikkyvyys ja pyöräpainon siirtymä sekä nyökkimiskiikkyvyys ja iskunvaimennintyö pysyivät pareina aina 20 klusteriin saakka (enempää ei tarkasteltu). Ryhmittelyanalyysin toinen selkeä tulos oli, että tierasitus, pyöräpainon siirtymä ja iskunvaimennintyö ovat vertikaalikiikkyvyyden, sivuheilahduksen ja nyökkimiskiikkyvyyden vastintunnuslukuja (Kuva 17).



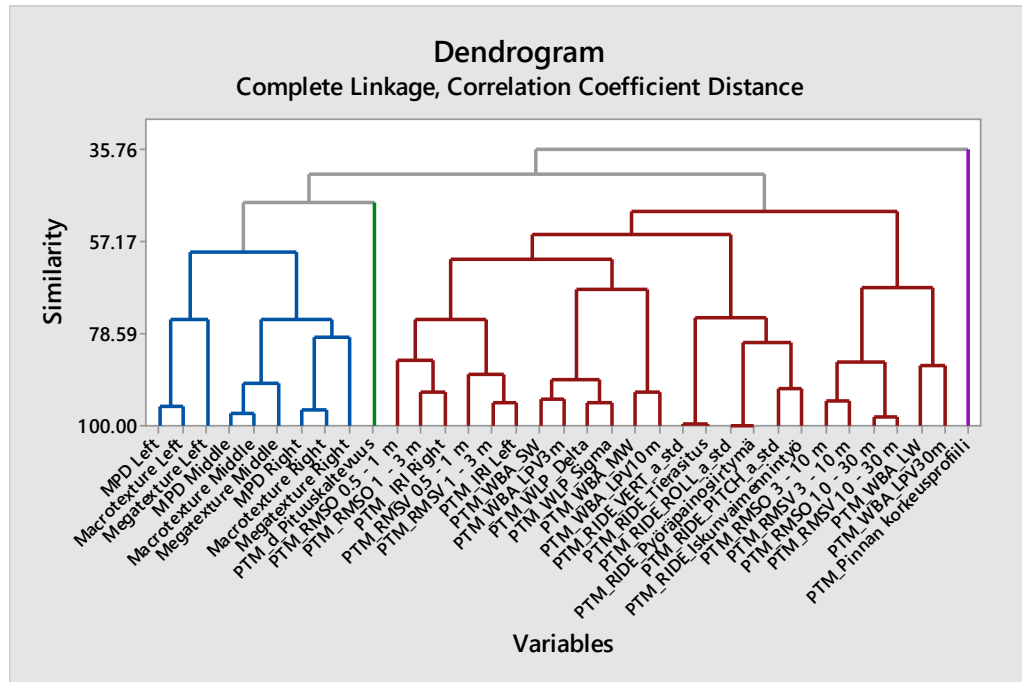
Kuva 17. Simuloitujen vasteiden vastintunnuslukujen muodostuminen, kun tarkastelussa olivat ainoastaan RIDE-tunnusluvut. Sivuheilahduskiihtyvyyden ja pyöräpainsiirtymän vastaavuus oli paras ja nyökkimiskihtyvyyden ja iskunvaimennintyön vastaavuus huonoin.

IRI-tunnusluvun perustana olevaa pystyliikkeen siirtymään pohjautuvaa tunnuslukua (VERT_s_std) ei saatu yhteen muiden simuloitujen tunnuslukujen kanssa kun seitsemää tunnuslukua pakotettiin neljään, kolmeen tai kahteen ryhmään (Kuva 18). Tämä viittaa siihen, että simuloituissa tunnusluvuissa ja IRIssä on erilaista informaatiota. Selityksenä voisi olla, että IRI-tunnuslukuna sisältää myös sellaista liikettä mikä ei ole haitallista.

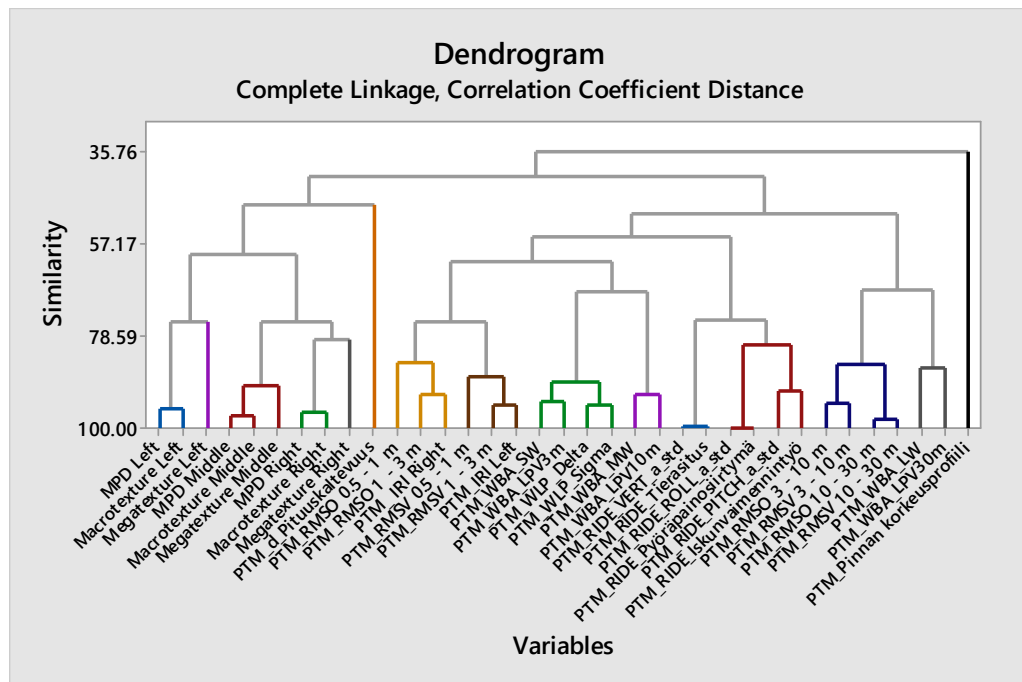


Kuva 18. Simuloitujen vasteiden vastintunnuslukujen muodostuminen kun tarkastelussa olivat ainoastaan RIDE-tunnusluvut ja IRIn perustana oleva korin vertikaaliliike (VERT_s) pakotettuna neljään (a), kolmeen (b) tai kahteen (c) ryhmään.

Ryhmittelyanalyysi tuotti tietoa tien pituussuuntaisesta epätasaisuusilmiöstä. Se ryhmitteli erilaisia tunnuslukuja yhteen ja erilleen. Sen perusteella voitiin todeta, mitkä tunnusluvut kuvasivat samaa ilmiötä ja mitkä eri ilmiötä ja tunnuslukujen lukumäärää voidaan sen perusteella jatkossa rajoittaa. Yhteenvedo klusterianalyysistä on esitetty taulukossa 8 ja kuvissa 19 ja 20.



Kuva 19. Tasaisuuden klusterianalyysi neljällä klusterilla.



Kuva 20. Tasaisuuden klusterianalyysi 15 klusterilla (alimmalla ryhmittelytasolla 15 eri väriä).

Taulukko 8. Klusterianalyysin tuottamat tunnuslukujen sijoittumiset klusterien lukumäärän ollessa välillä 4–20.

Tunnusluku	Minimiluokitus	Klusterien lukumäärä																	Hienojakoinen luokitus	
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
MPD Vasen	Karkeus	1	1										1	1	1	1	1	1	1	Vasen makrokarkeus
Macrotecture Vasen			1										2	2	2	2	2	2	2	Vasen megakarkeus
Megatecture Vasen			1										2	3	3	3	3	3	3	Keskikarkeus
MPD Keski			2										3	4	4	4	4	4	4	Oikea makrokarkeus
Macrotecture Keski			2										4	5	5	5	5	5	5	Oikea megakarkeus
Megatecture Keski			2										5	6	6	6	6	6	6	
MPD Oikea			3										6	7	7	7	7	7	7	
Macrotecture Oikea			3										7	8	8	8	8	8	8	
Megatecture Oikea	3										8	9	9	9	9	9	9			
PTM_d_Pituuskaltevuuden muutos	Pituuskaltevuuden muutos	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	5	6	6	6	6	6	6	Pituuskaltevuus	
PTM_RMSO 0.5-1 m	Epätasaisuus	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	6	7	7	8	8	8	8	Lyhytaaltainen epätasaisuus	
PTM_RMSO 1-3 m																			Oikea epätasaisuus	
PTM_IRI Oikea																				
PTM_RMSV 0.5-1m																				
PTM_RMSV 1-3m																				
PTM_IRI Vasen																				
PTM_WBA_SW																				
PTM_WBA_LP3m																				
PTM_WLP_Delta																				
PTM_WLP_Sigma																				
PTM_WBA_MW																				
PTM_WBA_LP10m																				
PTM_RIDE_VERT_a_std																				
PTM_RIDE_Tierasitus																				
PTM_RIDE_ROLL_a_std																				
PTM_RIDE_Pyöräpainsiirtymä																				
PTM_RIDE_PITCH_a_std																				
PTM_RIDE_Iskunvaimennintyö																				
PTM_RMSO 3-10m																				
PTM_RMSO-10-30m																				
PTM_RMSV 3-10m																				
PTM_RMSV 10-30m																				
PTM_WBA_LW																				
PTM_WBA_LP30m																				
PTM_Pinnan korkeus	Mäkisyys	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Mäkisyys	

3 Epätasaisuustyyppien tunnistaminen

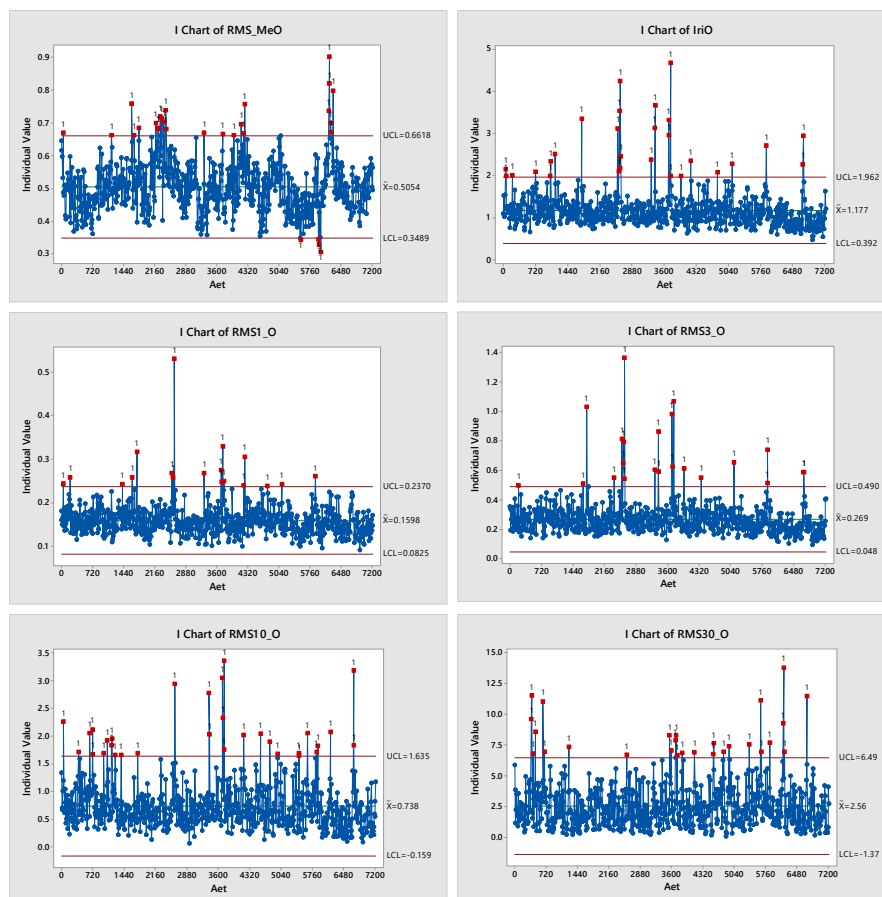
3.1 Uuden päällysteen epätasaisuus

3.1.1 PTM-tunnusluvut

Uusien päällysteiden tasaisuutta tarkasteltiin vuonna 2015 päällystettyjen ja mitattujen kohteiden avulla. Ensimmäinen kohde oli VT 1, ajorata 1, suunta 1, tieosa 7. Perinteisten PTM-tunnuslukujen SPC-analyysi on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 21). Megakarkeuden keskiarvo oli 0,5 mm ja sen poikkeuksellisen vaihtelun yläraja 0,66 mm. Poikkeavia havaintoja oli 25 kpl. IRI:n keskiarvo oli 1,18 mm/m ja sen poikkeuksellisen vaihtelun yläraja oli 1,96 mm/m. Poikkeuksellisia havaintoja oli 28 kpl.

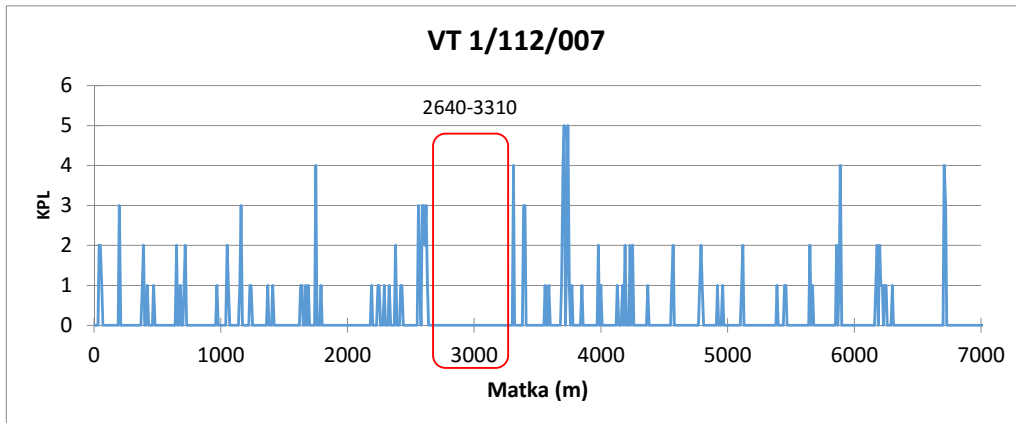
Eri aallonpituusalueille laskettujen RMS-tunnuslukujen keskiarvot olivat järjestyksessä RMS₁, RMS₃, RMS₁₀ ja RMS₃₀, 0,16 mm, 0,27 mm, 0,74 mm ja 2,56 mm ja vastaavasti poikkeuksellisen vaihtelun ylärajat 0,24 mm, 0,49 mm, 1,64 mm ja 6,5 mm. Poikkeuksellisia havaintoja oli 17 kpl, 21 kpl, 31 kpl ja 27 kpl.

Vähiten poikkeuksellisia havaintoja oli tunnusluvulla RMS₁ ja eniten tunnusluvulla RMS₁₀.



Kuva 21. Uudelle päällysteelle tyypillisiä PTM-tunnuslukuja SPC-analyysillä (VT1, tieosa 7, mittaus 31.7.2015).

Huolimatta siitä, että tarkasteltavan kohteen päällyste oli uusi, sillä havaittiin kaikilla tunnusluvuilla paljon poikkeavia arvoja. Tämä viittaa siihen, että uusikaan päällyste ei ole täysin puhdas erilaisista poikkeuksellisista arvoista. Poikkeuksellisia arvoja sisältävien kohtien pois karsimiseksi muodostettiin kuva, jossa oli kullakin kymmenmetrisellä poikkeuksellisia arvoja sisältävien (PTM) tunnuslukujen lukumäärä (Kuva 22). Se vaihteli välillä 0-5 kun maksimimäärä oli 6. Sen avulla valittiin puhdas vain normaalia vaihtelua sisältänyt osuus paaluväliltä 2640-3310. Se edusti hyvälaatuista uutta päällystettä, jossa ei ollut enää poikkeuksellista vaihtelua (muutamaa yksittäistä havaintoa lukuun ottamatta).

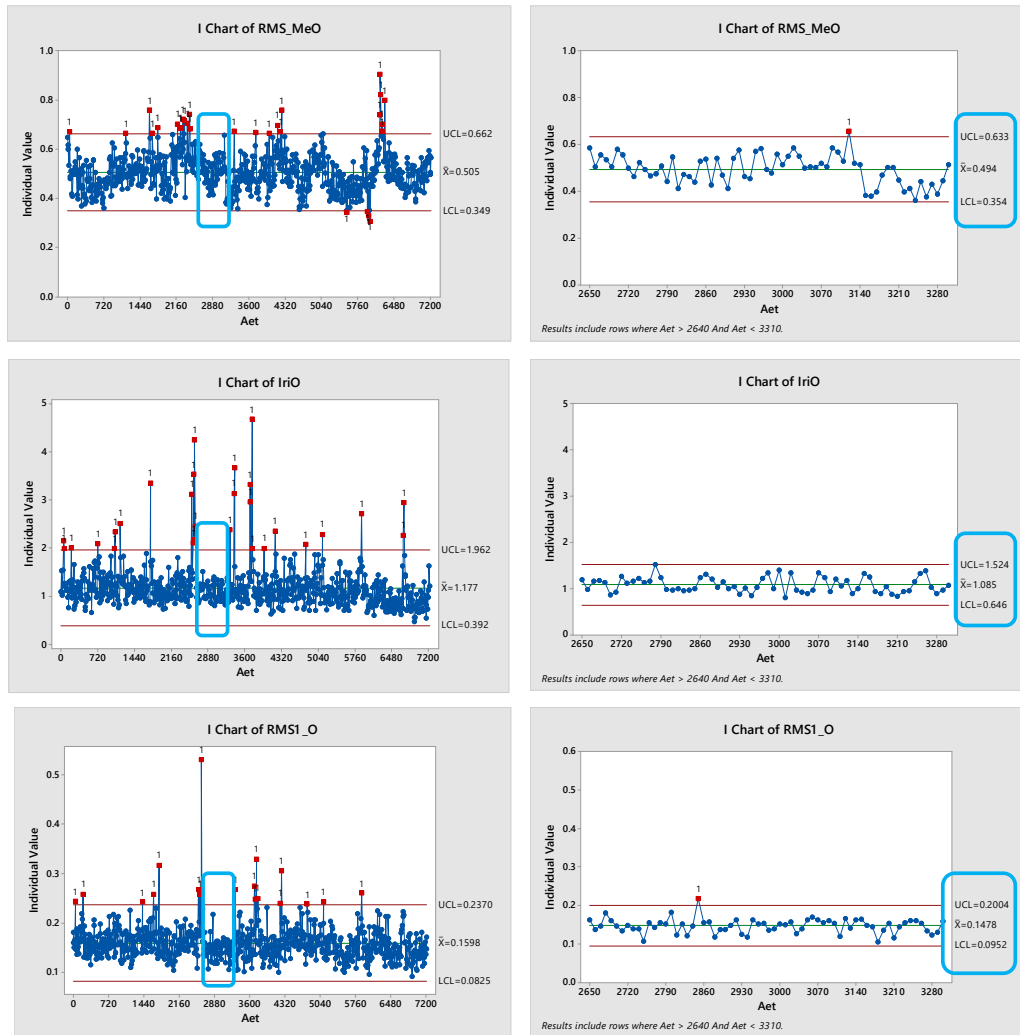


Kuva 22. Uuden päällysteen PTM-tunnuslukujen poikkeuksellisia arvoja saavien tunnuslukujen lukumäärä kullakin kymmenmetrisellä sekä ”puhdas” osuus paaluvälillä 2640–3310.

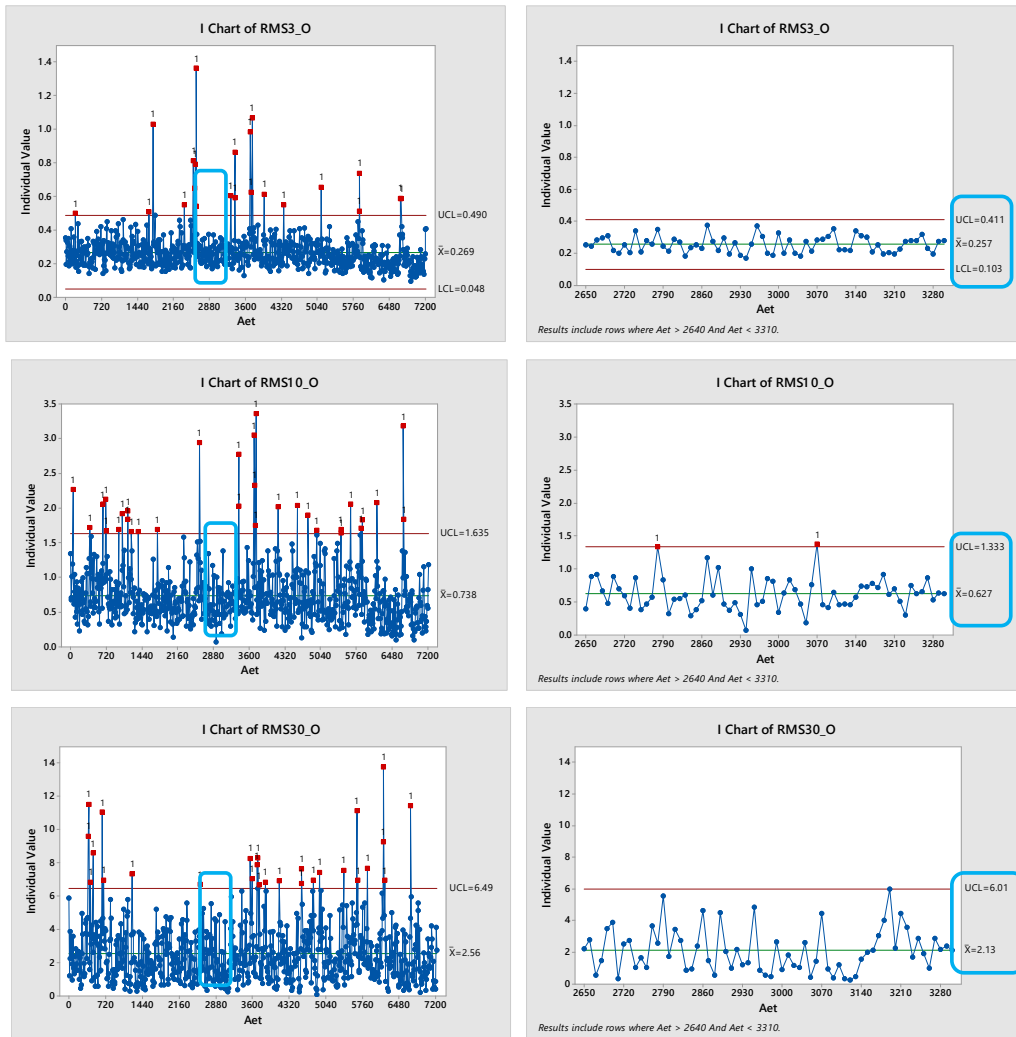
Puhtaalle vain normaalia vaihtelua sisältävälle osuudelle (2640–3310) tehtiin uusi SPC-analyysi, josta saatiin lopulliset hyvän päällysteen (stabiilin tilan) tunnusmerkit (keskiarvo ja poikkeuksellisen vaihtelun yläraja) (Kuva 23 ja Kuva 24). Tunnuslukujen vaihtelu oli nyt pääosin puhdasta normaalia vaihtelua. Hyvän päällysteen tunnusmerkit olivat siten seuraavat:

Taulukko 9. Uuden päällysteen stabiilin tilan tunnusmerkit (PTM-tunnusluvut).

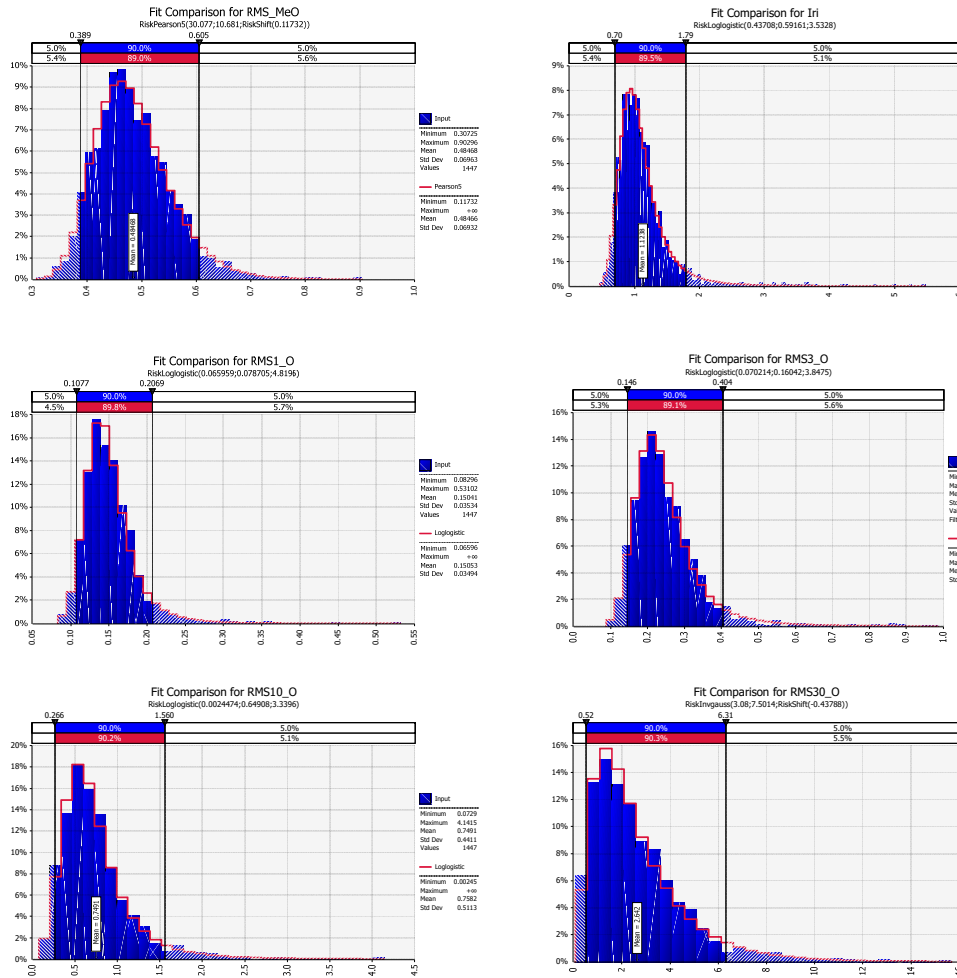
Tunnusluku	Yksikkö	Keskiarvo	Hajonta	Yläraja
Megakarkeus	mm	0,5	0,03	0,6
IRI	mm/m	1,1	0,13	1,5
RMS1	mm	0,15	0,17	0,20
RMS3	mm	0,26	0,05	0,41
RMS10	mm	0,6	0,29	1,3
RMS30	mm	2,1	1,3	6,0



Kuva 23. Uuden päällysteen megakarkeuden, IRI:n ja lyhytaaltoisen epätasaisuuden stabiili tila SPC-analyysillä (VT 1, s1, k2, osa7, mittaus 2015). Varsemmalla koko tieosa, oikealla stabiili väli 2640–3310 m.



Kuva 24. Uuden päällysteen keski- ja pitkäaaltoisten epätasaisuuksien stabiili tila SPC-analyysillä (VT 1, s1, k2, osa7, mittaus 2015). Vasemmalla koko tietosa, oikealla stabiili väli 2640-3310 m.

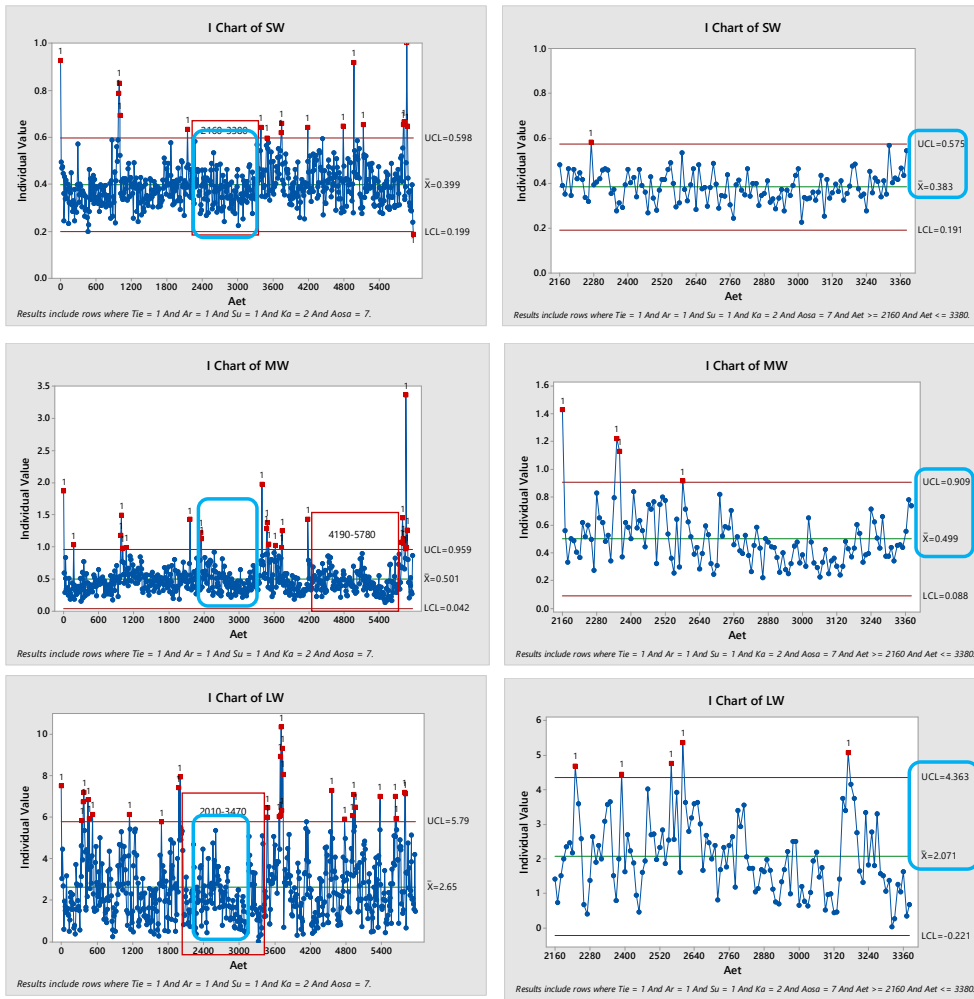


Kuva 25. Uuden päällysteen PTM-tunnuslukujen jakaumia (VT1 osa 7, mittaus 2015).

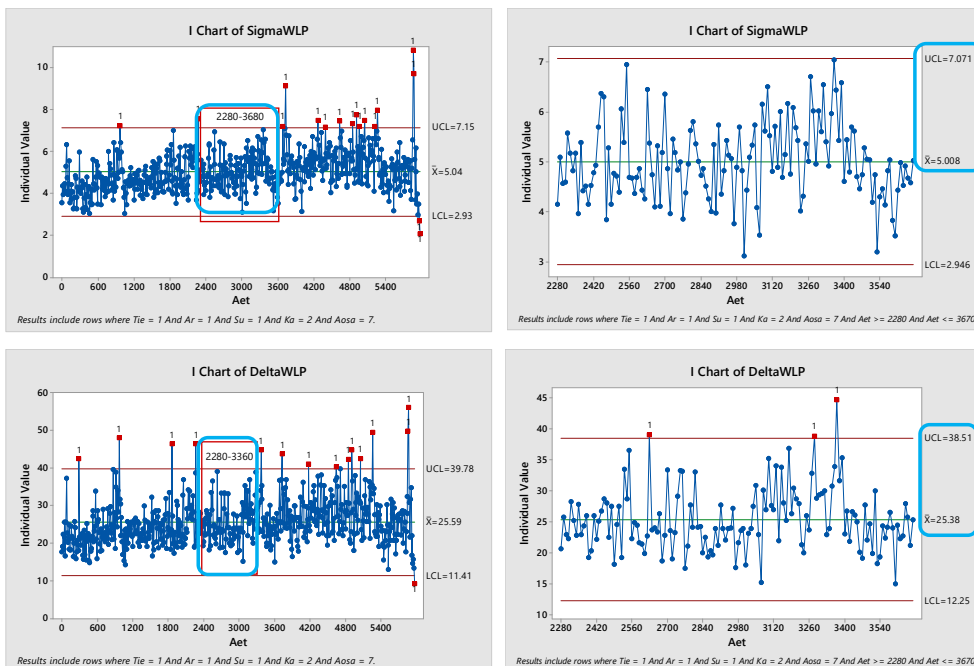
3.1.2 Aallonpituusanalyysin tunnusluvut

Aallonpituusanalyysien tunnuslukuja tarkasteltiin uudelta päällysteeltä vastaavaan tapaan kuin edellä PTM-tunnuslukuja. Kohteena oli tieosa 7 valtatieltä 1. Kymmenmetristen arvoista tehtiin SPC-kuvat, josta otettiin silmämääräisesti puhdas osuus, jota tarkasteltiin uudestaan rajattuna. Puhtaan osan keskiarvot ja vaihtelun yläraja olivat uudelle päällysteelle saatavia tyypillisiä arvoja. Lyhytaaltainen epätasaisuus (SW) oli stabiilia vaihdellen keskiarvon 0,38 ympärillä tasaisesti. Normaalin vaihtelun ylärajaksi saatiin 0,58. Keski- ja pitkäaaltoisille tunnusluvuille saatiin vastaavasti (MW) 0,50 ja 0,91 ja (LW) 2,1 ja 4,4, mutta niissä oli rajatulla alueellakin hiukan erityisvaihtelua.

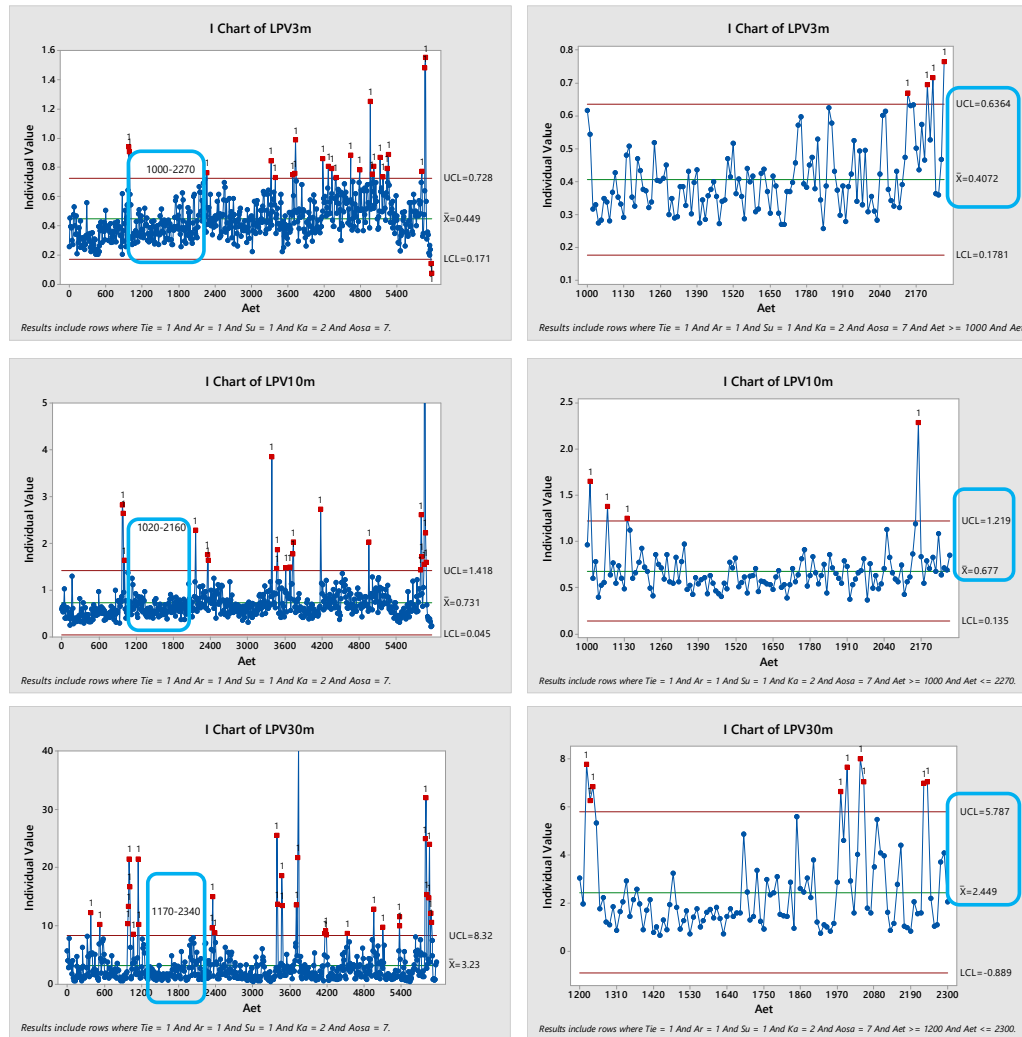
Vastaavat arvot LPV-tunnusluvuille olivat (LPV3) 0,41 ja 0,64, (LPV10) 0,67 ja 1,2 ja (LPV30) 2,4 ja 5,8. WLP-tunnusluvuille arvot olivat (SigmaWLP) 5,0 ja 7,1 ja (DeltaWLP) 25 ja 38. Yhteenveto uuden päällysteen tunnuslukujen stabiilin tilan arvoista on esitetty oheisessa taulukossa (Taulukko 10).



Kuva 26. Uudelle päällysteelle tyypillisiä aallonpituusanalyyseiden tunnuslukuja SPC-analyysillä (VT1, tieosa 7, mittaus 31.7.2015).



Kuva 27. Uudelle päällysteelle tyypillisiä aallonpituusanalyyseiden tunnuslukuja SPC-analyysillä (VT1, tieosa 7, mittaus 31.7.2015).



Kuva 28. Uudelle päällysteelle tyypillisiä aallonpituusanalyysien tunnuslukuja SPC-analysillä (VT1, tieosa 7, mittaus 31.7.2015).

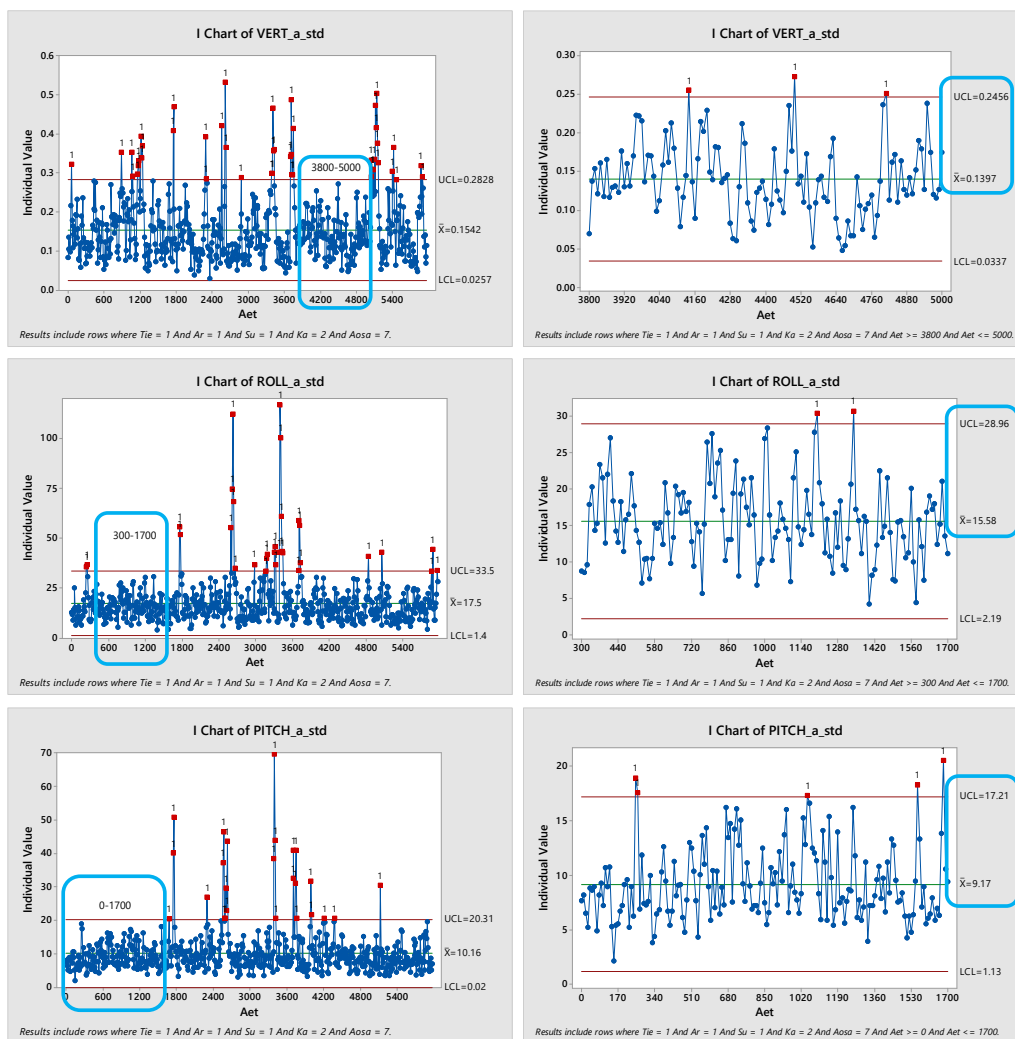
Taulukko 10. Uuden päällysteen stabiilin tilan tunnusmerkit (Aallonpituusanalyysin tunnusluvut).

Tunnusluku	Yksikkö	Keskiarvo	Hajonta	Yläraja
SW	mm	0,38	0,07	0,58
MW	mm	0,50	0,14	0,91
LW	mm	2,1	0,71	4,4
LPV3	mm	0,41	0,70	0,64
LPV10	mm	0,67	0,14	1,20
LPV30	mm	2,4	1,1	5,8
WLPDelta	mm	25,0	4,0	38,0
WLPSigma	mm	5,0	0,7	7,1

3.1.3 RIDE-tunnusluvut

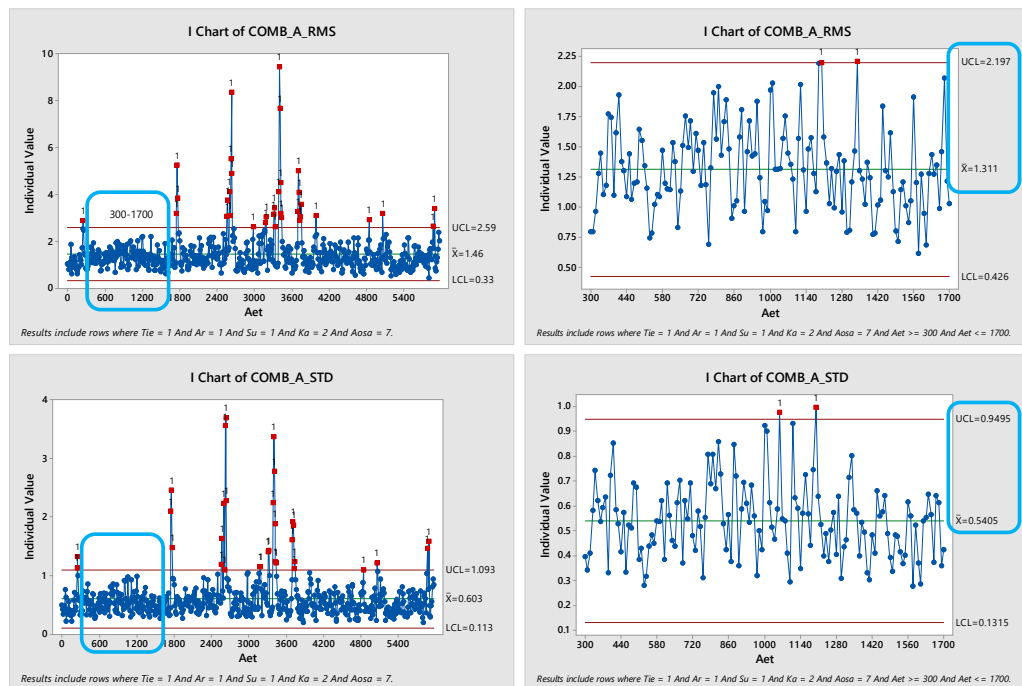
RIDE-tunnuslukujen stabiilin tilan arvoja tutkittiin valtatie 1 tieosalla 7. Stabiili tila määritettiin kuten aiemminkin rajaamalla tieosalta sellainen osuus, jossa alun perin ei ollut erityissyistä johtuvaa vaihtelua (Kuva 29) ts. tunnusluvun arvot olivat alle yläohjauksirajan (UCL). Pystykiehtyvyyden hajonnan stabiilia tilaa kuvaava keskiarvo oli 0,14 m/s² ja yläraja oli 0,25 m/s². Rajatulla alueella tuli kolme ylärajan ylittävää havaintoa.

Sivuheilahduskiehtyvyyden hajonta oli keskimäärin 15,5 astetta/s² ja sen normaalin vaihtelun yläraja 29 astetta/s². Nyökkimiskiehtyvyyden hajonnan keskiarvo oli 9 astetta/s² ja sen yläraja 17 astetta/s². Stabiilia tilaa kuvaavat raja-arvot olivat noin 10–15 % pienempiä kuin koko tieosan arvot.



Kuva 29. Uudelle päällysteelle tyypillisiä RIDE-tunnuslukuja SPC-analyysillä (VT1, tieosa 7, mittaus 31.7.2015).

RIDE-tunnusluvuista muodostettiin myös yhdistetty tunnusluku, joka oli pystykihtyvyyden ja sivuheilahdus- ja nyökkimiskihtyvyyksien yhteisvaikutusta kuvaava tunnusluku. Yhdistetylle kiihtyvyydelle muodostettiin kaksi tunnuslukuvaihtoehtoa, kiihtyvyyden hajonta (COMB_A_RMS) ja kiihtyvyyksien RMS-arvo (COMB_A_STD) (Kuva 33). RMS sai hiukan suurempia arvoja kuin hajonta, mutta tunnuslukuina ne kuvaavat samaa asiaa. Stabiilin tilan arvot uudelle päällysteelle olivat 1,3 m/s² ja 2,2 m/s² (rms) ja 0,5 m/s² ja 0,9 m/s² (std).



Kuva 30. Uudelle päällysteelle tyypillisiä RIDE-tunnuslukuja SPC-analyysillä (VT1, tieosa 7, mittaus 31.7.2015).

Taulukko 11. Uuden päällysteen stabiilin tilan tunnusmerkit (RIDE- tunnusluvut).

Tunnusluku	Yksikkö	Keskiarvo	Hajonta	Yläraja
Pystykihtyvyys std	m/s ²	0,14	0,04	0,25
Sivuheilahduskiht. std	ast/s ²	16	4	29
Nyökkimiskiht. std	ast/s ²	9	3	17
Yhdistetty kiht. std	m/s ²	0,5	0,13	0,9
Yhdistetty kiht. rms	m/s ²	1,3	0,3	2,2

3.2 Pitkäaaltoinen epätasaisuus

3.2.1 Vahijärven painumakohta

3.2.1.1 Kohteen esittely

Vahijärven painumakohta sijaitsee kantatiellä 55 tieosalla 3. Painumakohdan sijainti on tieosan alusta lukien kohdassa 3100–4100 m (Kuva 31).

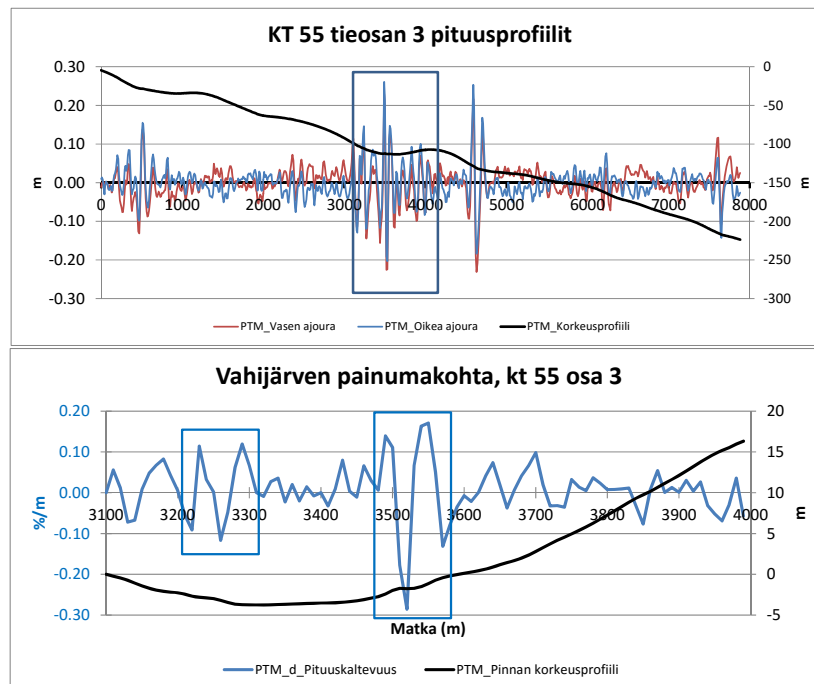


Kuva 31. Vahijärven painumakohta kantatiellä 55 tieosalla 3 kohdassa 3100.



Kuva 32. kt 55 kolmostieosalla kohdassa 4600 m.

Seuraavassa kuvasarjassa on esitetty ylämpänä kuva ja keskellä pituusprofiilit koko tieosasta sekä alempana painumakohdasta pituuskaltevuuden muutos pituusyksikköä kohti korkeusprofiilin kanssa (Kuva 33).

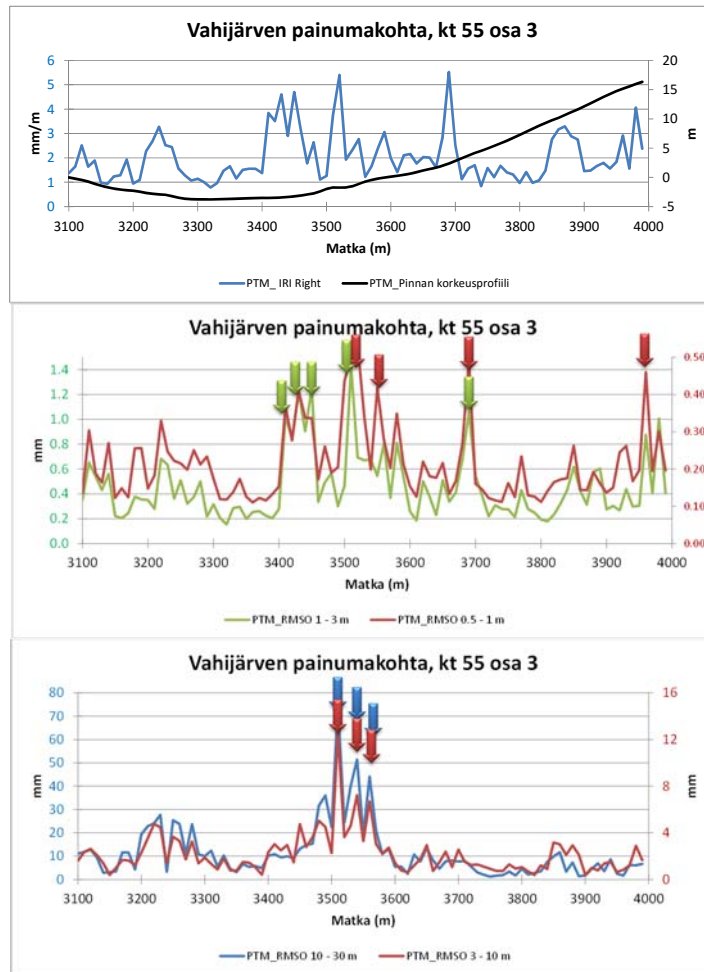


Kuva 33. Vahijärven painumakohtan profiili kantatiellä 55 tieosalla 3 (palvelutasomittaus 2015), keskellä ajourien pituusprofiilit koko tieosalla ja alempana pituuskaltevuuden muutos painumakohteella.

Etuliite PTM tunnuslukujen nimissä kuvaa sitä, että lähtötietona on käytetty palvelutasomittausta. Tieosan korkeusprofiili on laskettu pituuskaltevuuden avulla lähtien tieosan alun arvosta 0 m. Korkeusprofiili osoittaa siis korkeuden suhteessa tieosan alkuun. Painumakohta on hyvin tunnistettavissa koko tieosan pituusprofiilista. Ajourien pituusprofiileista on tunnistettavissa tavallista suurempaa vaihtelua painuman kohdalla. Pituuskaltevuuden muutos tunnistaa kaksi poikkeuksellista kohtaa, 3200–3300 m ja 3450–3600 m. Muutoksen arvot $\pm 0,10$ %/m näyttää olevan karkea raja-arvo, jolla poikkeukselliset kohdat tunnistuivat. Pituusprofiilista pystytään havaitsemaan painumakohtien alut ja loput, muttei niinkään niiden välissä olevia tasaisempia kohtia.

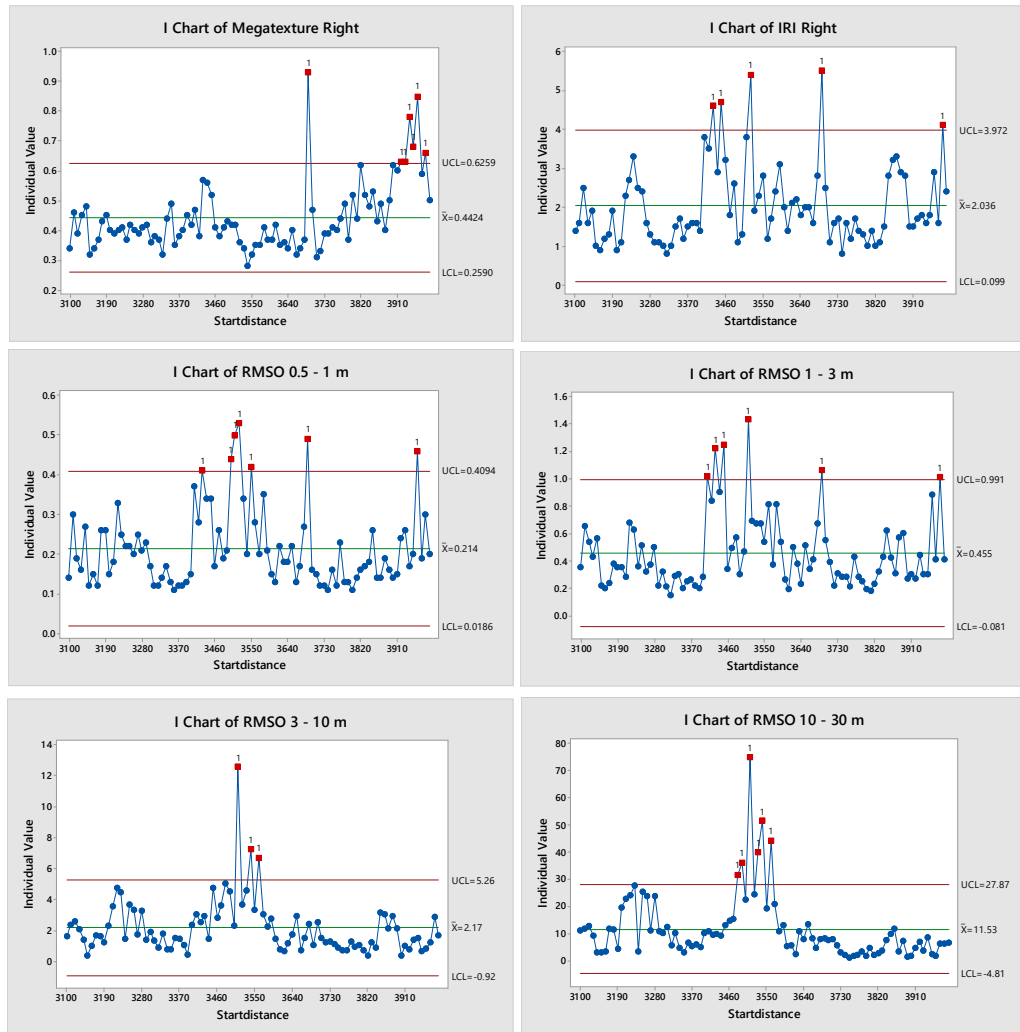
3.2.1.2 Perinteiset tunnusluvut

Perinteisten epätasaisuutta kuvaavien tunnuslukujen profiilit on esitetty seuraavassa kuvasarjassa (Kuva 34). Kymmenen metrin IRI_{10} ylemmässä kuvassa saa painumakohdassa korkeahkoja (yli 4 mm/m) arvoja. Lyhytaaltoiset RMS-tunnusluvut ($RMS_{1/0.5-1}$ m, $RMS_{3/1-3}$ m) keskimmaisessä kuvassa ja pitkäaaltoiset RMS-tunnusluvut ($RMS_{10/3-10}$ m ja $RMS_{30/10-30}$ m) alemmassa kuvassa tuottivat keskenään melko samantyyppiset profiilit ja niistä on tunnistettavissa painuman loppukohta erityisen hyvin (huom. erilaiset skaalat).



Kuva 34. Perinteisten tasaisuustunnuslukujen profiilit painumakohteella. Ylempänä IRI, keskellä lyhytaaltoiset RMS-profiilit ja alimpana pitkäaaltoiset RMS-profiilit.

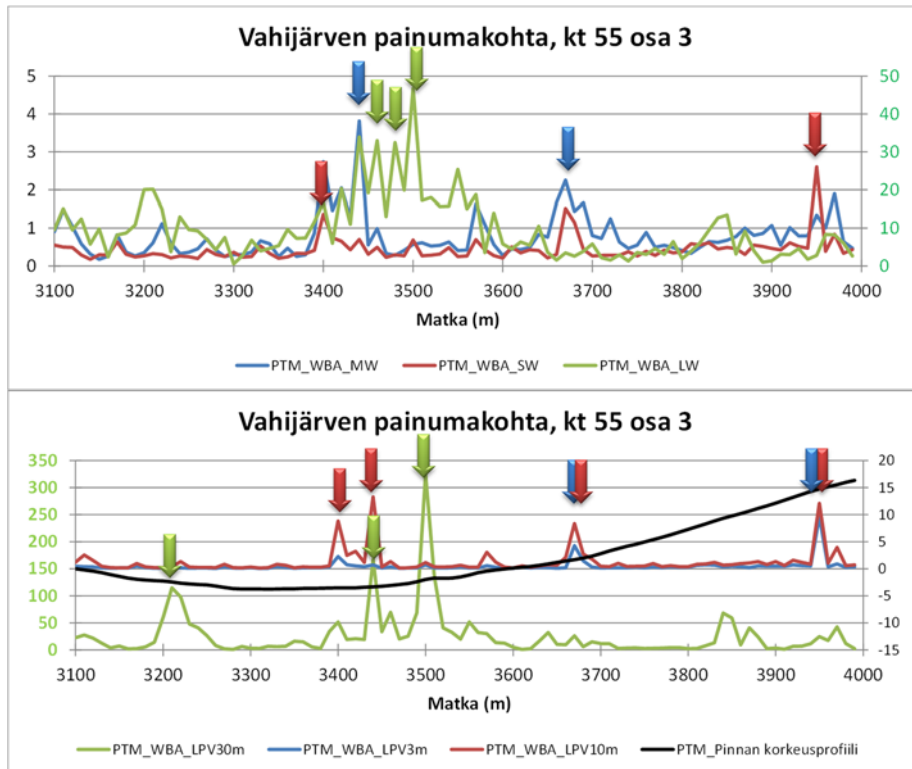
Vastaavat kuvat SPC-analyysinä on esitetty kuvassa 35, jonka mukaan painumakohta tunnistuu perinteisistä PTM-tunnusluvuista parhaiten pitkäaaltoisella RMS30-tunnusluvulla, kun sen raja-arvo on 27,9 mm (oikea alin kuva).



Kuva 35. Vahijärven painumakohta. Perinteisten tunnuslukujen SPC-analyysit.

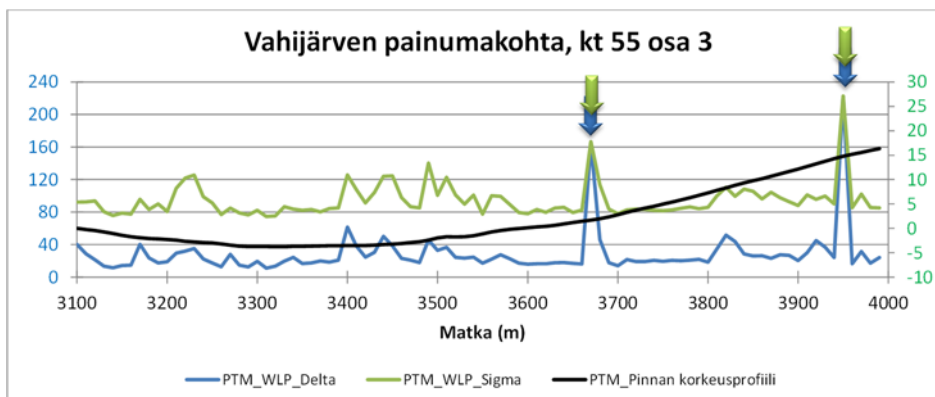
3.2.1.3 Aallonpituusanalyysin tunnusluvut

Pituusprofiilin aallonpituusanalyysi tuotti yhteensä kuusi tunnuslukua, joiden profiilit Vahijärven painumakohteesta on esitetty seuraavassa kuvassa (Kuva 36). Etuliite WBA tunnuslukujen nimissä kuvaa waveband-aallonpituusanalyysiä. Pitkäaaltoisen tunnusluvun (WBA_LW) profiili oli hyvin samanmuotoinen kuin perinteisten tunnuslukujen pitkäaaltoinen RMS30 edellisessä kuvassa, mutta se tuotti painumakohdan pitempänä (3450–3550 m). Lyhyemmistä aallonpituusalueista tuotetut (WBA_MW JA WBA_SW) löysivät yksittäisiä poikkeuksellisia kohtia.



Kuva 36. Aallonpituusanalyysin tunnuslukujen profiilin Vahijärven painumakohdassa kantatiellä 55 tieosalla 3. Ylemmässä kuvassa WBA-tunnusluvut ja alemmassa kuvassa LPV-tunnusluvut.

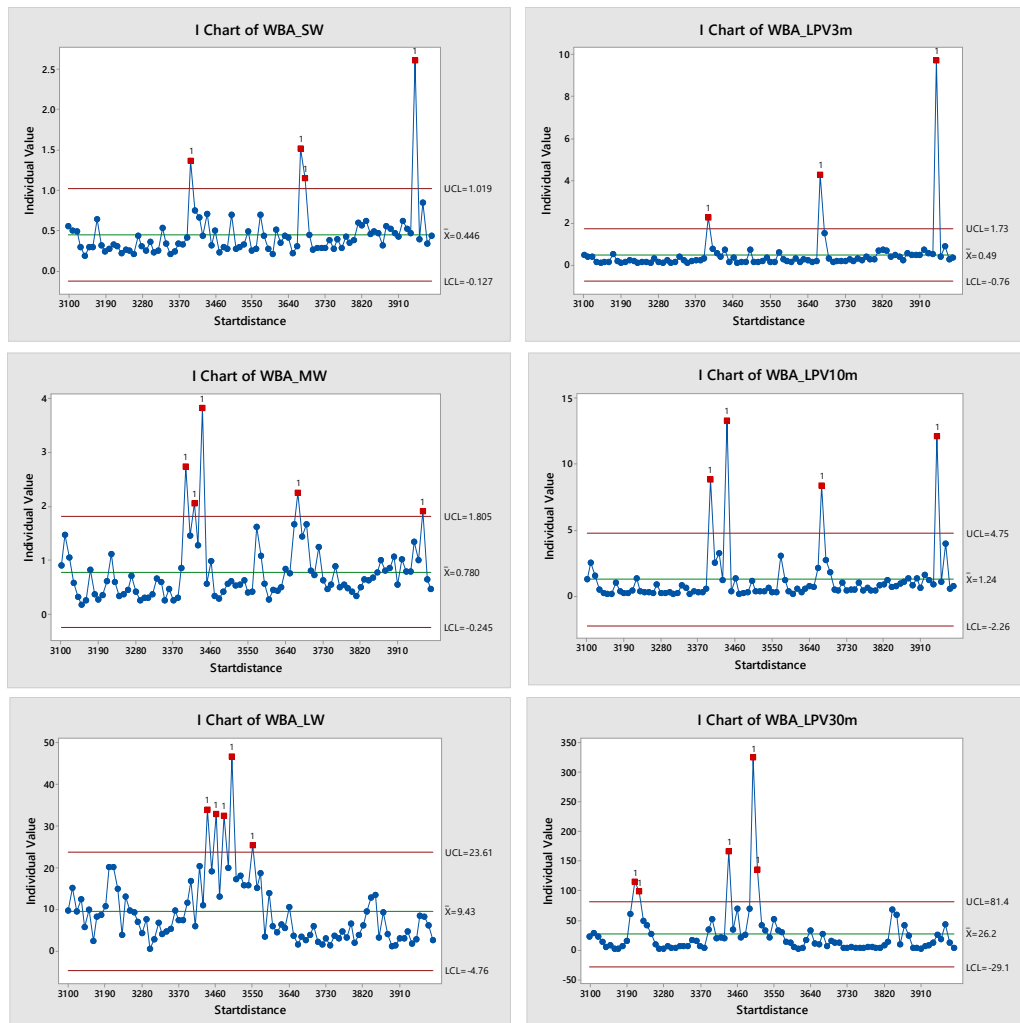
Aallonpituusanalyysin painotettu profiili tuotti tunnusluvut PTM_WLP_Delta ja PTM_WLP_Sigma (Kuva 37). Etuliitteet PTM ja WLP kuvaavat palvelutasomittausta ja WLP-analyysiä. Kumpikin tunnusluku löysi kaksi poikkeuksellista kohtaa (3670 m ja 3950 m) ja niiden profiilit olivat hyvin samanmuotoisia. Näytti siltä, että niiden tuottama informaatio oli muuten hyvin samanlainen, mutta niillä on eri skaalat. Painotetun profiilin tunnusluvut näyttivät reagoivan erityisesti lyhytaaltoisiin epätasaisuuksiin ja ne tunnistivat samoja kohtia kuin muut lyhytaaltoiset tunnusluvut.



Kuva 37. Aallonpituusanalyysin tunnuslukujen profiilin Vahijärven painumakohdassa kantatiellä 55 tieosalla 3.

Aallonpituusanalyysin tunnusluvuista tehty SPC-analyysi on esitetty kuvassa 38. SPC-analyysin keskeisimmät tulokset ovat tarkasteltavalla tieosalla tunnusluvun saama keskiarvo sekä erityisyyistä johtuvan vaihtelun ylä- ja alarajat, joista tärkeämpi yläraja. Sen vasemmassa osassa ovat SW-MW-LW-tunnusluvut ja oikealla LPV-tunnusluvut.

Lyhytaaltainen SW tunnisti epätasaisuutta melko yhteneväisesti LPV3-tunnusluvun kanssa. Pitkäaaltoisia epätasaisuuksia tunnistivat parhaiten LW ja LPV30-tunnusluvut, joista LW-tunnusluku oli hiukan parempi.



Kuva 38. Vahijärven painumakohdan aallonpituustunnuslukujen SPC-analyysit.

3.2.1.4 RIDE-tunnusluvut

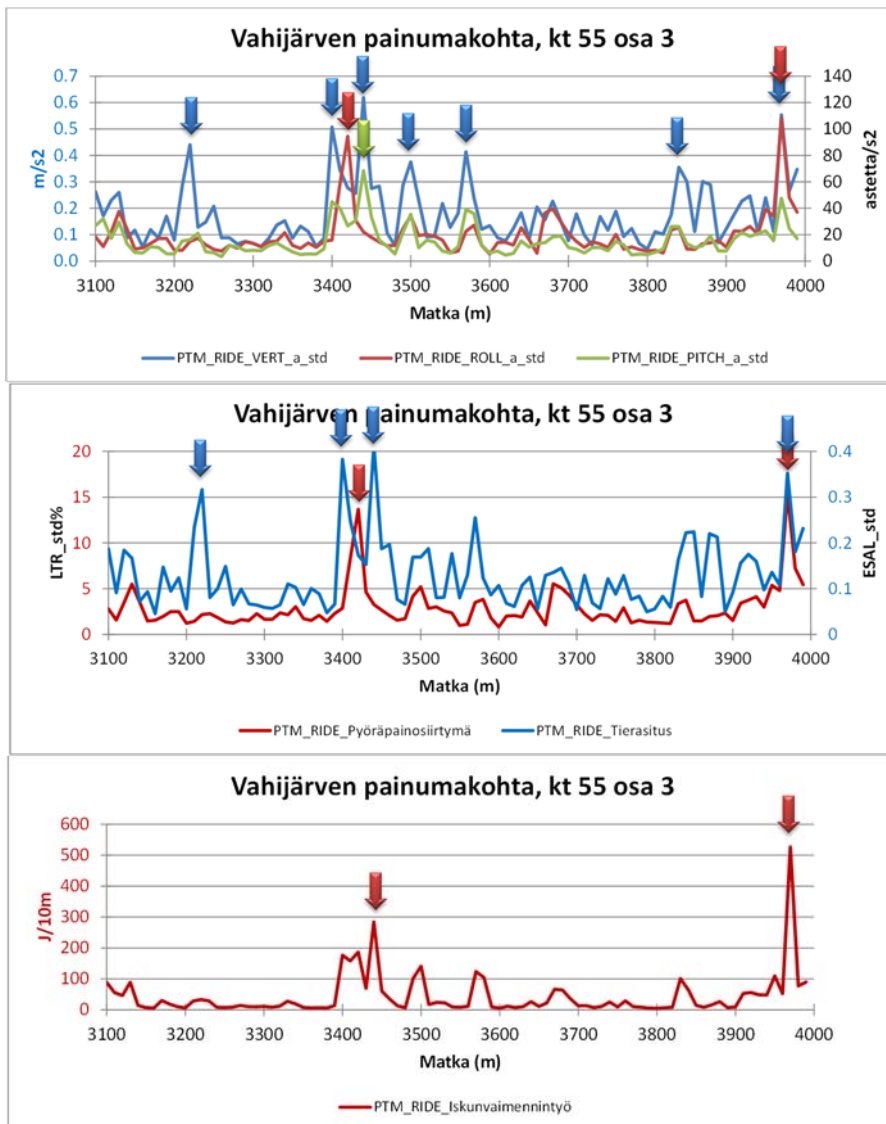
Ajoneuvosimuloinnit tuottivat tunnuslukuja, joiden tunnuksena on kaikissa alkuliite "RIDE" kuvaten sitä, että simuloinnit on tuotettu RIDE-mallilla (Kuva 39). Etuliite PTM tunnuslukujen nimissä kuvaa mistä mittauksesta lähtötiedot on saatu. Simuloitava ajoneuvo on kaksiakselinen kuorma-auto. Simulointinopeus riippui tien nopeusrajoituksesta, mutta sitä rajoitti ajoneuvokohtainen rajoitus. Nopeus oli teiosalla vakio.

Liiketunnusluvut olivat korin pysty-, sivuheilahdus- ja nyökkimiskiihtyvyys. Aiemmin on selvitetty, että huonoja kohtia tunnistavat parhaiten liikekiihtyvyyksien hajonnat. Muita tunnuslukuja olivat pyöräpainosiirtymän ja tierasituksen hajonnat ja iskunvaimentimien tekemä työ.

Ajoneuvon korin pystykiihtyvyyden hajonta tunnisti 7 poikkeuksellista kohtaa, joista neljä olivat selkeimpiä. Ajoneuvon korin sivuheilahduksen hajonta tunnisti kaksi poikkeuksellista kohtaa ja nyökkimiskulman hajonta vain yhden poikkeuksellisen kohdan.

Pyöräpainsiirtymän hajonta tuotti melko yhteneväisen tuloksen korin sivuheilahdusliikkeen hajonnan kanssa ja vastaavasti tierasituksen hajonta tuotti melko yhteneväisen tuloksen korin pystykiihtyvyyden hajonnan kanssa.

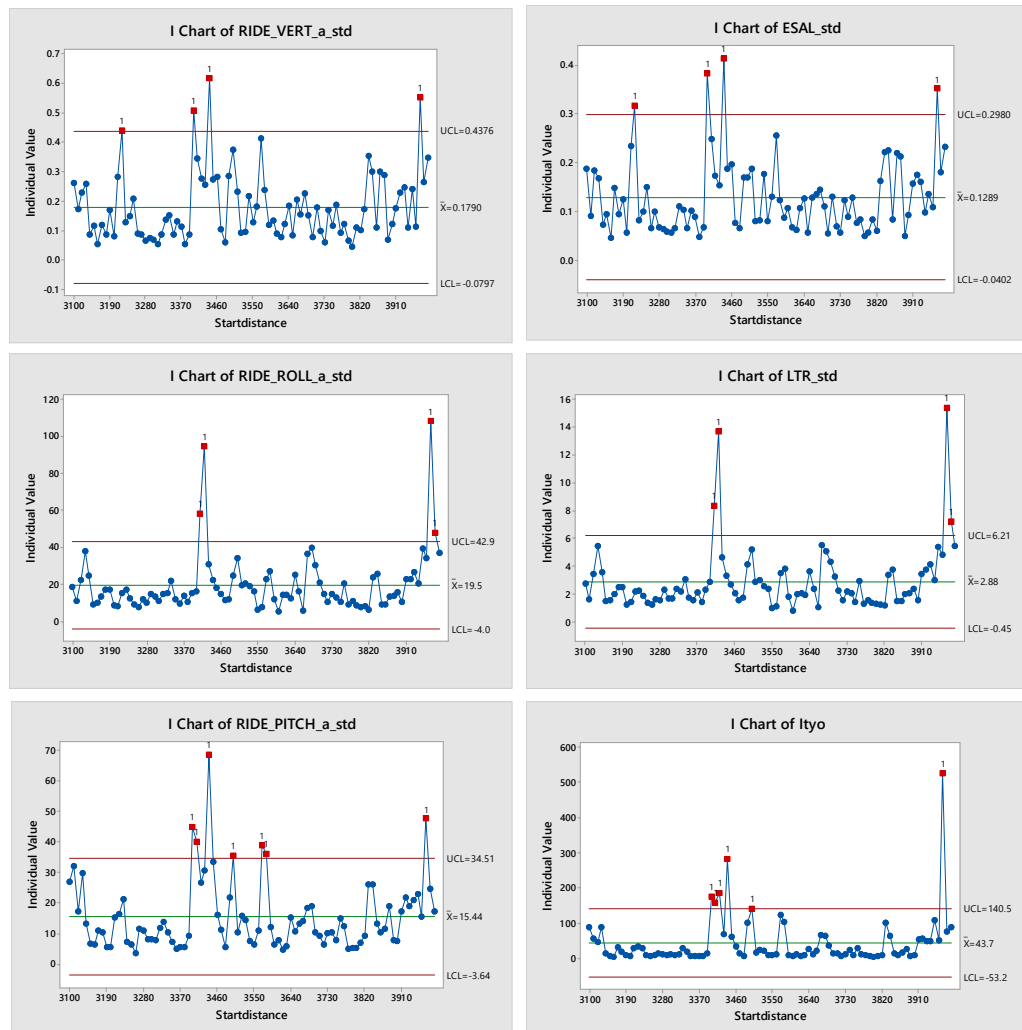
Iskunvaimentimien tekemä työ on aiempien selvitysten mukaan erittäin selektiivinen tunnusluja ja se erottelee huonoimmat kohdat tiestä hyvin. Tälläkin kohteella se löysi kaksi poikkeuksellista kohtaa. Se noudatteli tierasituksen, pyöräpainsiirtymän ja korin pystykiihtyvyyden profiileja. Se onkin eräänlainen yhteismuuttuja niistä. Se tunnisti myös kolme muuta kohtaa, mutta ne olivat lievempiä.



Kuva 39. Ajoneuvosimuloinnin tuottamien tunnuslukujen profiilit Vahijärven painumakohdassa kantatiellä 55 tieosalla 3. Ylemmässä kuvassa liikekiihtyvyyksien hajonnat, keskimmaisessä kuvassa pyöräpainsiirtymän ja tierasituksen hajonnat ja alimmassa kuvassa iskunvaimentimien tekemä (laskennallinen) työ.

Ajoneuvosimuloinnin tunnusluville tehty SPC-analyysi on esitetty kuvassa 40. Nyökimiskiihtyvyys tunnisti painumakohdan parhaiten (raja-arvo 34,5 astetta/s²). Painumakohdan alussa oli myös sivuttaisepätasaisuutta, mikä näkyi sivuheilahduskihtyvyydessä (raja-arvo 42,9 astetta/s²) sekä tavanomaista epätasaisuutta, mikä näkyi pystykihtyvyydessä (raja-arvo 0,44 m/s²). Pystykihtyvyyden kanssa hyvin samankaltaisen

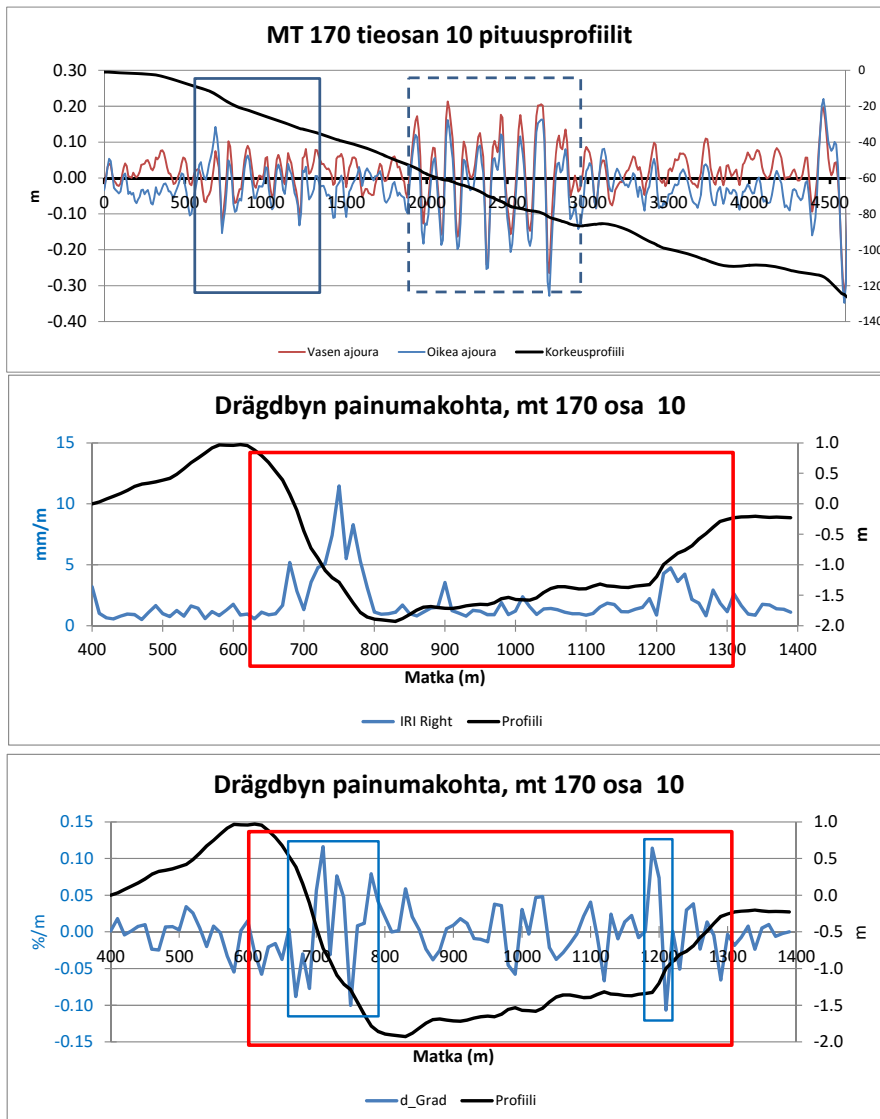
informaation tuotti tierasituksen hajonta, vastaavasti sivuttaiskiiktyvyyden kanssa samankaltainen oli pyöräpainsiirtymän hajonta ja nyökkimiskiiktyvyyden kanssa samankaltainen oli iskunvaimentimien tekemä työ.



Kuva 40. Vahijärven painumakohdan RIDE-tunnuslukujen SPC-analysit.

3.2.2 Drägsbyn painumakohta

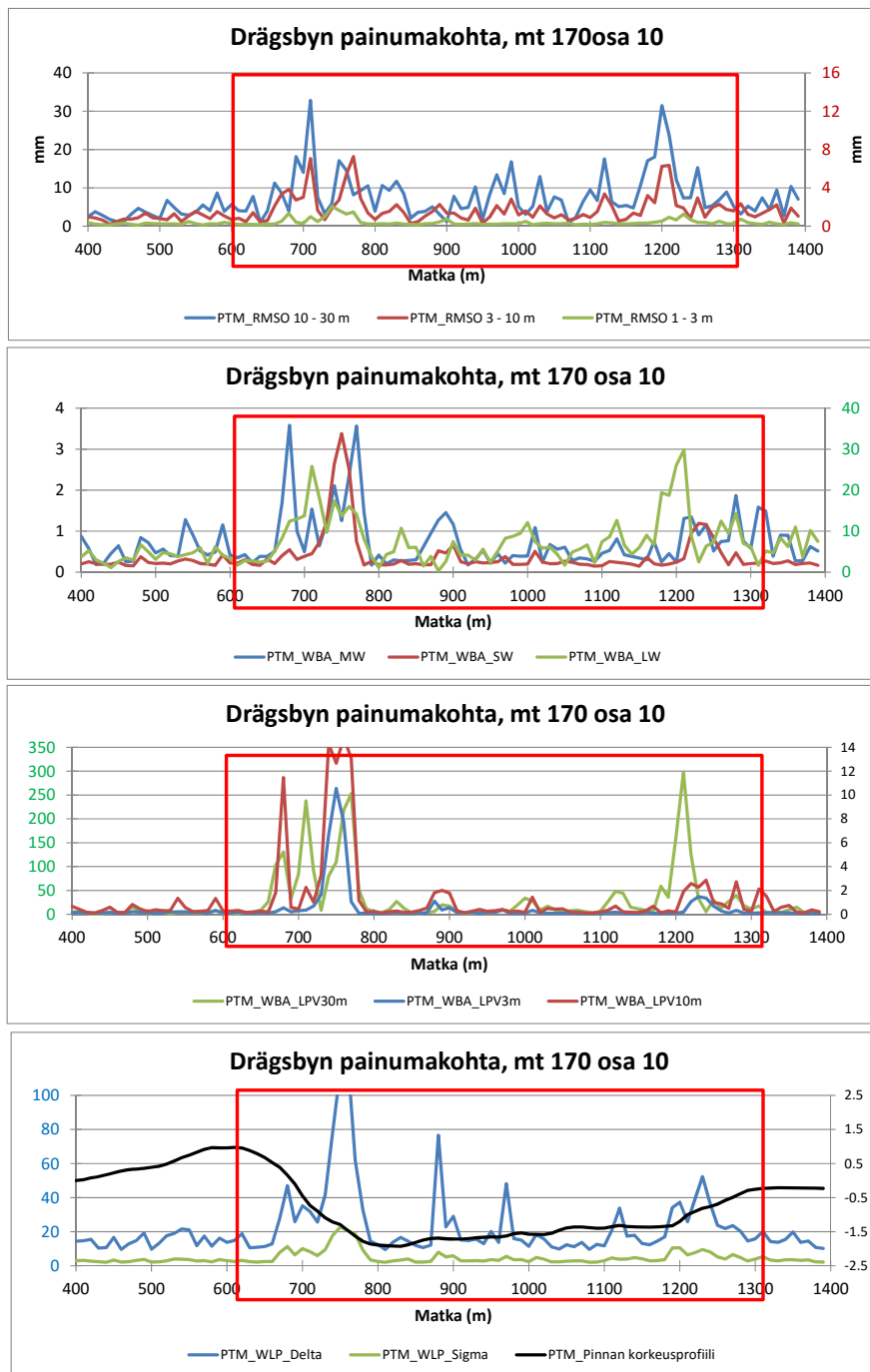
Drägsbyn painumakohta on maantiellä 170 tieosalla 10 paaluvälillä 600–1300 tosin mittausten mukaan myös paaluvälillä 1900–3000 oli normaalista poikkeavia kohtia (Kuva 41). Ne kuitenkin lienee korjattu uudella päällysteellä. Painumakohta alkoi paalulta 600, mikä näkyi pituuskaltevuusvaihteluna noin 100 m matkalla. Painuneen kohdan pohjalla vaihtelu oli pienempää, mutta sen lopussa paalulla 1200 se taas kasvoi.



Kuva 41. Drägby'n painumakohdan profiili maantiellä 170 tieosalla 10 (palvelutasomittaus 2015).

3.2.2.1 Graafinen tarkastelu

Drägby'n painumakohtaa tarkasteltaessa tunnusluvuissa näkyi poikkeavia tasoja painuman alku- ja loppukohtissa (Kuva 42). Painuman alkukohtassa tunnusluvut ja erityisesti pitkäaaltoisen epätasaisuuden tunnusluvut saivat suuria arvoja.



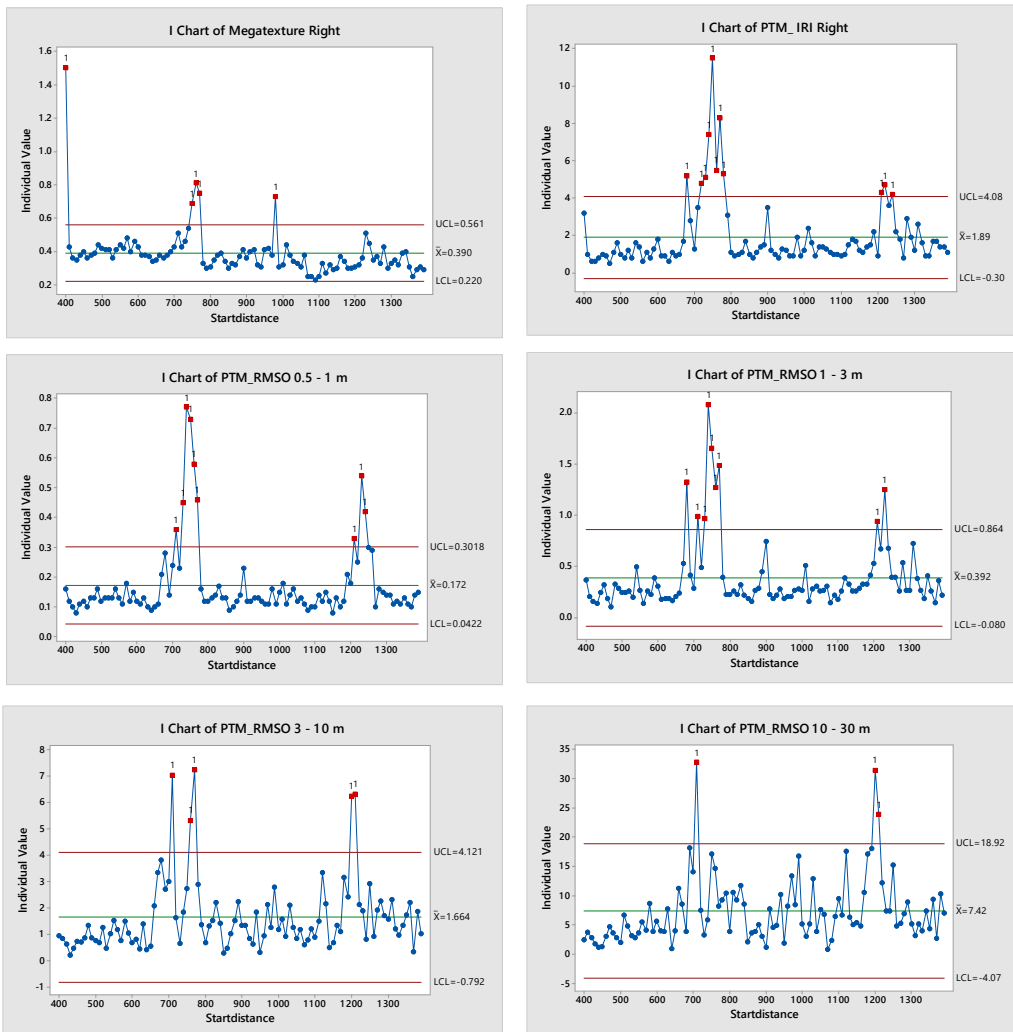
Kuva 42. Perinteisten tasaisuustunnuslukujen profiilit ja aallonpituusanalyysin tunnuslukujen profiilit Drägsbyn painumakohteella.

3.2.2.2 SPC-tarkastelu

Eri tunnuslukujen toimivuutta Drägsbyn painumakohdan tunnistamisessa tutkittiin SPC-analyysin avulla. Perinteisten PTM-tunnuslukujen tarkastelu on esitetty kuvassa 43. Siitä todettiin seuraavaa:

- Megakarkeus ei tunnistanut painumakohtaakaan ollenkaan
- IRI_10m tunnisti sen alkukohdan selvästi, mutta ei oikeastaan sen loppukohtaa
- RMS-tunnusluvut tunnistivat sekä alku- että loppukohtaan, lyhytaaltoiset tunnustivat kohdat pitempinä kuin pitkäaaltoiset
- painumakohdan pohjaa ei tunnistettu

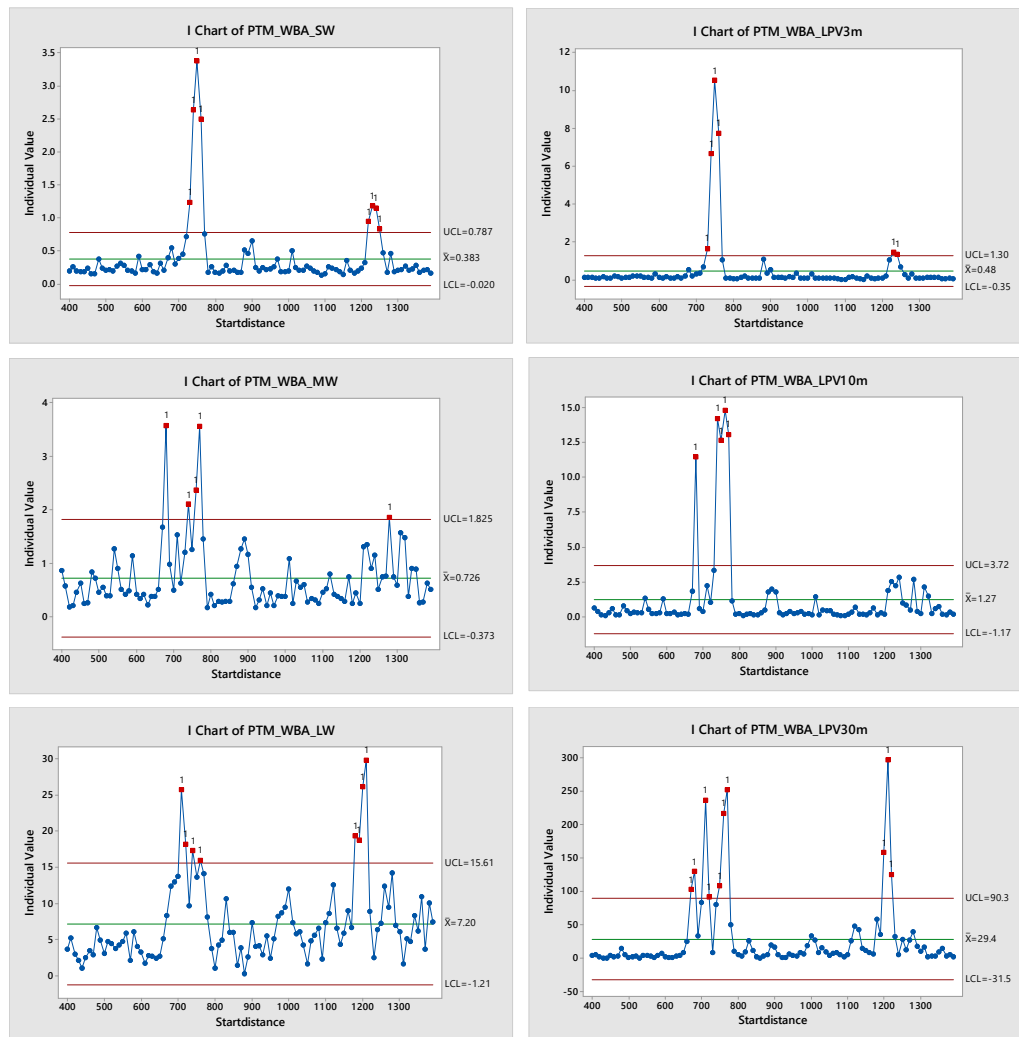
Tunnuslukujen toimivuutta painumakohdan tunnistamisessa oli hankala tutkia, koska painumakohdan tarkkaa sijaintia (alku- ja loppumetreit) ei ollut käytössä.



Kuva 43. Drägsbyn painumakohdan PTM-tunnuslukujen SPC-analyysi.

Aallonpituusanalyysien tunnuslukujen tarkastelu on esitetty kuvassa 44. Siitä todettiin seuraavaa:

- Lyhytaaltoiset tunnusluvut (SW & LPV₃) tunnistivat painuman alkukohdan 40 m pituisena ja loppukohdan 20–40 m pituisena. Loppukohdan tunnistus ei ollut kovin selvä.
- Keskiaaltoiset tunnusluvut (MW & LPV₁₀) tunnistivat painuman alkukohdan kaksiosaisena 10 m ja 30–40 m pituisina, mutta loppukohtaa ne eivät tunnistaneet
- Pitkäaaltoiset tunnusluvut (LW & LPV₃₀) tunnistivat painuman alkukohdan kaksiosaisena 20 m ja 30–40 m pituisena ja loppukohdan yksiosaisena 30 m tai 40 m pituisena.

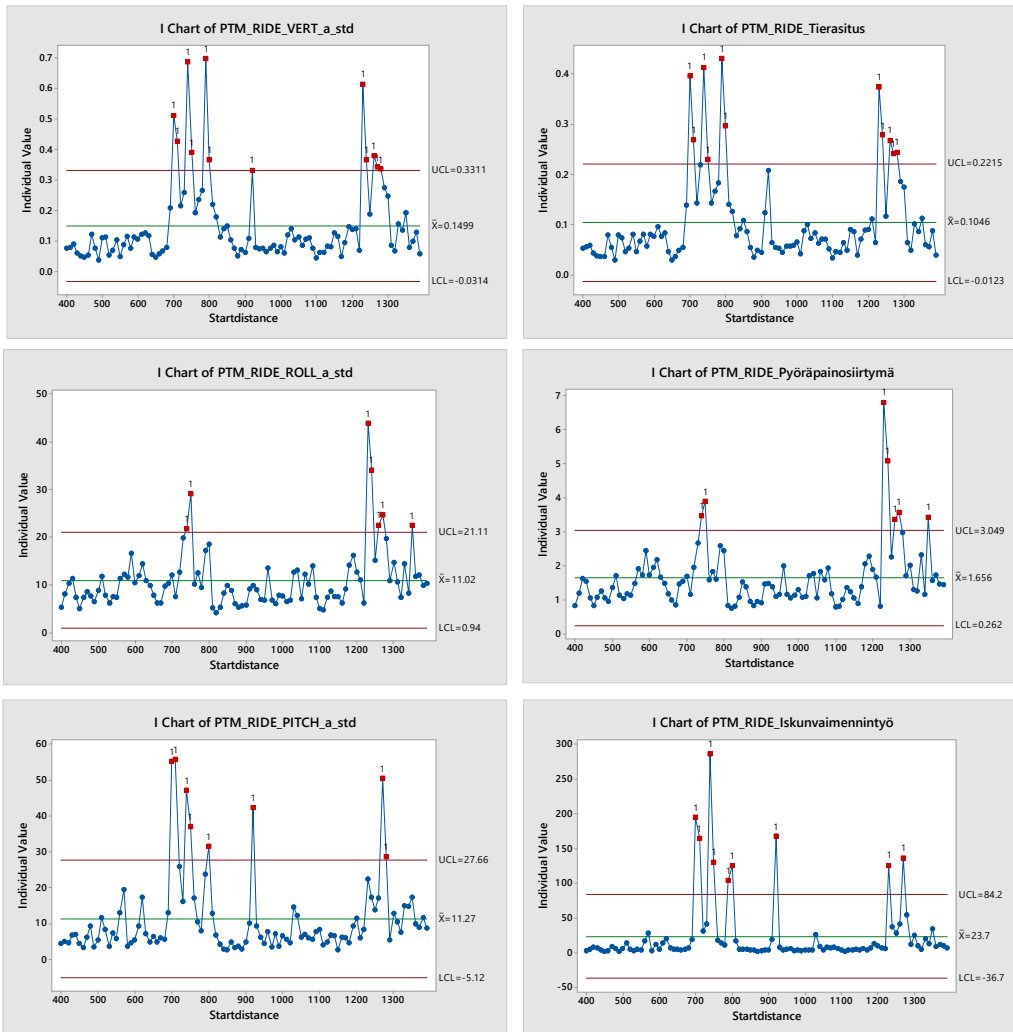


Kuva 44. Drägsbyn painumakohdan WBA-tunnuslukujen SPC-analyysi.

Aallonpituusanalyysien tunnuslukujen tarkastelu on esitetty kuvassa 45. Siitä todettiin seuraavaa:

- Korin pystykiihtyvyyden hajonta oli keskimäärin 0,15 m/s² ja poikkeavien arvojen raja-arvoksi saatiin 0,33 m/s².
- Korin pystykiihtyvyys tunnisti painumakohdan alkukohdan kolmena 20 m pituisena kohtana ja loppukohdan kahtena 20–30 m pituisena kohtana.
- Tierasitustunnusluku oli edellisen kanssa hyvin samankaltainen
- Korin sivuheilahduskiihtyvyyden hajonnan keskiarvo oli 11 astetta/s² ja poikkeavien arvojen raja-arvoksi saatiin 21 astetta/s².
- Sivuheilahduskiihtyvyys tunnisti painuman alkukohdan yhtenä 20 m kohtana ja loppukohdan kahtena 20 m pituisena kohtana.
- Pyöräpainosiirtymä oli edellisen kanssa hyvin samankaltainen.
- Korin nyökkimiskiihtyvyyden hajonnan keskiarvo oli 11 astetta/s² ja poikkeavien arvojen raja-arvoksi saatiin 28 astetta/s².
- Nyökkimiskiihtyvyys tunnisti painuman alkukohdan kolmena 10 tai 20 m pituisena kohtana ja loppukohdan yhtenä 20 m pituisena kohtana. Painumakohdan keskipaikkeilla kohdassa 900 m tunnistettiin myös yksi 10 m pituinen nyökkimiskohta.
- Iskunvaimentimien tekemä työ oli edellisen kanssa hyvin samankaltainen. Keskiarvo oli 24 J/10m ja poikkeavien arvojen raja-arvo oli 84 J/10m.

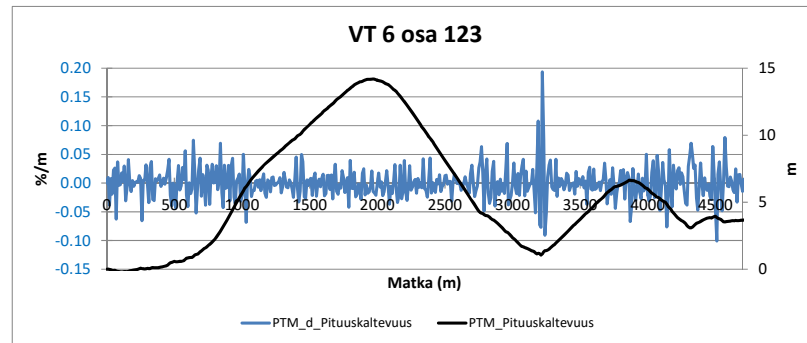
- RIDE-simuloinnin liikekiihtyvyytunnusluville on kehitetty toisessa työssä yhdistetty liikekiihtyvyyksien painotettujen kiihtyvyyksien RMS-arvona, mutta sitä ei tässä yhteydessä käsitelty.



Kuva 45. Drägsbyn painumakohdan RIDE-tunnuslukujen SPC-analyysi.

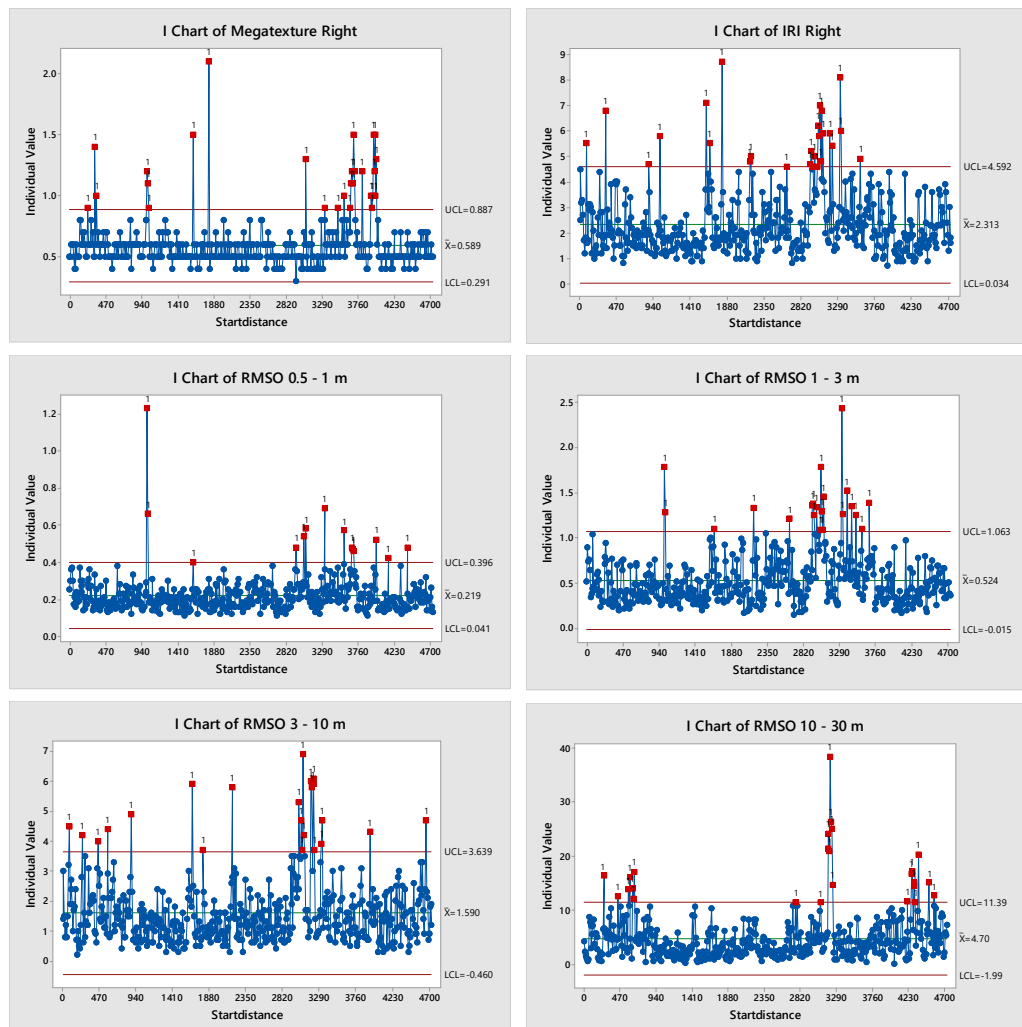
3.3 Lyhytaaltoinen epätasaisuus

Lyhytaaltoista epätasaisuutta tarkasteltiin valtatiellä 6 tieosalla 123, joka oli mitattu vuonna 2013 (Kuva 46). Tieosa oli syksyllä 2013 tehdyn maastokäynnin perusteella erityisen epätasainen. Epätasaisuuden sijaintia ei tuolloin tarkemmin paikallistettu. Tunntuma siitä, että tieosa oli poikkeuksellinen, jäi tuolloin mieleen ja sen tiedon varassa kyseinen kohde oli tässä tutkimuksessa edustamassa lyhytaaltoista epätasaisuutta.



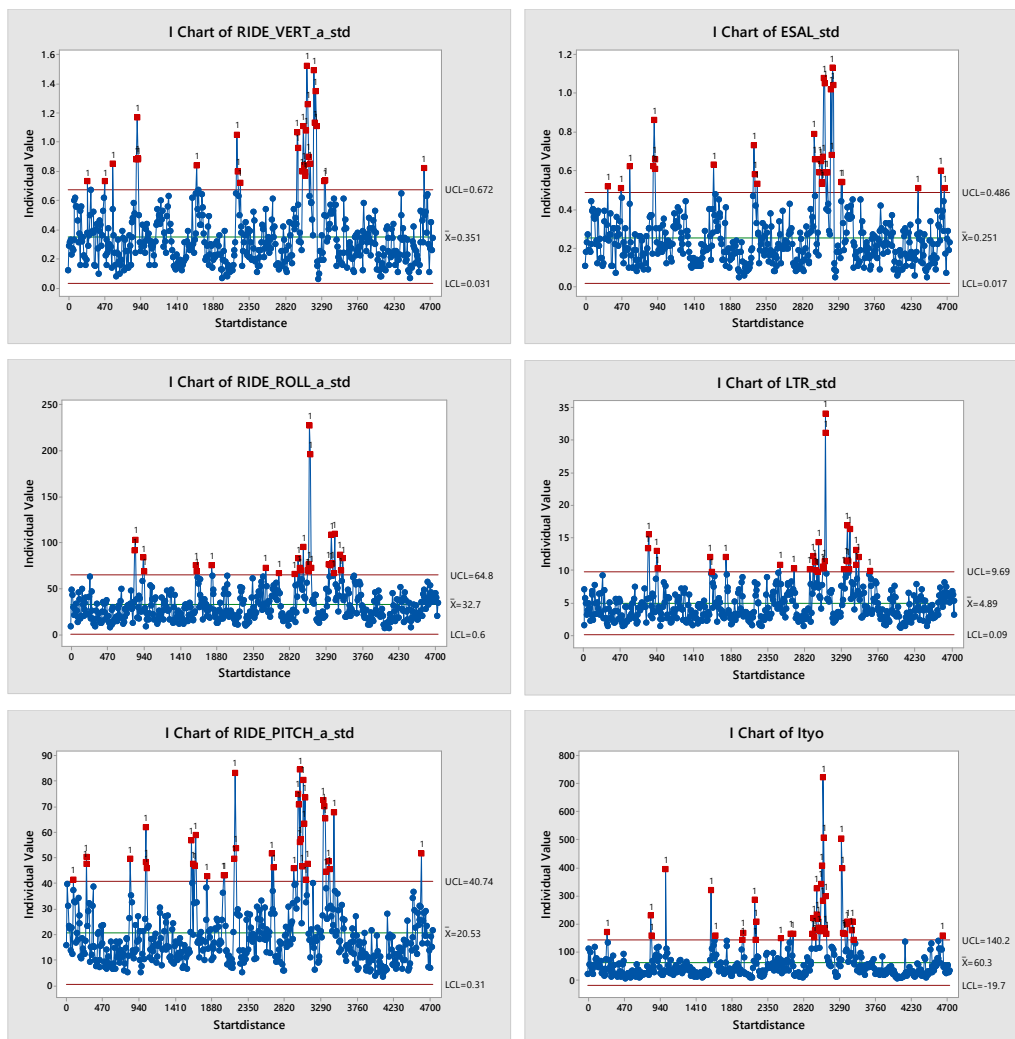
Kuva 46. Pituuskaltevuus ja tien korkeus valtatiellä 6 tieosalla 123 (mittaus 2013).

PTM-tunnusluville tehty SPC-analyysi on esitetty kuvassa 47. IRI_{10} :n perusteella tieosalla oli 25 poikkeuksellista kymmenmetristä (raja-arvolla 4,6 mm/m). Saman verran poikkeuksellisia kymmenmetrisiä löysi pitkäaaltoinen RMS30. Muut PTM-tunnusluvut löysivät vähemmän.



Kuva 47. PTM-tunnuslukujen SPC-analyysi (mittaus 2013).

RIDE-tunnuslukujen SPC-analyysi on esitetty kuvassa 48. Eniten poikkeuksellisia kymmenmetrisiä löysivät nyökkimiskiivtyvyys (UCL=40,7) ja iskunvaimentimien tekemä työ (UCL=140 J/10m) kumpikin yhteensä 39 kpl. Koska ajotuntuma kyseisellä tieosalla oli sellainen, että siinä oli runsaasti epätavallista epätasaisuutta, näyttää siltä, että simuloidut tunnusluvut tuottavat paremman kuvan tieosan epätasaisuudesta kuin perinteiset PTM-tunnusluvut, joista IRI ja RMS30 löysivät vain 25 poikkeuksellista kymmenmetristä ja muut sitä vähemmän. Poikkeuksellisten kohtien tunnistamiseen vaikuttaa toki sitten se, jos raja-arvoa muutetaan. Periaatteessa raja-arvot pitäisi ottaa ns. staabiilista tilasta eli sellaisilta kohteilta, joiden tasaisuudessa ei ole mitään epätavallista ja soveltaa niistä saatuja arvoja epätavallisten kohtien etsintään. Tällaisten hyvän tien tunnusmerkit omaavien kohteiden löytäminen on oikeastaan oma selvityksen aiheensa ja siksi siihen ei tässä paneuduttu enempää.



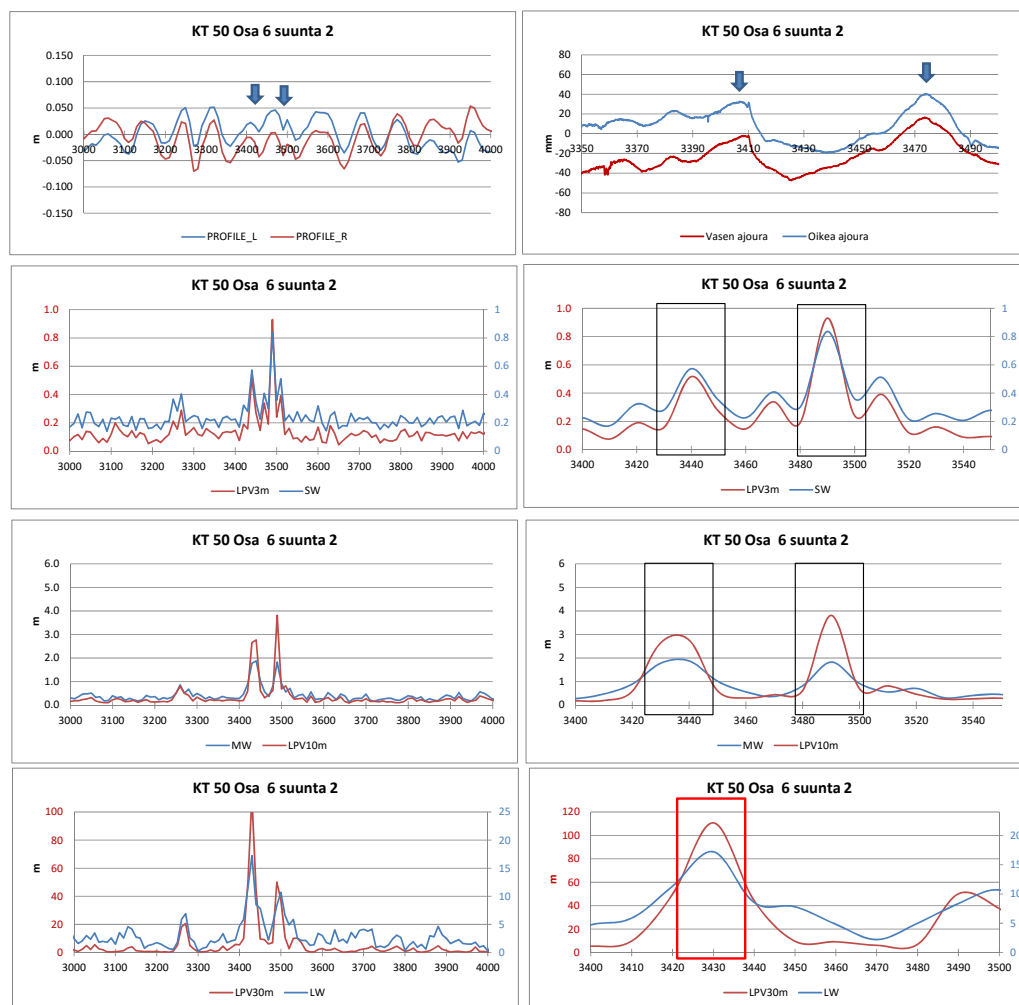
Kuva 48. RIDE-tunnuslukujen SPC-analyysi (2013).

3.4 Yksittäisepätasaisuus

Yksittäisepätasaisuutta tutkittiin poimimalla kohteilta yksittäisiä epätasaisia kohtia ja tarkastelemalla miten eri tunnusluvut niihin reagoivat. Kehä III tieosalla 6 oli yksi yksittäisepätasaisuus suunnassa 2 kohdassa 3400–3500 m. Epätasainen kohta koostui kahdesta painaumasta, joiden välissä oli kohouma. Ensimmäinen painauma oli kohdassa 3430 m ja toinen kohdassa 3490 m. Ensimmäisen painauman jyrkkyyttä tarkasteltiin painaumaan tulon kaltevuutena, joka oli noin 2 cm 20 m matkalla eli 1 promille. Toisen painauman tulon jyrkkyys oli noin 4 cm 20 m matkalla eli 2 promillea.

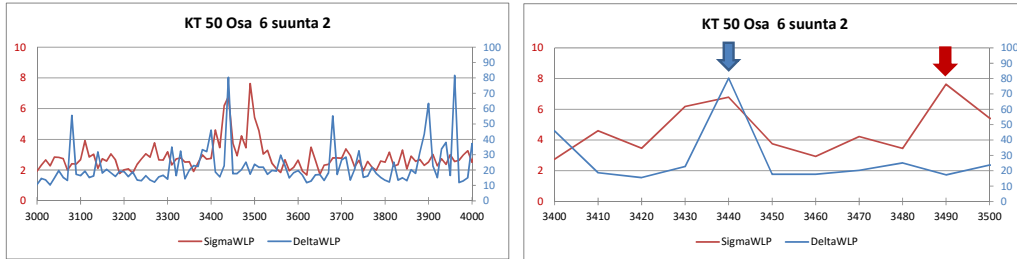
3.4.1 Aallonpituusanalyysit

Kuvassa 49 on esitetty aallonpituusanalyysien tunnuslukuja ko. kohdalla. Vasemmassa osassa on esitetty yhden kilometrin pätkä ja oikeassa sadan metrin pätkä. Oikeanpuoleisista kuvista oli pääteltävissä, että loivempaan painaumaan reagoivat pitkäaaltoiset tunnusluvut (LW ja LPV30) ja jyrkempään painaumaan lyhytaaltoiset tunnusluvut (SW ja LPV3). Keskipitkiä aaltoja edustavat tunnusluvut (MW ja LPV10) reagoivat kumpaankin painaumaan samalla tavalla.



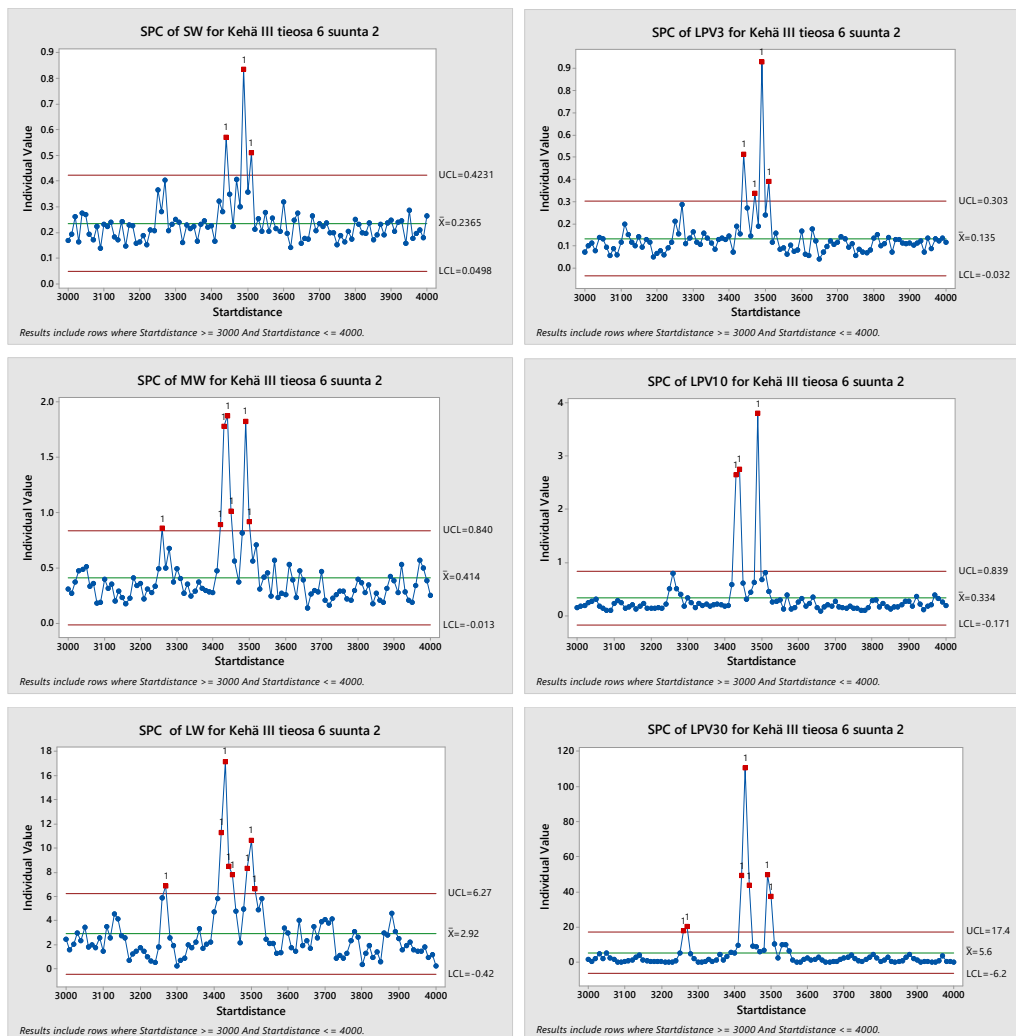
Kuva 49. Yksittäisepätasaisuuskohta Kehä III:lla ja siitä tuotettuja aallonpituusanalyysien tunnuslukuja 10 m välein vasemmalla yhden kilometrin pätkä ja oikealla 150 metrin pätkä (mittaus 7.4.2015).

Painotetun pituusprofiilin tunnusluvut (WLP_Delta ja WLP_Sigma) reagoivat kuvassa 50 esitetyn mukaisesti. WLP_delta reagoi ensimmäiseen epätasaisuuskohtaan ja WLP_Sigma toiseen. WLP_Deltassa oli 10 m siirtymä eli sen huippukohta oli paalulla 3440 m eikä 3430 m, missä epätasaisuuskohdan pohja oli.

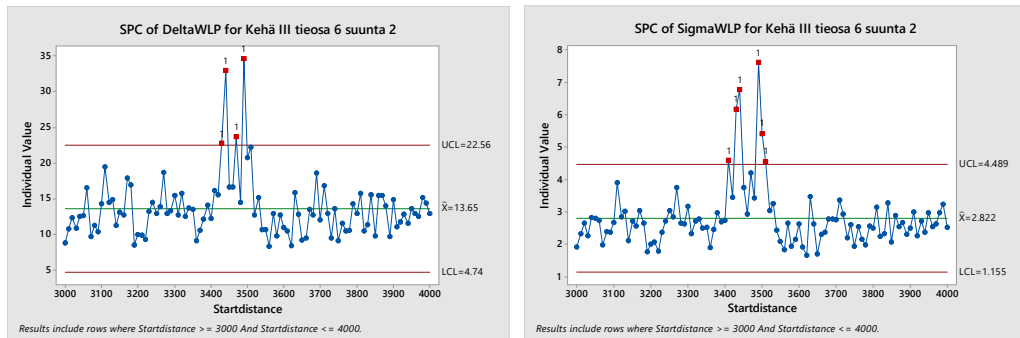


Kuva 50. Yksittäisepätasaisuuskohta Kehä III:lla ja siitä tuotettuja aallonpituus-analysien tunnuslukuja (WLP) 10 m välein vasemmalla yhden kilometrin pätkä ja oikealla sadan metrin pätkä (mittaus 7.4.2015).

Aallonpituusanalyysin tunnusluvut tunnistavat yksittäisepätasaisuuskohdan kaikki (Kuva 51, Kuva 52). Yksittäisepätasaisuus näkyy SPC-kuvissa kahtena erillisenä poikkeamana, joiden välissä on lyhyt 20–40 m pituinen osuus.



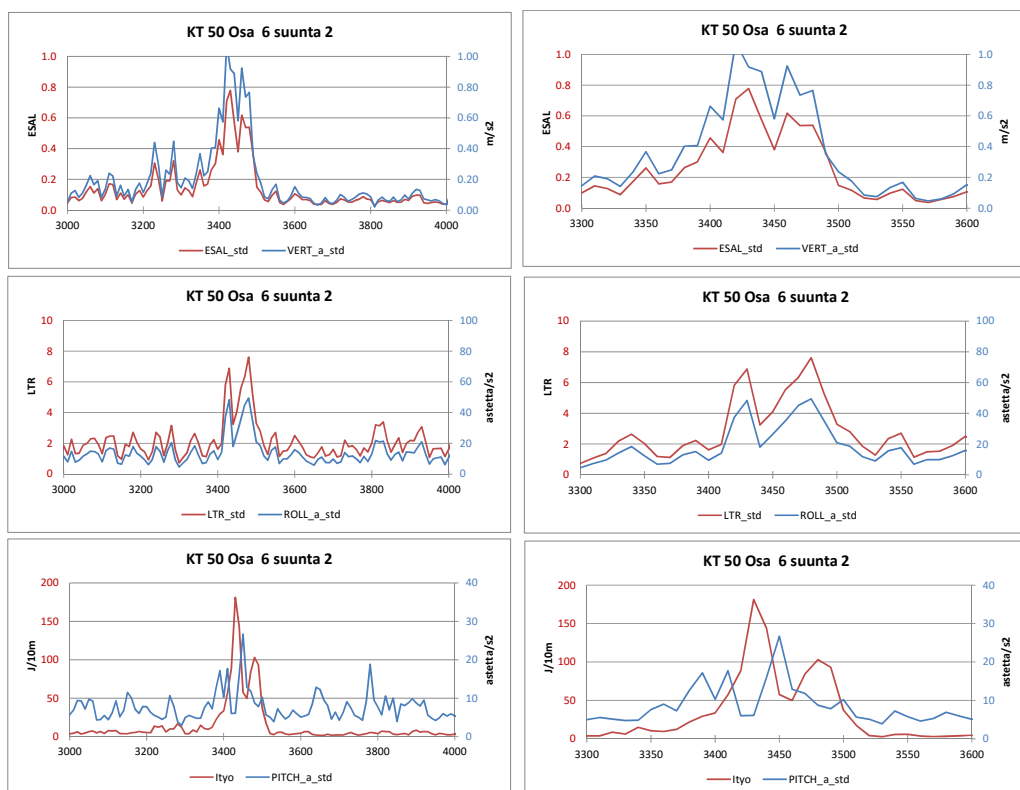
Kuva 51. Yksittäisepätasaisuuskohta Kehä III:lla ja siitä tuotettujen aallonpituus-analysien tunnuslukujen SPC-analyysi (mittaus 7.4.2015).



Kuva 52. Yksittäisepätasaisuuskohta Kehä III:lla ja siitä tuotettujen aallonpituus-analyysien tunnuslukujen SPC-analyysi (mittaus 7.4.2015).

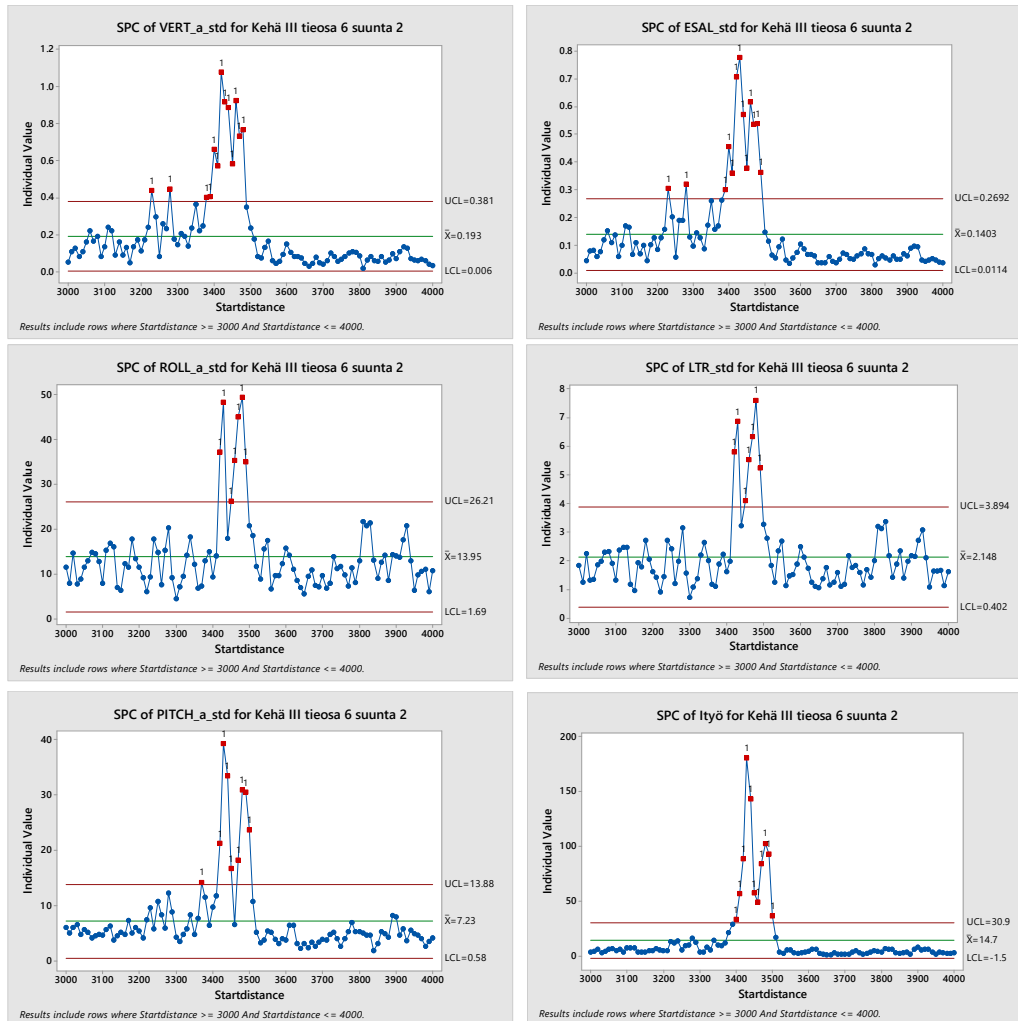
3.4.2 RIDE-tunnusluvut

Kuvassa 53 on esitetty ajoneuvosimuloinnilla saatuja tunnuslukuja Kehä III:n yksittäisepätasaisuuskohtan sisältävällä kohdalla tieosalla 6. Vasemmalla osassa on esitetty yhden kilometrin pätkä ja oikeassa 300 m pätkä. Simuloidut tunnusluvut reagoivat kaikki kyseisen yksittäisepätasaisuuden kohdalla, mutta reagointimatka on pitempi ja yhtenäisempi kuin aallonpituusanalyysien tunnusluvuilla. Pystykiehtyvyyden ja sivuheilaidusten kannalta painaumakohdat olivat suunnilleen samanarvoisia, mutta iskunvaimentimien tekemän työn kannalta ensimmäinen kohta oli vakavampi ja nyökkimiskiihtyvyyden kannalta taas jälkimmäinen kohta oli vakavampi.



Kuva 53. Yksittäisepätasaisuuskohta Kehä III:lla ja siitä tuotettuja simuloituja tunnuslukuja 10 m välein. Vasemmalla yhden kilometrin pätkä ja oikealla 300 m pätkä (mittaus 7.4.2015).

Kaikki RIDE-tunnusluvut tunnistivat yksittäisepätasaisuuden (Kuva 54). Erona aallonpituusanalyysien tunnuslukuihin oli, että yksittäisepätasaisuuskohta näkyi yhtenä osuutena kahden osuuden sijasta.



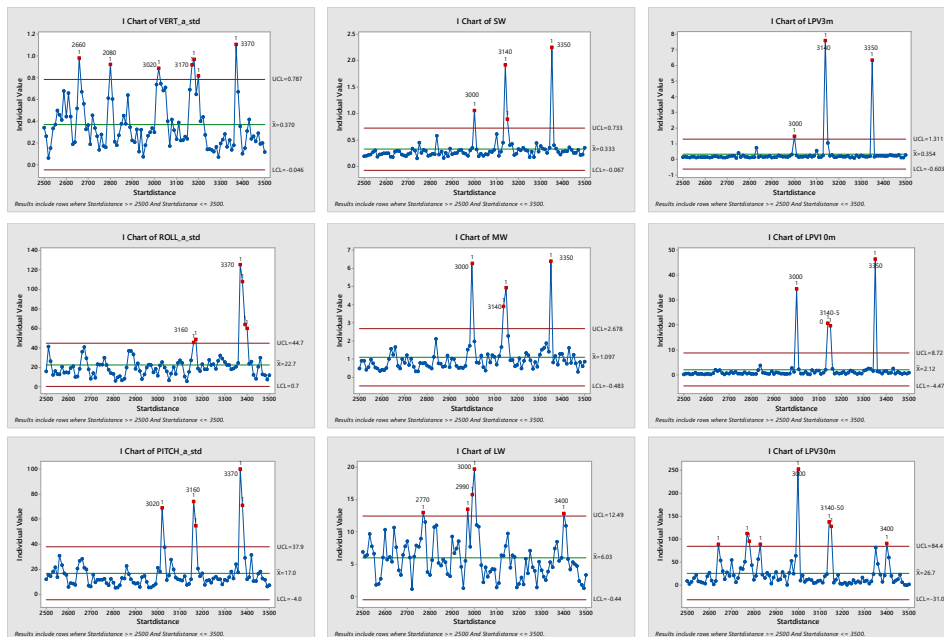
Kuva 54. Yksittäisepätasaisuuskohta Kehä III:lla ja siitä tuotettujen simuloitujen tunnuslukujen SPC-analyysi (mittaus 7.4.2015).

3.4.3 Kehä III osa 7

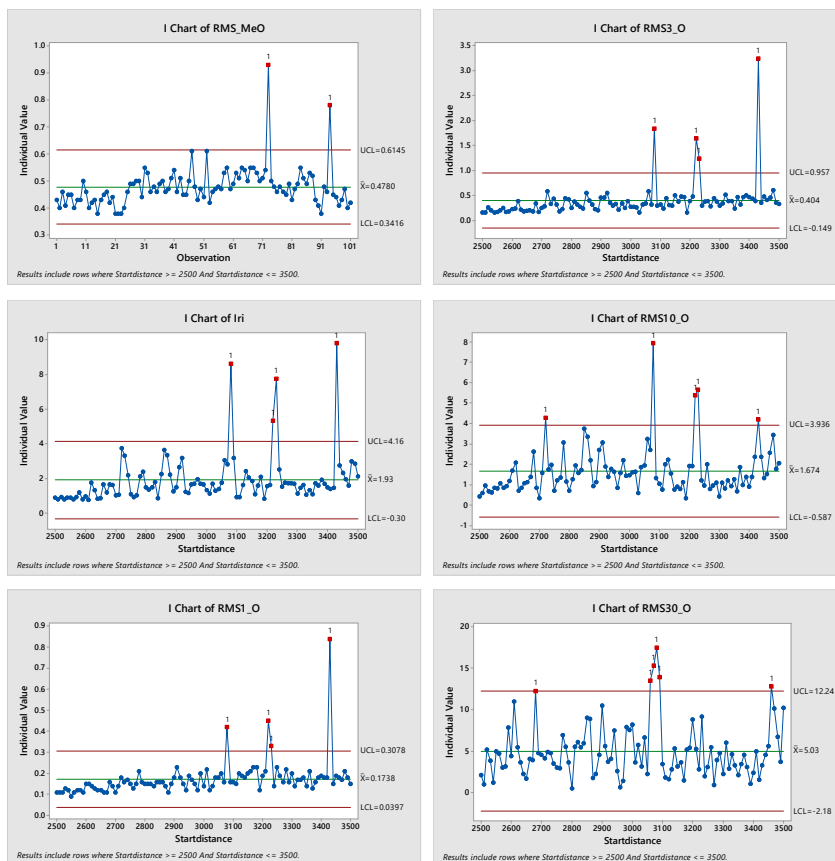
Kehä III:n tieosan 7 suunnan 1 kaistaa 1 tarkasteltiin SPC-analyysillä siten, että valittiin tieosalta yhden kilometrin pituinen osuus ja tarkasteltiin mitä eri tunnusluvut siitä löysivät (Kuva 55). Pystytkiihtyvyys löysi tieosalta viisi poikkeuksellista kohtaa, joista yksi oli kolmen kymmenmetrisen muodostama kohta ja muut yksittäisiä kymmenmetrisiä. Sivuheiladuskiihtyvyys tunnisti oikeastaan vain yhden kohdan (toinen oli lievä), joka oli viimeinen poikkeuksellinen kohta tieosalla. Nyökkimiskiihtyvyys tunnisti kolme kohtaa, joista yksi oli yksittäinen kymmenmetrinen ja muut kahden kymmenmetrisen yhdistelmiä.

Aallonpituusanalyysin lyhytaaltoiset ja keskiaaltoiset tunnusluvut (WBA_SW, WBA_LPV3, WBA_MW ja WBA_LPV10) tunnistivat kolme yksittäistä kohtaa ja pitkäaaltoiset tunnusluvut (WBA_LW ja WBA_LPV30) 3-6 kohtaa.

Perinteisten PTM-tunnuslukujen SPC-analysissä IRI₁₀, ja lyhyt- ja keskipitkääaltoiset tunnusluvut tunnistivat kolme poikkeuksellista kohtaa (Kuva 56). Megakarkeus tunnisti vain kaksi kohtaa ja pitkäaaltoiset tunnusluvut 3–4 kohtaa.



Kuva 55. Tunnuslukujen SPC-analyysi Kehä III tieosa 7 matka 2500–3500 suuntaan 1. RIDE-simuloinnit (vasen kuvasarja) mittauksesta 1.4.2015. Aallonpituusanalysit (muut kuvat) mittauksesta 29.3.2016.



Kuva 56. Tunnuslukujen SPC-analyysi Kehä III tieosa 7 matka 2500–3500 suuntaan 1. PTM-tunnusluvut mittauksesta 18.3.2016.

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tien pituussuuntainen profiili sisältää monenlaista epätasaisuutta, joka pystytään tunnistamaan eri aallonpituusalueita tutkivilla tunnusluvuilla. Perinteinen IRI-tunnusluku kuvaa neljännesautomallilla laskettua neljännesrungon pystyliikettä kuljettua pituusyksikköä kohti. Sen laskennassa otetaan huomioon aallonpituusalue puolesta metristä 30 (tai 50) metriin. Sen laskennassa käytetään löysäjousista ajoneuvomallia vakionopeudella 80 km/h. Tavallisin laskentapituus on 100 m. Indeksien hyvänä puolena on sen kansainvälinen yleisyys. Sitä on käytetty niin uusien päällysteiden laatuvaatimuksissa kuin vanhojen päällysteiden kunnonhallinnassa. Se on mahdollistanut erilaisten vertailujen tekemisen ja tutkimustiedon hyväksikäytön eri maiden välillä. Siihen liittyy kuitenkin useita puutteita ja ongelmia, jotka ovat viime aikoina alkaneet nousta yhä useammin esille.

- IRI-tunnusluku on simulointivaste, mikä tarkoittaa sitä, että se ei muodostu tien pinnan profiilista suoraan vaan ajoneuvomallin kautta.
- Ajoneuvomallina se kuitenkin on puutteellinen, koska se ei ole koko ajoneuvo vaan osa sitä. Vasteesta puuttuu useita liikesuuntia, koska neljännesautomallista ei saada ulos kuin yhtä liikesuuntaa.
- Tämän lisäksi sen vasteena on liike itsessään (siirtymä) eikä esim. sen kiihtyvyys, joka korreloisi paremmin ajomukavuuden kanssa.
- Sen laskennassa käytetty vakionopeus ei vastaa todellista nopeutta, mikä vääristää laskennan tuloksena saatua tunnuslukua ja sen vastaavuutta käytännön ajotuntumaan.
- Löysäjousisena henkilöautona IRI-malli ei ota huomioon raskaan ajoneuvon tilannetta, mikä ajomukavuutta tarkastellen on yleensä se kriittisempi ajoneuvo.
- Sadan metrin keskiarvona IRI-tunnusluku keskiarvoistaa epätasaisuuksia liiaksi, mikä johtaa siihen, ettei huonoja kohtia tunnusteta tarpeeksi hyvin. Lisäksi se ei tuota informaatiota siitä minkä tyyppistä epätasaisuus on.

IRI-tunnusluvun puutteita voidaan korjata uusilla tunnusluvuilla lähtien kahdesta eri periaatteesta, joita molempia tarkasteltiin tässä työssä:

- Palataan takaisin tien pinnan profiiliin ja tuotetaan tunnuslukuja siitä. Tämä tarkastelutapa lähtee mitatusta pinnasta ja kuvaa siten pinnan ominaisuuksia aidosti. Siinä on kuitenkin yleensä pitäydytty vain yhden pituusprofiilin tarkasteluun eikä poikkisuuntaisen tiedon vaikutusta pinnan ominaisuuksiin ole tasaisuustunnusluvun alueella käytetty.
 - Tämä periaate tuottaa paremmin tien pinnan ominaisuuksia kuvaavia tunnuslukuja ja se kohdistaa ominaisuudet oikeille paikoille.
 - Sen puutteena on poikkisuuntaisen informaation pois jättäminen
- Kehitetään ajoneuvosimulointia eteenpäin siten, että ajoneuvomallina on paremmin todellisuutta vastaava ajoneuvo, paremmin todellisia nopeuksia vastaava simulointinopeus ja monipuolisempi tien profiilitieto. Molempien ajoerien profiilitieto mahdollistaa sivuttaisliikkeisiin perustuvien tunnuslukujen laskemisen ja pituusprofiilin tarkasteleminen neljän pisteen avulla mahdollistaa nyökkimisliikkeen laskemisen. Ajoneuvosimulointi täysautomallilla tuottaa kokonaisvaltaisemman kuvan tien pinnasta, mutta tulos on sidoksissa simulointimalliin.

- Tämä periaate tuottaa parempia tienkäyttäjän kokemusta kuvaavia tunnuslukuja.
- Siinä otetaan huomioon myös poikkisuuntainen epätasaisuus.
- Tunnusluvun vaikutusmatka ja sen kohdistuminen voivat poiketa siitä missä vaikutuksen aiheuttanut tien kohta oli.

Ensimmäisen vaihtoehdon mukaisia tunnuslukuja ovat erilaiset profiilin aallonpituus-tarkastelut. Näitä ovat jo nyt mitattavat ja laskettavat RMS-tunnusluvut (8 kpl), jotka lasketaan molemmista ajourista neljälle eri aallonpituusalueelle (RMS1_O/V, RMS3_O/V, RMS10_O/V ja RMS30_O/V). Sen lisäksi on mahdollista tuottaa uusia tunnuslukuja aallonpituusanalyysillä (Wave Band Analysis). Siinä tuotettuja tunnuslukuja ovat SW-, MW-, LW-, LPV3-, LPV10-, LPV30-, WLP_Sigma- ja WLP_Delta-tunnusluvut (8 kpl), joiden laskentaperiaatteet on määritetty IRI:n laskentastandardin yhteydessä. Niitä ei ole kovin paljoa tutkittu.

Toisen vaihtoehdon mukaisia tunnuslukuja ovat erilaisten ajoneuvomallien avulla saatavat simulointivasteet. Ajoneuvomalleja voidaan kehittää paremmiksi ja vasteiden valikoimaa voidaan täydentää. Vasteiden mahdollisia laskentakohtia ovat akseli, kori ja kuljettaja. Suomessa on jo kehitetty täysautomallilla laskettavat tunnusluvut (7 kpl), jotka saadaan ajoneuvon korin eri liikesuuntien liikekiihtyvyyksistä. Liikekiihtyvyyksien on todettu vastaavan paremmin ihmisen kokemaa ajomukavuutta kuin mitä pelkkä pystysuunnan liikkeen määrä vastaa. Lisäksi akseleista (pyöristä) lasketut tunnusluvut ovat käyttökelpoisia, kun tarkastellaan ajoneuvon vaikutusta tierakenteisiin.

Tässä työssä tarkasteltiin molempien vaihtoehtoja mukaisia tunnuslukuja lyhyemmällä 10 metrin laskentapituudella.

Epätasaisuutta tarkasteltiin hakemalla kohteita sen mukaan, minkälaista niiden epätasaisuus oli. Tavoitteena oli hakea tunnuslukuja erityyppisille epätasaisuuksille tarkastelemalla tunnuslukuja eri kohteilla:

- Uusien päällysteiden epätasaisuus (tasainen tie)
- Yksittäisepätasaisuuksia sisältävien kohteiden epätasaisuus (KT 50)
- Painumakohtien epätasaisuus (KT55 & MT 170)
- Hyvin epätasaisen tien epätasaisuus (VT6)
- Haitallisia poikkihalkeamia sisältävän tien epätasaisuus (ei tarkasteltu)

Tarkastelumenetelminä oli tunnuslukujen profiilien graafinen tarkastelu, ryhmittely-analyysi sekä tilastollisen prosessinohjauksen ohjauskortit. Tarkastelumenetelmillä haettiin seuraavia asioita:

- **Graafinen tarkastelu** tuotti visuaalista tietoa siitä miten tunnusluku reagoi tiettyyn epätasaisuutta sisältävään tien kohtaan. Sen avulla haettiin tuntumaa siihen, miten tunnusluku käyttäytyi yksittäisissä kohdissa. Sen avulla ei kuitenkaan pystytty tekemään tai edes yritetty välttämättä tehdä kovin yksityiskohtaisia johtopäätöksiä.
- **Ryhmittelyanalyysillä** tarkasteltiin koko tien epätasaisuustunnuslukujen skaala ja haettiin vastausta siihen mitkä tunnusluvut kuvaavat samaa asiaa, mitkä tunnusluvut sijoittuvat eri ryhmiin ja kuinka monta ilmiötä tien epätasaisuudessa oli.

- **Tilastollisen prosessinohjauksen** avulla haettiin kullekin tunnusluvulle sen tyypillisen vaihtelun ja erityisvaihtelun erottavia raja-arvoja ja siten tunnusluvun kykyä erottaa tietyn epätasaisuustyypin olemassaolo tarkasteltavana olleella kohteella.

Ryhmittelyanalyysillä tarkasteltiin tiettyä kohdejoukkoa, joka koostui viidestä päätiekohteesta (vt3, vt 6, vt 7, kt 50 ja kt 55) ja yhdestä maantiekohdeesta (mt 170). Sen avulla tutkittiin miten monta pituussuuntaiseen tasaisuuteen liittyvää ”ilmiötä” kyseisessä aineistossa oli ja miten eri tunnusluvut ryhmittyivät. Ryhmittelyanalyysistä saatiin seuraavia tuloksia:

- Tien pituussuuntainen profiilitieto sisälsi vähintään neljä eri ilmiötä, joita ei voitu yhdistää toisiinsa. Niitä olivat pinnan karkeus, pituuskaltevuus, epätasaisuus ja mäkisyys.
- Ryhmittelyanalyysi järjesti tunnusluvut niiden aallonpituusalueen määräämään järjestykseen, mikä viittaa siihen, että juuri aallonpituus on keskeinen tasaisuuteen liittyvän ilmiön mittari.
- Kun tien pelkkä tasaisuus ryhmiteltiin neljään ryhmään, niin ryhmiä olivat
 - lyhytaaltainen epätasaisuus (RMS/WBA/LPV) yhdessä IRI:n kanssa,
 - keskiaaltoiset epätasaisuustunnusluvut (RMS/WBA/LPV),
 - RIDE-tunnusluvut
 - pitkäaaltoiset tunnusluvut.
- Aallonpituusanalyysien lyhyt-, keskipitkä- ja pitkäaaltoiset tunnusluvut ryhmittyivät aallonpituusalueen mukaisesti ryhmiin. Ts.:
 - WBA_SW vastasi WBA_LPV3,
 - WBA_MW vastasi WBA_LPV10 ja
 - WBA_LW vastasi WBA_LPV30.
- Ajoneuvosimulointien liikesuuntien kiihtyvyyttunnusluvut vastasivat jousituksesta ja akselistosta laskettavia tunnuslukuja. Ts.:
 - korin pystykiihtyvyys (VERT_a_std) vastasi ajoneuvon tiehen kohdistamaa rasitusta (ESAL_std),
 - sivuttaisheilahduskiihtyvyys (ROLL_a_std) vastasi pyöräpainon siirtymää puolelta toiselle (LTR_std)
 - korin nyökkimiskiihtyvyys (PITCH_a_std) vastasi iskunvaimentimissa tehtyä työtä (Ityö).

Tilastollisen prosessinohjauksen ohjauskorteilla tarkasteltiin tunnuslukujen arvojen vaihtelua erilaisilla kohteilla ja poikkeuksellisten kohtien erottelukykyä. Ohjauskorttityyppi oli IM-yksittäishavaintojen kortti. Kukin tunnusluku laitettiin omalle kortilleen tieosa tai sen osa kerrallaan. Kortilla nähtiin yksittäisten havaintojen arvot sekä niistä laskettu keskiarvo ja sen normaalin vaihtelun raja-arvot. Epänormaalien arvojen tunnistamisessa käytettiin kriteeriä numero yksi (=kolmen hajonnan rajat) ja sen yläohjauksirajaa. Epänormaalien kohtien määrää ja sijoittumista tarkastelemalla tehtiin johdopäätöksiä siitä, miten kukin tunnusluku löysi ilmiöitä.

Kaikille tunnusluvulle oli tyypillistä, että ne tavalla tai toisella reagoivat poikkeuksellisiin kohtiin. Toisinaan tunnusluku reagoi hyvin ja toisinaan lievemmin. Reagoinnin selkeys riippui tunnusluvun aallonpituusalueesta ja poikkeuksellisen tienkohdan epätasaisuuden tyypistä.

Kaikki tunnusluvut reagoivat yksittäisepätasaisuuksiin. PTM- ja WBA-tunnusluvut reagoivat tunnistaen pituusprofiilista poikkeuksellisia kohtia. RIDE-tunnusluvut reagoivat niihin ajoneuvomallin kautta. RIDE-tunnusluvuissa on mukana ajonopeuden vaikutus ja tien epätasaisuuden haitallisuus ts. haitalliset epätasaisuudet näkyivät suurina tunnuslukujen arvoina ja lievät pienempinä riippumatta siitä, kuinka vakava tien epätasaisuus profiilista katsottuna oli.

Painumien alku- ja loppupisteet näkyivät tunnusluvuissa hyvin. Painumien alku- ja loppukohtien välistä aluetta ei tunnistettu juuri ollenkaan.

Epätasainen tie näkyi kaikissa tunnusluvuissa. Eniten epätasaisia (poikkeuksellisia kohtia) kohtia tunnistettiin RIDE-tunnuslukujen ja IRI_10:n avulla. Tosin tunnuslukujen paremmuutta oli hankala arvioida kyseisellä kohteella, koska tuntuma sen epätasaisuuteen oli saatu vain yhden ajon perusteella melko kauan ennen tätä työtä.

Tilastollisen prosessinohjauksen tuloksissa näkyi sama asia kuin ryhmittelyanalyysissä eli tiettyjen tunnuslukujen informaatio oli hyvin samanlaista. Ts. tunnusluvut kuvasivat samaa ilmiötä. Esimerkiksi aallonpituusanalyysien tunnusluvuista voidaan olla melko varmoja siitä, että SW/MW/LW vastaavat melko hyvin LPV3/LPV10 ja LPV30 -tunnuslukuja kukin aallonpituusalueensa mukaisesti. Vastaavasti RIDE-tunnusluvuissa pystykiihtyvyydestunusluvun kanssa yhtenäinen oli tierasitus, sivuheidustunusluvun kanssa yhtenäinen oli pyöräpainon siirtymä ja vastaavasti nyökkimistunusluvun kanssa yhtenäinen oli iskunvaimentimien työ. IRI_10-tunnusluvussa on hyvin paljon samaa lyhytaaltoisten RMS-tunnuslukujen (RMS1 ja >RMS3) kanssa, mutta siitä näytti puuttuvan kuitenkin megakarkeuden alue. Vastaavasti siinä on vain lievästi mukana pitkäaaltoinen epätasaisuus.

Lähteet

1. Petteri Haapanen, Pertti Virtala (2016): *Asfalttipäällysteiden tasaisuustunnusluku. Uudet päällysteet*. Liikenneviraston selvityksiä 13/2016.
2. Pertti Virtala, Eetu Hurtig (2012): *Tien haitallisten pituuskaltevuusmuutosten tunnistaminen*. Liikenneviraston selvityksiä 22/2012.
3. Jussi Leinonen, Mika Jaakkola, Heikki Onninen (2015): *Ajoneuvolaserkeilaus tien painuman mittauksessa*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 8/2015.
4. Kalervo Mattila, Seppo Järvinen (2006): *Poikkihalkeamien tasaisuus*. Tiehallinnon selvityksiä 44/2006.
5. *Standard Practice for Evaluating Faulting of Concrete Pavements*. AASHTO R 36-13. Standard by American Association of State and Highway Transportation Officials, 2013.
6. Pertti Virtala, Pauli Alanaatu, Timo Eskola (2016): *Tien epätasaisuustunnusluvun kehittäminen. RIDE-ajoneuvomalli*. Liikenneviraston selvityksiä 46/2016.
7. Elli Angelopoulou, John R. Wright Jr. (1999): *Laser Scanner Technology*. University of Pennsylvania. *ScholarlyCommons*. 1999.
8. *Minitab 17. Users Guide*. 2016.
9. Road and airfield surface characteristics — Test methods — Part 5: Determination of longitudinal unevenness indices. prEN 13036-5:2014 (E).
10. State of the Art in Monitoring Road Condition and Road/Vehicle Interaction. Technical Committee 4.2. Road Pavements. World Road Association. 2016.

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-350-7

www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto

