

PERTTI VIRTALA
EETU HURTIG

Tien haitallisten pituuskaltevuus- muutosten tunnistaminen



Pertti Virtala, Eetu Hurtig

Tien haitallisten pituuskaltevuus- muutosten tunnistaminen

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2012

Liikennevirasto

Helsinki 2012

Kannen kuva: Pertti Virtala, mt 104

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-167-2

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Pertti Virtala, Eetu Hurtig: Tien haitallisten pituuskaltevuusmuutosten tunnistaminen. Liikennevirasto, väylätekniikkaosasto. Helsinki 2012. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2012. 70 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-167-2.

Avainsanat: tienpito, tunnusluvut, tien kunto

Tiivistelmä

Tienpinnan pituussuuntaiset epätasaisuudet vaikuttavat tiellä liikkuviin ajoneuvoihin lisäten ajoneuvojen kulumista, polttoaineen kulutusta, onnettomuusriskiä ja ajamisen epämukavuutta. Suomessa teiden epätasaisuus on otettu huomioon väylien ylläpidossa kansainvälisesti yleisesti käytössä olevalla epätasaisuutta kuvaavalla indeksillä, IRI (International Roughness Index). Indeksi on alun perin Maailman Pankin kehittämä, 1960-luvun amerikkalaisen henkilöauton yhden pyörän massa-jousitusjärjestelmän pystysuuntaisista liikkeistä laskeva tunnusluku. Teiden pintaprofiilit ovat aluksi tasaisia ja oikean muotoisia, mutta ne muuttuvat ajan ja liikenteen vaikutuksesta epähomogeenisemmiksi heikentäen sen tien käyttäjille tarjoamaa palvelutasoa. Käytössä ollut tunnusluku on ensimmäinen ajodynamiikkaan perustuva tunnusluku, mutta se ei tunnista kaikkia varsinkaan raskaille ajoneuvoille tyypillisiä heilahdusliikkeitä ja siksi onkin ollut tarpeen selvittää tunnuslukuvalikoiman monipuolistamista ottamalla ajoneuvojen dynaaminen käyttäytyminen paremmin huomioon.

Työn ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin maailmalla käytössä olevia teiden epätasaisuutta kuvaavia muita tunnuslukuja ja niiden käyttökelpoisuutta. Erytishuomiota kiinnitettiin pituussuuntaisten painumien tunnistamiseen. Tunnuslukuja lähtötietona on käytettävissä teiden palvelutasomittauksissa saatava pintaprofiili. Tähän pintaprofiiliin on sijoitettavissa niin erilaiset tunnuslukuja laskentamallit kuin ajoneuvojen liikesimuloinnitkin. Tuloksena syntyi lista ns. tiemuuttujista ja ajoneuvodynamiikan tuottamista tunnusluvuista, joiden paremmuutta painumakohtien tunnistamisessa tulisi verrata. Tällaisia tiemuuttujia ovat tien pituuskaltevuus ja eri aallonpituusalueille lasketut epätasaisuuksien RMS-arvot. Vastaavasti ajoneuvodynamiikan tuottamia tunnuslukuja ovat neljännesautomallin, puolijoneuvomallien ja täysajoneuvomallien tuottamat eri liikesuuntiin liittyvät tunnusluvut. Pituussuuntaisiin painumiin liittyy tärkeimpänä täysajoneuvomallin tuottama nyökkimisliike. Tätä tunnuslukua ei voida tuottaa esim. neljännesautomallilla, koska siinä ei ole kahta peräkkäistä pyörää akselivälin päässä toisistaan. Neljännesautomallin tuottaman tunnusluvun lisäksi on ollut käytössä eräiden pintaprofiilia kuvaavien RMS-arvojen perusteella tuotettu ns. pituusheittoriskiä kuvaava tunnusluku, joka tunnistaa painumakohtia vain rajoitetusti.

Työssä kehitettiin ajoneuvomalli, jolla voidaan simuloida ajoneuvon käyttäytymistä palvelutasomittausten perusteella tuotetulla pintaprofiililla. Ajoneuvomallina käytettiin 18 t kuorma-autolle tehtyä täysautomallia. Työn toisen vaiheen päätavoite oli mallin verifiointi. Verifiointi suoritettiin kaksivaiheisena, joista ensimmäinen oli pöytätestaus, missä todettiin, että malli käyttäytyy annetuilla malliprofiileilla loogisesti. Toisessa verifiointivaiheessa verrattiin mallilla saatujen tunnuslukuja painumakohtien tunnistuskykyä ja niiden paremmuutta perinteisten tietunnuslukuja tunnistuskykyyn. Tunnistuskky määritettiin siten, että haettiin kullekin tunnusluvulle sellainen raja-arvo, jolla se tunnistaa maastossa havaitut painumakohtat parhaiten. Parhaimmaksi ajoneuvodynamiikan perusteella tuotetuksi tunnusluvuksi osoittautui nyökkimiskulman hajonta, jolla painumakohtien tunnistustarkkuus oli 76 % ja painumia sisältämättömien kohtien tunnistustarkkuus 81 %. Perinteisille pitkäaaltoisille tietunnusluvuille (RMS10 ja RMS30) saatiin kuitenkin parempi tunnistustarkkuus. Paras tunnusluku oli viiden RMS30-havainnon liukuva hajonta, jolla tunnistustarkkuudet olivat (90, 82). Tarkkuus oli sen verran parempi, että painumakohtien tunnistamisessa suositellaan käytettäväksi sitä.

Pertti Virtala, Eetu Hurtig: Oegentligheter i vägars longitudinella profil. Trafikverket, infrastrukturteknik. Helsingfors 2012. Trafikverkets undersökningar och utredningar 22/2012. 70 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-167-2.

Sammanfattning

Oegentligheter i vägars longitudinella profil ger ökat obehag för trafikanter, slitage av fordon och däck och i vissa fall minskar det våghållningen hos fordon och orsakar trafikolyckor. Under de senaste åren har antalet olyckor med tunga fordon noterats. Ett behov att undersöka vägprofiler närmare har fastställts. I många studier har behovet av användning av speciell fordonsdynamik införts.

Underhåll av belagda vägar i Finland har grundats på att främst fokusera på två viktiga villkorsparametrar som är spårdjup och IRI (International Roughness Index). Men IRI är en variabel som beskriver komforten att köra med en personbil och framför inte alla trafikanters synpunkter. Den beräknas av ett relativt brett våglängdsområde och tar därför inte nödvändigtvis reda på vissa långa vågors oregelbundenheter. Moderna profilografer med laser sensorteknik producerar massor av information om vägytan. En tioårs historia av RMS-värden för olika våglängder lagras i databaser hos finska Vägverket. Dessa våglängder är 0,5-1 m, 1-3 m, 3-10 m och 10-30 meter. Det har inte funnits någon bredare användning av dessa variabler. Ett intresse av att studera dessa variabler har märkts.

För två år sedan gjordes en studie där en dynamisk modell har utvecklats för att kunna beräkna det dynamiska beteendet av lastbilar på grund av oegentligheter i tvärsnitt av en trottoar. Denna studie gav lovande resultat och det beslutades att fortsätta med att på liknande sätt studera långsgående ojämnheter i vägprofiler. Denna studie handlar om att ta reda på hur lastbilar beter sig på vägar där det finns betydande långvågs sättningar. En studie var utformad där en vägsträcka mättes med profilografer. Alla tänkbara variabler i längdriktningen beräknades och en dynamisk ”7 graders frihet lastbil” utvecklades och beteendet från lastbilen simulerades med profildata från mätningarna.

En fältstudie gjordes för 43 provsträckor och svårighetsgraden av sättningarna utvärderades. Tio meter långa sektioner av provsträckorna delades in i fyra avvecklingsklasser beroende på svårighetsgrad. En studie gjordes där varje variabel av tillståndsdata och de simulerade responsdata jämfördes. Det mest betydande sambandet mellan data och svårighetsgraden studerades för att vara på långvågs RMS-värden av vägprofiler. Den bästa variabeln var standardavvikelsen för fem flytande RMS₃₀ värden (10 m), och de näst bästa variabler var RMS₃₀ och RMS₁₀.

Den bästa responsvariabeln av fordonsdynamik korrelerat till graden av sättningar var standardavvikelsen av släng hastighet (std of pitch velocity) och abs av släng hastighet (abs of pitch velocity). Inledningsvis förväntades ett resultat där responsvariablerna av simuleringarna skulle ha den bästa korrelationen mellan svårighetsgraden av sättningar, men detta antagande var fel. Långvågiga RMS-värden för vägens långsgående profiler var relativt signifikanta variabler och det är därför som dessa variabler rekommenderas för användning med de aktuella IRI-värden.

Fordonsdynamik och simulering av hur bilar och lastbilar beter sig är ett intressant område och det rekommenderas att föras in i väg studier. Flera funktioner i modeller och beräkningsmetoder kan förbättras. Den faktiska hastigheten hos varje vägvägsnitt rekommenderas för användning i simuleringar i stället för konstant hastighet. Simuleringens hastigheter i början av en vägsektion rekommenderas att sättas utgående från noll för att undvika alltför hög respons av en dynamisk modell.

Pertti Virtala, Eetu Hurtig: : Defining the unwanted longitudinal variation of a road. Finnish Transport Agency, Infrastructure Technology. Helsinki 2012. Research reports of the Finnish Transport Agency 22/2012. 70 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-167-2.

Summary

Irregularities in longitudinal road profile are affecting to road users increasing discomfort, wear and tear of vehicles and tires and in some cases decreasing handling properties of vehicles and causing traffic accidents. During the last years the amount of accidents of heavy vehicles has been noticed. A need to search road profiles in more detail has been recognised. In many studies the need of use of especially vehicle dynamics is introduced.

Preservation of paved roads in Finland has been based mostly in focusing on two main condition parameters which are rut depth and IRI (International Roughness Index). However IRI is a variable describing the comfort of driving with a person car and not bringing all views of road users. It is calculated of a relatively wide wavelength range and therefore it does necessarily not find out certain long wave irregularities. Modern high speed profilographs with laser sensor technology are producing lots of information of the surface of a road. A ten years history of RMS-values of different wavelengths is stored into the data bases of Finnish Transport Agency. Those wavelengths are 0,5-1 m, 1-3 m, 3-10 m and 10-30 m. There has not been any wider use of those variables. An interest of studying those variables has been wakened.

Two years ago a study was made where a dynamic model was developed to be able to calculate the dynamic behaviour of trucks due to the irregularities in cross section of a pavement. That study brought promising results and it was decided to continue a similar way to study longitudinal irregularities in road profiles. This study is all about of finding out how trucks are behaving in roads where there are significant long wave settlements. A study was designed where a sample road network was measured with high speed profilographs. All possible variables in longitudinal direction were calculated and a dynamic 7 degrees of freedom truck model was developed and the behaviour of truck was simulated using the profile data from measurements.

A field survey was made for 43 test sections and the severity of settlements was evaluated. Ten meter sections of sample road network were classified into four settlement classes according to the severity. A study was made where each variable of condition data and the simulated response data were compared. The most significant relation between data and settlement severity was studied to be on long wave RMS-values of road profiles. The best variable was the standard deviation of five floating RMS₃₀ values (10 m), and the next best variables were RMS₃₀ and RMS₁₀.

The best response variable of vehicle dynamics correlating to the severity of settlements were standard deviation of pitch velocity and abs of pitch velocity. Initially it was expected to get a result where the response variables of simulations would have the best correlation of severity of settlements but that assumption was wrong. Long wave RMS-values of road longitudinal profiles were relatively significant variables and that is why those variables are recommended to be used with the current IRI-values.

However vehicle dynamics and simulation of the behaviour of cars and trucks is an interesting area and it is recommended to be brought into road studies. Several features in models and calculation procedures can be improved. The actual speed of each road section is recommended to be used in simulations instead of constant speed. The simulation speeds in the beginning of a road section is recommended to be starting from zero to avoid too high response of a dynamic model. Lateral dimension and lateral vehicle dynamics is a challenge in modelling and calculations as well.

Esipuhe

Tien pinnan pituussuuntainen epätasaisuus vaikuttaa tiellä liikkujiin ja tiehen itseensä. Tässä projektissa etsittiin ja testattiin tunnuslukuja, joilla on mahdollista tunnistaa tien pituussuuntaisia epätasaisuuksia ja etenkin painumia. Uusia tunnuslukuja haettiin ajoneuvodynamiikan avulla, koska haluttiin selvittää minkä tyyppiset epätasaisuudet tai painumat ovat ajoneuvolle haitallisimpia.

Työtä on ohjannut työryhmä, jossa ovat jäseninä Sami Petäjä, Kari Lehtonen, Pentti Salo, Juho Meriläinen ja Vesa Männistö Liikennevirastosta. Raportin ovat kirjoittaneet Pertti Virtala ja Eetu Hurtig Destiasta. Työn kirjallisuuskatsauksen, alkuosan ja ajoneuvomallin muodostamisen on tehnyt Eetu Hurtig. Tunnuslukujen tuottamisen ja vertailun ja työn loppuun saattamisen on tehnyt Pertti Virtala.

Helsingissä kesäkuussa 2012

Liikennevirasto
Väylätekniikkaosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
1.1	Tausta	9
1.2	Tavoite	10
1.3	Rajaus	11
2	PTM-SOVELTUVUUS PAINUMIEN MITTAAMISEEN	12
2.1	Pintaprofiilin mittaus	12
2.1.1	Kohdistuvuus	12
2.1.2	Toistettavuus	14
2.1.3	Tarkkuusvaatimukset	14
2.2	Epätasaisuustunnuslukujen mittaus	15
2.2.1	Kohdistuvuus	15
2.2.2	Toistettavuus	15
3	PAINUMIEN VAIKUTUKSET	17
3.1	Tierakenteen vaurioituminen	19
3.2	Ajokustannukset	21
3.3	Liikenneturvallisuus	21
3.4	Tiellä liikkujan terveys ja ajomukavuus	22
3.5	Lainsäädännön asettamat rajat tärinälle	22
4	NYKYINEN LASKENTAMENTELMÄ JA RAJA-ARVOT	24
4.1	Pituuskaltevuuden arviointimenetelmä	24
4.2	Nyky menetelmän kyky kuvata ajomukavuutta	25
5	PAINUMATUNNUSLUKUJA	26
5.1	Mittaustavat	26
5.1.1	Hanketason painumamittaus	26
5.1.2	Painumien mittaaminen verkkotasolla	26
5.2	Määrittämenetelmiä	27
5.2.1	Pituusprofiiliin pohjautuvat määrittämenetelmät	27
5.2.2	Pintaprofiilien spektrianalyysit	31
5.2.3	Palvelutasoindeksit	32
5.2.4	Ajoneuvovasteet	33
5.2.5	Tierasitus	33
5.2.6	Yhteen veto	34
6	AJONEUVOMALLI	36
6.1	Ajoneuvon liikesuunnat	36
6.2	Käytettävissä olevia malleja	36
6.3	Valittu ajoneuvomalli	38
6.3.1	Ajoneuvomalli	38
6.3.2	Ajoneuvotyypit ja niiden parametrit	39
6.3.3	Malliin syötettävä heräte	39
6.3.4	Vasteiden laskenta	40
7	MALLIN TULOKSET	42
7.1	Pöytätestaus	42
7.2	Graafinen tarkastelu	43
7.2.1	Tasainen valtatie	43

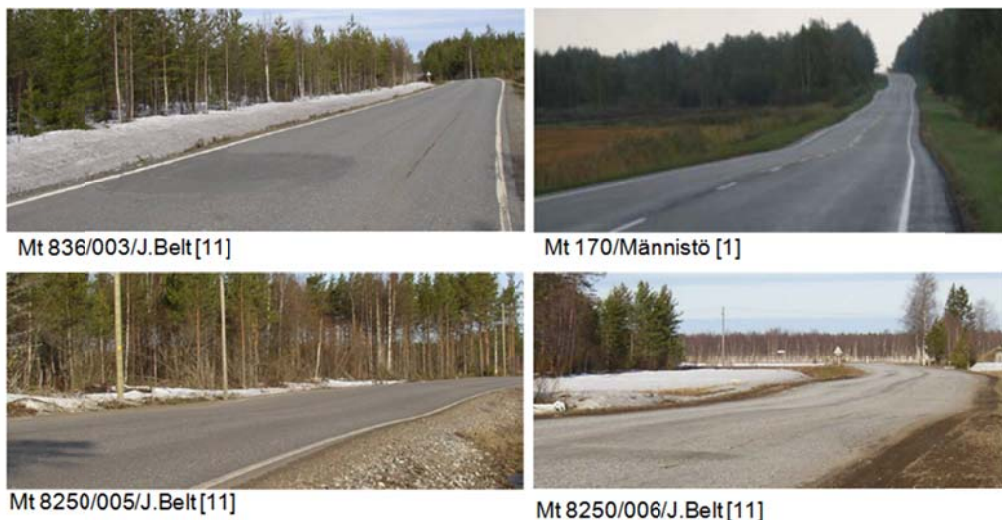
7.2.2	Painumia sisältävä maantie 104	44
7.2.3	Painumia sisältävä maantie 170	46
7.2.4	Jyrkän painuman sisältävä kohde.....	48
8	TUNNUSLUKUJEN VERTAILU	53
8.1	Vertailtavat tunnusluvut.....	53
8.2	Kohteet ja niiden valinta	54
8.3	Kohteiden maastokatselmus	56
8.4	Painumien tunnistuskyky	58
8.4.1	Aineisto	58
8.4.2	Menetelmä	61
8.4.3	Tietunuslukujen painumientunnistuskyyky	62
8.4.4	Ajodynamiikkatunuslukujen painumientunnistuskyyky	63
8.5	Tunuslukujen raja-arvot	64
8.6	Tunuslukujen paremmuus	66
8.7	Tunuslukujen käyttö	67
9	YHTEENVETO JA SUOSITUKSET	68
	LÄHTEET	70

1 Johdanto

1.1 Tausta

Teiden ylläpidossa tarvitaan tietoa tiestön kunnosta ja sen vaikutuksista tienkäyttäjiiin. Tehokkaan ylläpidon kannalta ovat keskeisiä tiestön tilan tunteminen, tilan ja käyttäjävaikutusten tunteminen sekä tiestön tilan ja tienpitotoimien välisen yhteyden hallinta. Teiden ylläpidossa siirryttiin jo 1980-luvun lopulla mittausten perusteella tapahtuvaan toiminnansuunnitteluun, mikä paransi tiestön tilaan liittyvää tietämystä ja yhtenäisti rahoitustarpeiden arviointia ja alueellista toimenpideohjelmointia. Mittaustekniikan kehittyminen mahdollisti 2000-luvun alussa monipuolisemman tiedon tuottamisen, mutta tien kuntoa on kuvattu toistaiseksi pääasiasa uraisuudella ja epätasaisuudella, jotka kuvaavat tien tilaa lähinnä henkilöautojen kannalta. Kunnan kuvaaminen monipuolisemmin on nähty tarpeelliseksi. Lisäksi tarvetta uusille näkökulmille kuntotilan kuvaamisessa on havaittu myös tienrakennus- ja parannustöiden laadunvalvonnan kannalta. Urakoiden takuuajat ovat pitkiä ja teiden kunnolle halutaan asettaa selkeitä ja helposti mitattavia vaatimuksia, jotka tien on takuuajana täytettävä. Infra-RYL:ssä ns. toiminnallisia laatuvaatimuksia on yksin päällysteelle noin 20 kpl.

Tiestön kunto vaikuttaa liikenneturvallisuuteen, liikenteen kustannuksiin ja tienkäyttäjien terveyteen. Huonokuntoisen tien vaurioituminen on nopeampaa kuin hyväkuntoisen tien. Paremmin tienkäyttäjän kokemaa/havaitsemaa tien kuntoa kuvaavat tunnusluvut ovat täten tarpeellisia. Ruotoistenmäki (2005) listaa tutkittavaksi asiaksi sen, että löydettäisiin sellaisia tunnuslukuja, joilla on yhteys sekä kuljettajien ja matkustajien kokemaan ajomukavuuteen että epätasaisuuden syihin (liikennekuormitus, ilmasto pohjamaa).



Kuva 1. Esimerkkejä painumakohteista.

Tiet on rakennettu palvelemaan sekä henkilö- että tavaraliikenteen tarpeita. Siksi onkin tärkeä ottaa huomioon tien kunnan vaikutus tiellä liikkujiin. Tienpinnan profiili pystytään mittaamaan nykyisillä mittauslaitteilla 17 eri pituussuuntaista linjaa pitkin. Mittauksen yhteydessä on käytettävissä hyvin tihevälinen lähtötieto, jota joudutaan tietojen jalostusvaiheessa ja muita tunnuslukuja laskettaessa keskiarvoistamaan. Ny-

kyisillä tietokoneilla on mahdollista simuloida tienpinnan vaikutuksia ajoneuvon käyttäytymiseen ja täten arvioida tien kuntoa uudella tavalla. Tiheään mitatun pituusprofiilin ja dynaamisten todellisuutta kuvaavien ajoneuvomallien yhdistäminen on mahdollista. Mittauksilla tuotettavien tunnuslukujen käyttökelpoisuutta pystytään siten lisäämään aiempiin verrattuna.

Kaksi vuotta sitten aloitettiin työ tien sivukaltevuuden ja raskaan ajoneuvon välisen heilahtelun mallintamiseksi diplomityönä. Siinä käsiteltiin raskaan ajoneuvon sivutaisheilahtelua ja tien sivukallistusten vaikutusta heilahteluun. Tämä työ on luonteva jatke sille siten, että tarkastelusuunta muutetaan pituussuuntaiseksi ja tutkitaan pituussuuntaisten epäsäännöllisyyksien vaikutusta ajoneuvon liikkeisiin.

1.2 Tavoite

Tämän työn tavoitteena on kehittää tien pituuskaltevuudelle tunnusluku ja määrittää sille sellaiset raja-arvot, joilla tunnistetaan sellaiset pituuskaltevuuden muutokset, jotka ovat haitallisia tai epämukavia. Tämä projekti koostuu kahdesta osasta. Työn ensimmäisessä osassa selvitettiin kirjallisuudesta tienpinnan pituuskaltevuuden vaikutuksia liikenneturvallisuuteen, ajokustannuksiin, tierakenteeseen ja tiellä liikkujan terveyteen. Lisäksi rakennettiin ajoneuvomalli, jolla voidaan simuloida tienpinnan pituuskaltevuuden vaihtelun vaikutusta ajoneuvon.

Työn toisessa vaiheessa testattiin tunnuslukuja, jolla pyrittiin löytämään haitalliset pituuskaltevuuden muutokset PTM-mittauksista saatavan informaation avulla. Työn tavoite on kiteytetty oheisessa kappaleessa:

”Työn tärkein tavoite on kehittää tunnusluku äkillisen pituuskaltevuuden muutoksen tunnistamiseen (painuma). Kaltevuuden muutos on tällainen indikaattori. Emme ole riippuvaisia nykyisin käytössä olevista tunnusluvusta vaan tunnusluvusta jonka haitallisuus pystytään määrittämään AJODYNAMIIKAN tmv. perusteella sekä jolle pystytään antamaan raja-arvoja (ainakin skaalalla hyvä, tyydyttävä, erittäin haitallinen). Pyörityssäteen liittäminen tarkasteluihin on enemmän hienosäätöä eikä sitä tarvitse ottaa tässä huomioon. Kertauksena vielä, että emme ole riippuvaisia kaltevuuden muutoksesta mikäli jollain toisella tunnusluvulla sama ilmiö pystytään selittämään paremmin ja varsinkin yhteys ajodynamiikkaan saadaan paremmin haltuun. Alun perin lähdimme kehittämään PTM-mittausta korvaamaan vaaitusta kaltevuudenmittauksen korvaajana. Mikäli tunnusluku olisi joku toinen kuin kaltevuuden muutos, niin alkuperäinen tavoite tulisi myös saavutettua.”

1.3 Rajaus

Työn ensimmäiseen osavaiheeseen kuului diplomityössä ”*Raskaan kaluston kallisteluvoimakkuuden arvioiminen tienpinnan profilista*” luodun raskaan kaluston sivuttaista heilahtelua kuvaavan ajoneuvomallin ”kääntäminen” pitkittäistä heilahtelua kuvaavaksi. Ajoneuvosimuloinneissa ajoneuvotyyppi ja simulointinopeus ovat valittavissa, mutta tässä työssä keskityttiin käyttämään kuorma-autoa (ilman perävaunua) ja simulointinopeutena käytettiin 80 km/h. Simuloinneista jätettiin pois tieosakohtaisen nopeusrajoituksen huomioon ottaminen, koska se olisi edellyttänyt monimutkaisempaa mallia. Simulointinopeutena tulisi käyttää ajoneuvojen todellisia nopeuksia ja mm. tieosien alut pitäisi simuloida lähtien nollanopeudesta, mutta siihen pätee sama mitä edellä muihinkin nopeuden muutoksiin.

Ajoneuvon liikkeitä simuloitiin vain pystysuuntaista liikettä sekä nyökkimisliikettä. Vaakasuuntainen liike ja erityisesti ohjausliikkeisiin, pitoon ja kaarregeometriaan liittyvät liikkeet edellyttävät monimutkaisempaa mallia.

Tien kuntomuuttujien tarkastelussa rajoituttiin olemassa oleviin muuttujiin eikä esim. kehitetty uusia.

2 PTM-soveltuvuus painumien mittaamiseen

Tien painumamittaukset suoritetaan nykyään pääosin vaaitusmittauksin. Menetelmän huonoja puolia ovat hitaus, kalleus ja liikennehaitat. Vaaitusmittaus haluttaisiin korvata tehokkaammalla ja liikenteen kannalta sujuvammalla menetelmällä. Erilaisia dynaamisia mittaamenetelmiä on tutkittu mm. lähteessä ”*Painumaprofiilin dynaaminen määrittäminen, ISSN 1459-1561*”. Tutkimuksessa palvelutasomittausten todettiin soveltuvan myös painumien mittaamiseen. Tärkeimmät mittaustarkkuuteen liittyvät vaatimukset ovat mittausten kohdistuvuus ja toistettavuus.

2.1 Pintaprofiilin mittaus

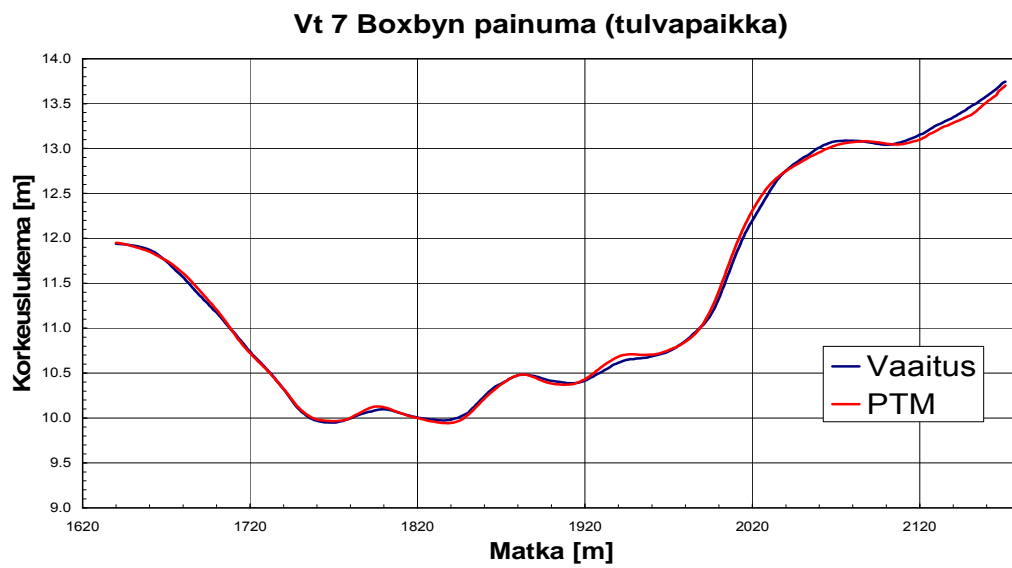
2.1.1 Kohdistuvuus

Palvelutasomittauksella saadun korkeusprofiilin tarkkuutta (kohdistuvuutta) on tutkittu edellä mainitussa työssä vertaamalla sitä vaaituksella saatuun korkeusprofiiliin. PTM-mittauksen ja vaaituksen väliset erot olivat maantiellä 170 tieosalla 8 (Boxin kohteella) maksimissaan 8,9 cm. Toisella kohteella maantiellä 140 tieosalla 1 (Fiskarsin kohteella) ero oli maksimissaan 15,8 cm. Suurimmat poikkeamat esiintyvät satunnaisesti mittausalueella. Voidaan kuitenkin olettaa, ettei niillä ole merkittävää vaikutusta ajoneuvon käyttäytymiseen. Ajoneuvon käyttäytymiseen vaikuttavat voimakkaimmin korkeusprofiilin muutokset, eivätkä suurimmat erot ole riippuvaisia korkeusprofiilin muutoksista.

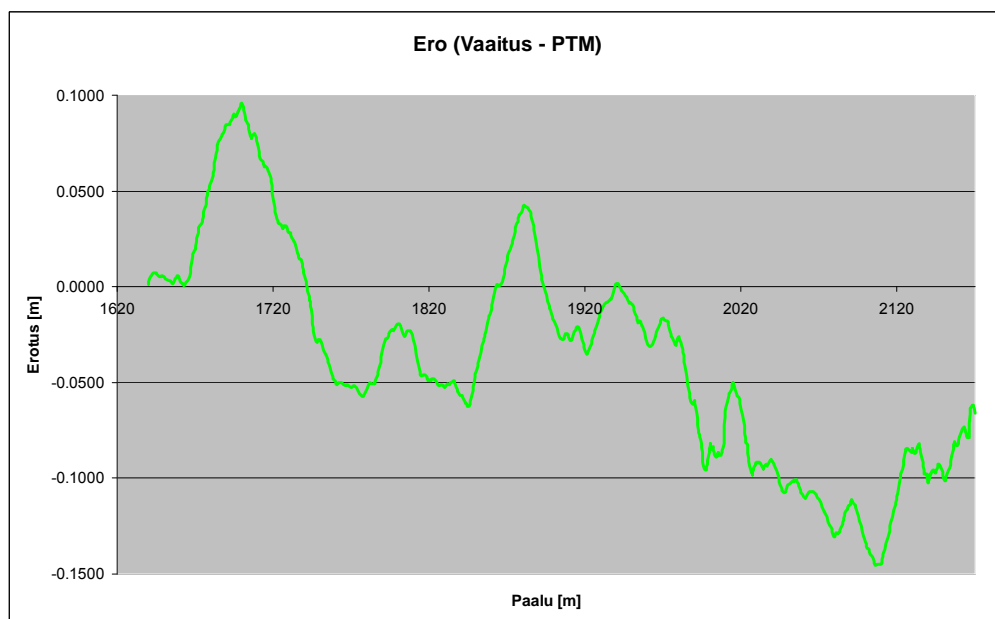
PTM-mittaus ei korvaa vaaitusmittausta, kun on tarpeen saada tien tarkat korkeuspisteet. Korkeusprofiilin mittaaminen perustuu pituuskaltevuuden muutoksen mittaamiseen ja siitä integroituun korkeustietoon. Pitkällä matkalla virhe kertaantuu ja ero vaaitusmittaukseen kasvaa tarkasteltavan pituuden kasvaessa. Virhettä saadaan pienennettyä sitomalla pituusprofiili todellisiin (erillisellä menetelmällä mitattuihin) korkeuspisteisiin. Vuonna 2010 tehdyssä selvityksessä PTM-mittausten korkeusprofiileja oli korjattu erityisellä menetelmällä, joka ei kuitenkaan ole käytössä verkkotason mittauksissa.

Verkkotason mittauksissa ei pystytä tuottamaan todellisia korkeuspisteitä, eikä niiden mittaaminen onnistu tällä hetkellä muun mittaamisen ohessa. Erityiskäsittelyllä saavutettava lisätarkkuus ei ole ajoneuvosimulointien kannalta olennaista. Ajoneuvon liiketilaa vaikuttavat kohtuullisen lyhyellä matkalla tapahtuvat muutokset (aallonpituudeltaan alle 25 m) tienpinnassa ja nämä saadaan PTM-autolla mitattua riittävän tarkasti. Täten PTM-autolla mitattua profiilia voidaan hyödyntää simuloitaessa ajoneuvon käyttäytymistä mitatulla tienpinnalla.

Kuvassa 2 on esitetty Boxin painumakohteella keväällä 2010 suoritettujen verkko-mittauksen tuloksista laskettu korkeusprofiili ja aiemmin vaaituksella mitattu korkeusprofiili. Verkkomittauksen tarkkuus näyttää olevan vain hieman huonompi kuin testidatalla, jossa käytössä on ollut tarkkuutta parantava menetelmä. Kumpaakaan mitausta ei tosin ollut tehty kuin yhden kerran, eli ne sisältävät molemmat toistettavuusvirhettä. Kohdistuvuuden selvittämisessä tulisi toistettavuusvirhettä pienentää ensin tekemällä useampi mittaus ja vertaamalla usean mittauksen keskiarvoja.



Kuva 2. Vaaituksen ja PTM-mittaus Boxin kohteelta. PTM-mittaus kevään 2010 verkkomittauksesta (alkupaalu sidottu on vaaitukseen).



Kuva 3. Vaaituksen ja verkkotason PTM-mittauksen väliset erot Boxin kohteella.

2.1.2 Toistettavuus

Vuonna 2010 tehdyssä julkaisemattomassa teknisessä muistiossa ”Painumamittaus PTM-kalustolla” todetaan että, PTM-mittauksen toistettavuus on hyvä. Muistiossa todetaan PTM-mittauksen soveltuvan haitallisten painumien löytämiseen ja niiden seuraamiseen.

Ajoneuvomallin käyttäytyminen on tässä tutkimuksessa suoraan riippuvainen tienpinnan muodoista, joten on tärkeää että PTM-mittauksesta laskettava tieprofiili vastaa mahdollisimman tarkasti todellista muotoa. Tässä tutkimuksessa halutaan saada selville, millä pituuskaltevuuteen liittyvillä tunnusluvuilla pystyttäisiin ottamaan huomioon ajoneuvon käyttäytyminen. Toisaalta halutaan selvittää millaiset pituuskaltevuuden muutokset vaikuttavat ajoneuvon hallittavuutta vaikeuttaen ja toisaalta halutaan selvittää millaisilla pituuskaltevuuden muutoksilla ei ole vaikutusta ajoneuvon hallittavuuteen. PTM-mittauksesta laskettavan tieprofiilin voidaan olettaa kuvaavan tienpinnan muotoja tämän tutkimuksen kannalta riittävän tarkasti.

2.1.3 Tarkkuusvaatimukset

Ehdotus vaatimuksesta pituusprofiilin mittaustarkkuudelle on esitelty selvityksessä ”Painumien dynaaminen määrittäminen, 2009”. Ehdotetut raja-arvot on esitetty suhteessa vaaitukseen (taulukko 1) ja toistettavuuteen itsensä kanssa (taulukko 2). Nämä rajat saadaan täytettyä myös verkkotason mittauksissa, kuva 1. Ehdotuksia mittaustarkkuuden vaatimuksiksi (Painumien dynaaminen määrittäminen, PTM 2009):

Taulukko 1. Suositus kaistalta suoritettavan mittauksen vähimmäistarkkuudesta, kun vertaillaan menetelmän tarkkuutta vaaitusmittaukseen.

Tunnusluku	MAX	95 %	50 %	Korrelaatio
Pituusprofiili ¹	35,0 cm	25,0 cm	10,0 cm	> 0,95
Pituusprofiili ²	20,0 cm	15,0 cm	5,0 cm	> 0,95
Pituusprofiilin gradientti ³	-	1,0 cm/m	0,3 cm/m	> 0,95
Kaltevuuden muutos ^{3,4}	-	0,40 %-yks	0,15 %-yks	-

¹) Kohteen maksimi korkeusero saa olla korkeintaan 4 metriä

²) Mittauksen alku- ja loppupiste on sidottu vaaitusmittauksen tuloksiin.

³) Kaltevuuden muutoksen jänneväli ≥ 2 m

⁴) Kaltevuuden muutoksen arvo

Taulukko 2. Mittausmenetelmien toistettavuuden laatuvaatimukset. Vaatimuksina suurin sallittu erotus sekä erotus, jonka 50 tai 95 % havainnoista tulee vähintään alittaa - ja korrelaatiovaatimus.

Tunnusluku	MAX	95 %	50 %	Korrelaatio
Pituusprofiili ¹	3,0 cm	2,5 cm	1,0 cm	> 0,95
Pituusprofiilin gradientti	-	0,5 cm/m	0,2 cm/m	> 0,95
Kaltevuuden muutos ²	-	0,40 %-yks	0,15 %-yks	-

¹) Kohteen maksimi korkeusero saa olla korkeintaan 4 metriä
²) Kaltevuuden muutoksen jänneväli \geq 2m
³) Kaltevuuden muutoksen arvojen keskiarvot eivät saa erota tilastollisesti merkitsevästi 95 % luottamustasolla

2.2 Epätasaisuustunnuslukujen mittaus

Tien pituussuuntaista epätasaisuutta kuvataan useilla eri tunnusluvuilla, jotka tuotetaan laskennallisesti mitatusta pituusprofiilista. Yleisin tunnusluvun laskentamenetelmä on pituusprofiilista suodatetun tietyn aallonpituusalueen kattavan epätasaisuuden tehollisen pystysuuntaisen vaihtelun suuruus. Pystysuuntaista vaihtelua lasketaan sähkötekniikassa käytetyllä tehollisen vaihtelun menetelmällä tuottamalla sen ”signaalista” sen RMS-arvoja. Muita tunnuslukuja ovat pituuskaltevuus-% ja IRI:n pituusyksikköä kohti laskettu pystyliikkeiden summa. IRI:n mittaustarkkuuteen on yleensä kiinnitetty eniten huomiota ja muiden tunnuslukujen tarkkuuksiin ei niinkään.

2.2.1 Kohdistuvuus

PTM:n tuottamista pituussuuntaisista tunnusluvuista on kohdistustestattu vain IRI ja pituuskaltevuus. Kohdistustestaus kuuluu Suomen ja Ruotsin PTM-autojen hyväksyttämiskäytäntöön sen suorittaa Ruotsin VTI. PTM-autojen tuottamien tunnuslukujen kohdistus testataan VTI:n tarkkoja laboratoriotason mittauslaitteita vasten. Painumien kannalta kiinnostavien pitkäaaltoisten tunnuslukujen kohdistustestauskäytäntöä ei ole olemassa.

2.2.2 Toistettavuus

Tunnuslukujen mittaustarkkuudet ovat RMS₁:stä lukuun ottamatta melko hyviä. Toistomittausten korrelaatio on lähellä 99 % ja mittausepävarmuus (=toistettavuusvirhe + uusittavuusvirhe suhteessa kokonaisvaihteluun) noin 10 % (taulukko 3). Taulukon luvut kuvaavat vain 100 m laskentaväleille (pituuskaltevuus 50 m) tuotettujen tunnuslukujen mittaustarkkuuksia. Mittaustarkkuus riippuu (keskiarvostusväli) laskentavälistä ja heikkenee lyhyemmällä laskentaväleillä.

Taulukko 3. Pituussuunnassa tuotettavat epätasaisuutta kuvaavat tunnusluvut ja niiden tyypillinen mittaustarkkuus (50 tai 100 m laskentavälille tuotettuna).

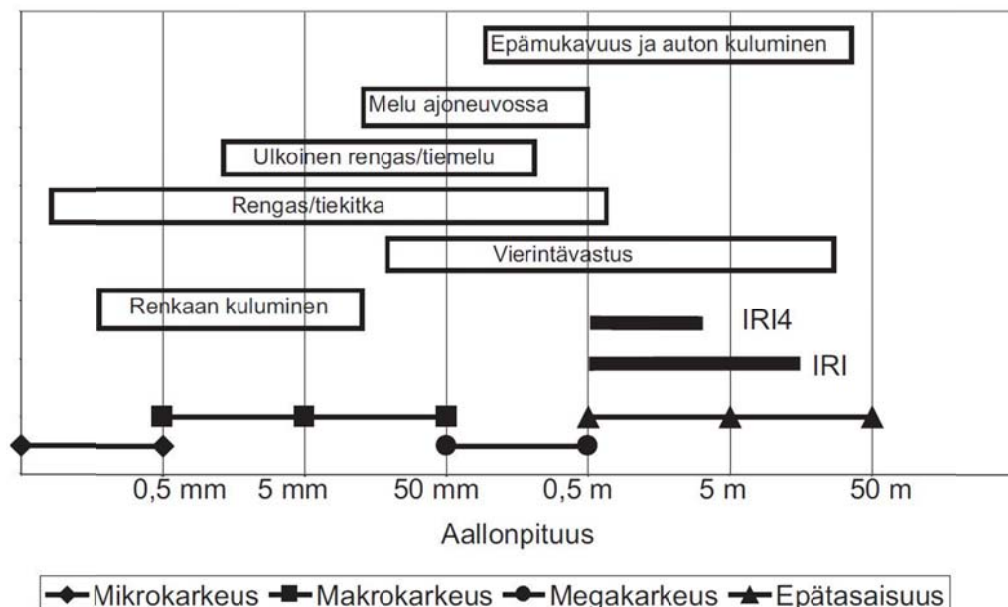
Tunnusluku	Yks.	Aallonpituusalue	Toistokorrelaatio (%)	Mittausepävarmuus (%)
RMS_Mikrokarkeus	mm	0,1-0,5 mm	-	-
RMS_Makrokarkeus	mm	0,5-50 mm	98	20
MPD_Makrokarkeus	mm	0,5-20 mm	98	20
RMS_Megakarkeus	mm	50-500 mm	97	20
RMS1	mm	0,5-1 m	90	30
RMS3	mm	1-3 m	97	20
IRI	mm/m	0,5-30 m	99	10-15
RMS10	mm	3-10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

3 Painumien vaikutukset

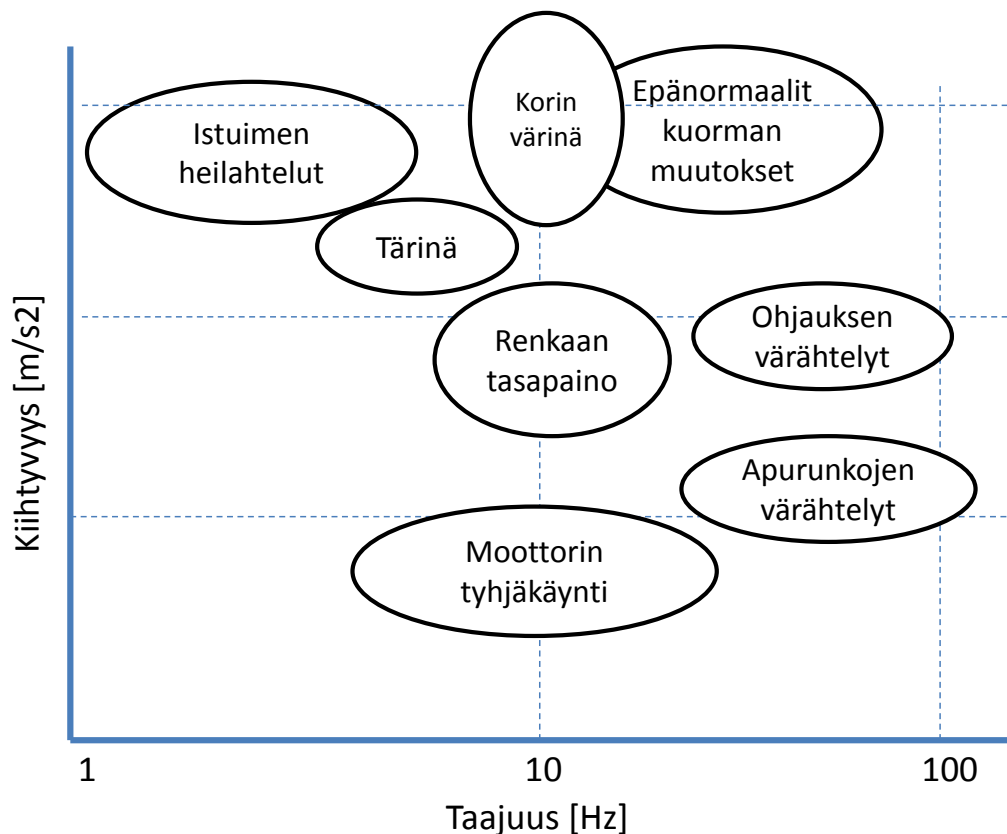
Tienpinnan painumat vaikuttavat niin tiellä liikkuvaan ajoneuvoon kuin tiehen itseensä. Tien epäsäännöllisyydet aiheuttavat ylimääräisiä liikkeitä ajoneuvoihin ja heikentävät hallittavuutta. Ajoneuvojen ylimääräiset liikkeet puolestaan rasittavat tietä. Painumien vaikutukset ajoneuvoihin pystytään määrittämään malleilla. Haitallisen painuman määrittäminen verkkotasolla on ollut ongelmallista. Painuman määrittämiselle tarvitaan perusteet ja raja-arvot.

Painuman haitallisuuden määrittely tehdään tässä tutkimuksessa pääasiassa liikenneturvallisuuden perusteella. Päästäksemme käsiksi liikenneturvallisuuteen vaikuttaviin tienpinnan muotoihin on löydettävä liikenneturvallisuuteen vaikuttavat ilmiöt. Kun löydetään liikenneturvallisuuteen vaikuttavat ilmiöt, voidaan pohtia näihin vaikuttavia tekijöitä. Tiedetään, että turvallinen liikkuminen edellyttää ajoneuvon pysymistä tiellä. Tien painumat/kohoumat aiheuttavat vaihtelua ajoneuvoon pyöräpainoihin ja siten kontaktivoimiin sekä aiheuttavat lisäksi odottamattomia kiihtyvyyksiä, joiden seurauksena voi olla hallinnan menetys ja onnettomuus. Kitkavoimaan vaikuttavat toki monet muutkin seikat kuten pinnan karheus ja lämpötila. Tässä tutkimuksessa ei tarkastella kuitenkaan tienpinnan karheuden vaikutuksia, vaan keskitytään suurempien pinnan epätasaisuuksien vaikutuksiin. Kuvassa 4 on esitetty epätasaisuuden aallonpituuksien vaikutusalueet ja kuvassa 5 tärinöiden taajuusalueet ja voimakkuudet.

Tienpinnan painumat vaikuttavat myös tielläliikkujan näkyvyyteen ja näkemään, mutta tällaiset painumat eivät yleensä ajodynamiikan mukaan ole haitallisia, joten niitä ei pyritä huomioimaan haitallisen painuman määrittävässä tunnusluvussa.



Kuva 4. Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden aallonpituusalueiden vaikutukset ajoneuvoon ja matkustajiin [Chavet et al 1987].



Kuva 5. Ajoneuvon värähtelyn lähteet ja niiden voimakkuudet [11].

Spång (1997) osoitti, että liukuva RMS keskiarvoistetusta kiihtyvyydestä (1 sekunnin tarkasteluväli) kuvaa hyvin epätasaisuuden aiheuttamaa tärinää. Menetelmä korreloi todella hyvin suuren ajopaneelin kanssa, $R_2 = 92\%$. Liukuva RMS menetelmä on kuvattu standardissa ISO 2631-1. Myös vaakasuuntaiset kiihtyvyydet vaikuttavat RMS-arvoon. Standardiin liittyy mm. seuraavia periaatteita:

- Standardi määrittelee menetelmät ihmiseen kohdistuvan tärinän mittaukselle ja arvioinnille.
- Se ei määritä tarkkaa raja-arvoa terveydelle vaaralliselle tärinälle, mutta määrittelee terveyden varoalueen.
- Tärinän arviointi perustuu kiihtyvyydestä, joka mitataan henkilön ja tärisevän kohteen välistä, käytännössä siis kuljettajan ja istuimen välistä.
- Arviointi tapahtuu ensisijaisesti kiihtyvyyden neliöllisen keskiarvon (RMS) perusteella.

Tien pinnan epätasaisuudet aiheuttavat kuljettajaan ja ajoneuvoon kohdistuvia kiihtyvyyksiä. ISO 2631-1 (1997) määrittelee tärinäaltistuksen mitaksi RMS-kiihtyvyyden (Root-Mean-Square), joka on tärinän kolmesta suunnasta (x,y,z) hallitsevan kiihtyvyyden frekvenssillä painotettu laskennallinen arvo. Raja-arvot eivät ole samat kaikille ajoneuvoille, mutta ne ovat kuitenkin lähellä toisiaan. Raskailla ajoneuvoilla arvot ovat todennäköisesti pienemmät.

RMS-kiihtyvyydellä on olemassa raja-arvot, taulukko 8. Epämiellyttävän RMS-kiihtyvyyden raja-arvona pidetään $1,25 \text{ m/s}^2$. Liukuvaa RMS kiihtyvyyttä ei tällä hetkellä Suomessa toimiteta verkkotason palvelutasomittauksissa. Tunnuslukua ei voida laskea tieprofiilin perusteella, vaan laskenta on suoritettava mitattujen kiihtyvyyksien

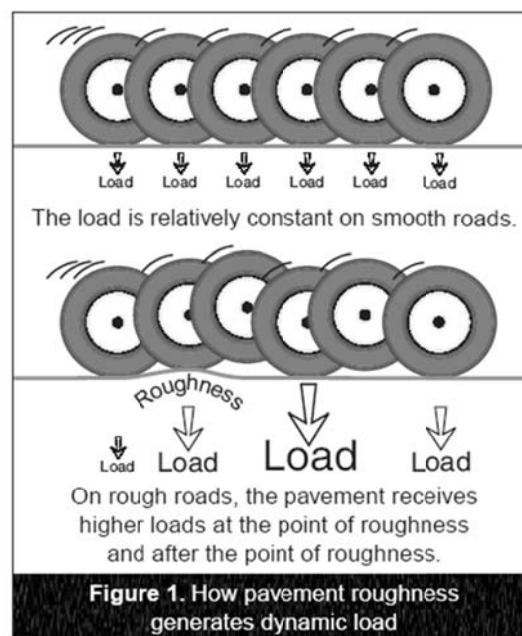
perusteella. RMS kiihtyvyyden laskenta on periaatteessa mahdollista suorittaa ajoneuvosimulointien perusteella.

Taulukko 4. Julkisissa ajoneuvoissa koetun ajomukavuuden viitteelliset RMS-rajaarvot.

RMS-kiihtyvyys [m/s^2]	Ajomukavuustaso
< 0,315	Miellyttävää
0,315 - 0,63	Pääosin miellyttävää
0,5 - 1,0	Melko miellyttävää
0,8 - 1,6	Hiukan epämiellyttävää
1,25 - 2,5	Epämiellyttävää
> 2,0	Erittäin epämiellyttävää

3.1 Tierakenteen vaurioituminen

Epätasainen tie vaurioituu nopeammin kuin tasainen tie, kuva 6. Tasaisella tiellä tiehen kohdistuu ajoneuvosta vain sen staattisen rengaskuorman mukainen rasite, kun taas epätasaisella tiellä rasite muuttuu dynaamiseksi, joka voi olla jopa monikertainen staattiseen verrattuna. Kuormituksen suuruuteen vaikuttavat ajonopeus, ajoneuvon ominaisuudet ja tien muodot. Tierakenteeseen kohdistuviin kuormituksiin tienpistäjä voi vaikuttaa säätämällä nopeusrajoituksia ja huolehtimalla tien tasaisuudesta. Ajoneuvojen ominaisuuksista ajoneuvon kokonaismassaa, akselikuormia ja kokoa (leveys, korkeus, pituus) säädellään lailla, mutta myös ajoneuvon renkaiden ja jousituksen rakenteet vaikuttavat tiehen kohdistuvien voimien suuruuksiin.



Kuva 6. Tienpinnan epätasaisuuden seurauksena tiehen kohdistuu suurempia rasituksia [11].

Raskaiden ajoneuvojen osuus tien ylläpitokustannuksista vaihtelee maittain, mutta on suuruusluokaltaan noin puolet. Eli raskaiden ajoneuvojen tiekuormitukset ovat huomattavasti suuremmat kuin henkilöauton. Henkilöautojen vaikutukset tien vaurioitumiseen syntyvät Suomessa pääasiassa talviaikaan nastarenkaiden aiheuttaman urautumisen takia. Ilmajousitetun puoliperävaunun tiehen kohdistamat voimat ovat 10–12 % pienemmät kuin perinteisen lehtijousitetun perävaunun. Vastaavasti tien kuluminen on vähintään 15 % voimakkaampaa lehtijousitetulla kuin ilmajousitetulla ajoneuvolla.

Tien vaurioitumisen kannalta ”löysät” jouset ovat suotavia. Ilmajouset ovat löysiä verrattuna perinteisiin lehtijousiin. Euroopan Unionissa sallitaan joissain tapauksissa tavallista suuremmat (100kN -> 115kN) akselikuormat ilmajousitusta tai muuta tieystävällistä jousitusta käyttävälle ajoneuvolle [6].

Tasaisella tiellä pyöränkuorma vaihtelee ± 20 % verrattuna staattiseen kuormaan. Tämä johtuu siitä, että ajoneuvon kiihdytykset, jarrutukset ja suunnan muutokset muuttavat pyöränkuormia staattiseen tilanteeseen verrattuna. Dynaaminen kuorma voi olla helposti moninkertainen staattiseen kuormitukseen verrattuna. Tien vaurioitumisen on verrannollinen pyöränkuorman neljänteen potenssiin. Eli kuormituksen kasvaessa 50 % tiehen kohdistuva rasitus viisinkertaistuu ($1.5^4=5$) [7]. Tästä syystä kuormitus kasvaa painumien kohdalla enemmän kuin muualla ja tien rappeutumiskäyttäytymiseen muodostuu itseään vahvistava kierre (kuva 7).



Kuva 7. Tie vaurioituu painuman kohdalla nopeammin. (Pertti Virtala).

3.2 Ajokustannukset

Tien epätasaisuus kasvattaa ajovastuksia ja aiheuttaa ajonopeuden muutostarpeita, joiden seurauksena polttoaineen kulutus kasvaa. Tienpinnan epätasaisuus (IRI 0.5-30 m) kasvattaa vierintävastusta ja laajemmat painumat mäktivastusta. Heitot ja painumat vaativat nopeuden pudottamista turvallisuuden ja mukavuuden takia. Tien tasaisuuden niin salliessa nopeus nostetaan nopeusrajoituksen määräämälle tasolle.

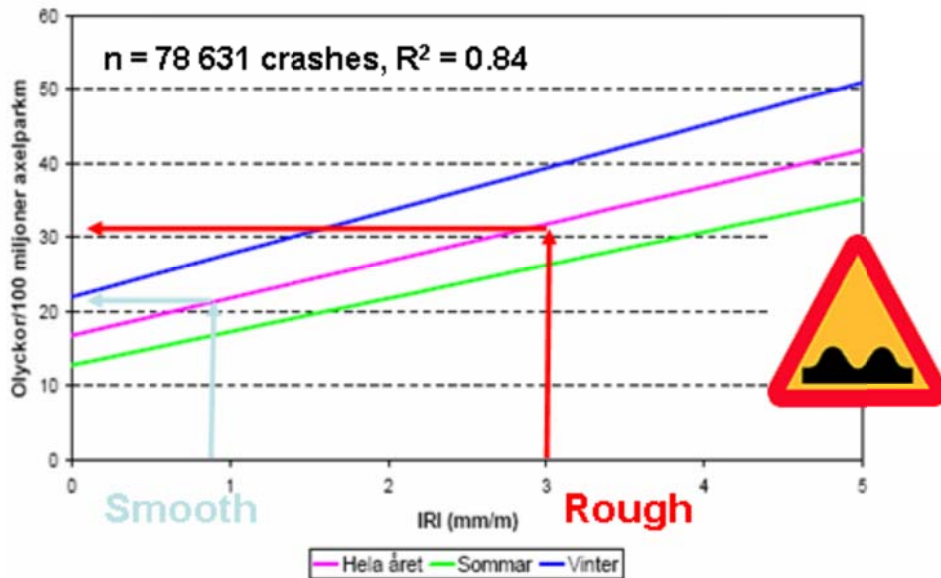
Jos vierintävastus muuttuu 10 %, niin polttoaineen kulutus muuttuu 1-4 %, riippuen ajoneuvotyypistä ja sen ominaisuuksista. Henkilöauton keskimääräinen polttoaineen kulutuksen muutos on noin 2 % ja raskaalla kalustolla 2,5 %, kun vierintävastus muuttuu 10 %. Esimerkkitapauksessa henkilöauton keskikulutus on 8 l/100km ja sillä ajetaan vuodessa 20 tkm. Vierintävastuksen kasvaessa 10 % koko tieverkolla, jolla henkilöauto kulkee kasvaa keskikulutus 0,16 l/100km. Vuositasolla polttoaineeseen kuluu 1,5 €/l bensan hinnalla 48 € enemmän. Yksittäisen autoilijan kohdalla summa ei ole vielä merkittävä, mutta kansantaloudellisesti summa on jo huomattava.

3.3 Liikenneturvallisuus

Tasainen tie parantaa mahdollisuuksia pitää ajoneuvo hallinnassa myös liukkaalla kelillä. Kuivatus toimii tasaisella ja oikein kallistetulla tiellä paremmin ja mahdollistaa tiellä liikkujien havaitsemisen paremmin. Tie kuluu ja vaurioituu, minkä seurauksena se alkaa poiketa suunnitellusta muodosta. Epätasaisella tiellä ajoneuvon kulku on vaikeammin ennustettavissa, eikä siihen aina osata varautua olosuhteiden vaatimilla toimilla. Epätasaisella tiellä on täten suurempi riski (suhteutettuna liikennemääriin) joutua onnettomuuteen kuin tasaisella tiellä.

Painumat ja epätasaisuudet heikentävät tien kuivatusta ja puhtaana pysymistä ja siten heikentävät kitkaa ja sitä kautta heikentävät liikenneturvallisuutta. Ruotsissa on selvitetty, että onnettomuusriski on suurempi teillä, joiden IRI arvot ovat tavallista suurempia, kuva 8. Erityisen vaarallisia aallonpituusalueita ei ole kuitenkaan tutkittu. Tutkimuksissa on havaittu myös tasaisuuden paranemisen kasvattaneen onnettomuusmääriä. Tämä voi selittyä suuremmilla nopeuksilla ja liikennemäärillä. [6].

Crash rate



Kuva 8. Tien epätasaisuuden vaikutus onnettomuusmääriin.

3.4 Tiellä liikkujan terveys ja ajomukavuus

Tien epätasaisuudella on vaikutusta tien käyttäjän terveyteen. Etenkin ammattikuljettajilla pystysuuntaisen värinän vuoksi selkäranka ja lihakset kokevat ylimääräistä rasitusta, joiden seurauksena ongelmia saattaa esiintyä etenkin alaselässä.

Ihmiskeho pitää epämieluisimpina pystysuuntaisia värinöitä, joiden taajuus on 4–10 Hz, etenkin 5 Hz on epämiellyttävä. Tämän vuoksi henkilöautot on suunniteltu niin, että niiden resonanssitaajuus ei osu ihmiselle epämieluisalle alueelle, vaan jää hieman sen alle, 0,8–1 Hz. Raskaan ajoneuvon resonanssitaajuus on vastaavasti 1–4 Hz jousituksesta riippuen. Akselistolla on oma resonanssitaajuutensa, henkilöautoissa noin 10 Hz ja raskaissa ajoneuvoissa 10–16 Hz. Ajoneuvojen suunnittelussa on kohtuullisen hyvin onnistuttu välttämään ihmiselle epämieluisaa taajuusaluetta. Joidenkin paneelitutkimusten mukaan tienkäyttäjän kokema epämukavuus korreloi parhaiten aallonpituusalueen 0,5–2,5 m kanssa, joka vastaa 80 km/h nopeudella ajatettaessa taajuusaluetta 10–50 Hz. Tulos on sikäli yllättävä, että ihmiskeho kokee epämiellyttävimpinä värähtelyt taajuukseltaan 4–10 Hz. Tämä selittyy ajoneuvojen jousituksen suunnittelun onnistumisella, jolla epämiellyttävä värinä saadaan suodatettua [6].

3.5 Lainsäädännön asettamat rajat värinälle

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi terveyttä ja turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista työntekijöiden suojelemiseksi altistumiselta fyysisistä tekijöistä (värinä) aiheutuville riskeille 2002/44/EY (kuudestoista direktiivin 89/391/ETY 16 artiklan 1 kohdassa tarkoitettu erityisdirektiivi) on saatu valmiiksi 25. kesäkuuta 2002.

Kansallisesti direktiivi tulee ottaa käyttöön heinäkuuhun 2005 mennessä. Direktiivi määrittää raja-arvot käsitärinälle ja koko kehon tärinälle sekä velvoittaa työnantajan valvomaan, etteivät rajat ylity. Direktiivi määrittelee kahdet raja-arvot kummallekin tärinälle. Ylemmän raja-arvon saa kahdeksan tunnin työpäivänä aikana ylittää vain lyhyinä jaksoina [10]. Alemman raja-arvon ylittäminen velvoittaa työnantajaa seuraamaan, arvioimaan ja mittaamaan tärinää sopivin väliajoin. Työnantajan tulee myös joka tapauksessa arvioida tärinän vaikutuksia työntekijään direktiivin voimaan astuessa työpaikalla.

Tieliikenteen ammattikuljettajiin sovellettuna edellä esitetyt määräykset voitaisiin tulkita siten, että tien ei tulisi aiheuttaa yli 1.15 m/s^2 suuruista tärinää kuin vain yksittäistilanteissa eikä yli 0.5 m/s^2 suuruista tärinää jatkuvasti (taulukko 4). Esitetyt raja-arvot tarkoittavat ajoneuvon istuimella koettavaa tärinää eli ajoneuvomallissa tulisi olla jousitetun korin lisäksi myös istuin-kori-systeemi. Sen puuttuessa voidaan ajatella seurattavan korin pystykiehtyvyyksiä esitettyjä raja-arvoja vasten.

Taulukko 5. Direktiivin 89/391/ETY 16 määrittelemät raja-arvot tärinäaltistukselle.

8 tunnin vertailu aikaan standardoitu päivittäinen altistus	Käsitärinälle	Kehotärinälle
raja-arvo	5 m/s^2	1.15 m/s^2
toiminta-arvo	2.5 m/s^2	0.5 m/s^2

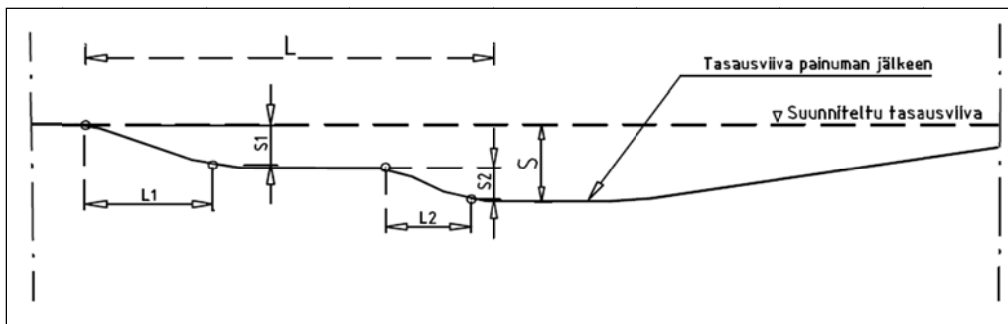
4 Nykyinen laskentamentelmä ja raja-arvot

4.1 Pituuskaltevuuden arviointimenetelmä

Suomessa on käytössä tien painumien seurantaan taulukon 5 mukaiset laskukaavat ja taulukon 6 mukaiset raja-arvot. Näiden raja-arvojen määräytymisperusteina ovat olleet mm. ajodynamiikka ja tien kuivatukseen liittyvät seikat. Haitallisen painuman määrittämisessä painuman muodolla ei ole merkitystä.

Taulukko 6. Pituuskaltevuuden laskentamenetelmä, L_r = rajapituus, S_{max} = sallittu maksimipainuma, pk = sallittu kaltevuuden muutos.

Sallittu kaltevuuden muutos rajapituutta pienemmillä painuman pituuksilla	Sallittu kaltevuuden muutos rajapituutta suuremmilla painuman pituuksilla
$L \leq L_r$	$L \geq L_r$
$\Delta pk = \frac{S_1}{L_1}$	$\Delta pk = \frac{S_1}{L_1}$
$\Delta pk = \frac{S_2}{L_2}$	$\Delta pk = \frac{S_2}{L_2}$
$\Delta pk = \frac{S}{L}$	$S \leq S_{max}$



Kuva 9. Muuttujien määritelmiä.

Ohjearvot (taulukko 6) asfalttipäällysteisten teiden painumakriteereille on annettu Tiehallinnon julkaisussa "Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet". Rakenteen tulee täyttää ohjearvot 30 vuoden ajan. Urakkakohtaisesti on mahdollista antaa muita arvoja esimerkiksi takuuajan ollessa lyhyempi.

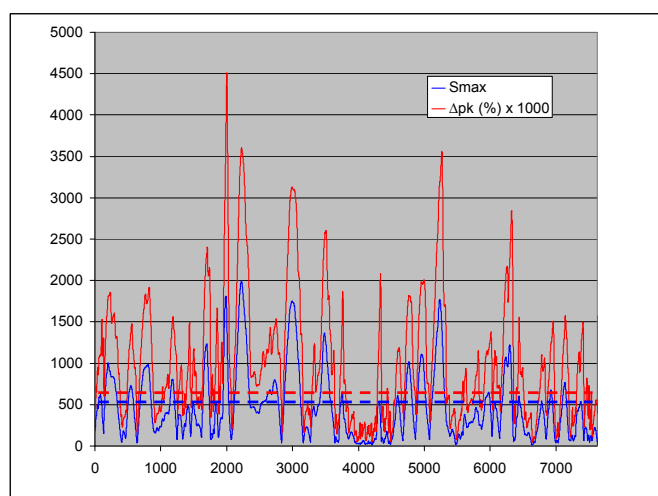
Taulukko 7. Tienpinnan painumakriteerit 30 vuoden aikana asfalttipäällysteisillä teillä.

Tien toiminnallinen luokka (mitoitussnopeus km/h)	Δpk (%)	S_{max} (mm)	L_r (m)	Sallittu sivukaltevuuden muutos (%-yksikköä)
Moottoriväylät (120)	0,4	400	67	1,3
Valta- ja kantatiet (100)	0,5	500	63	1,5
Seudulliset tiet (80) 3 num.	0,7	600	55	2,0
Kokoojatiet (80)	0,9	700	44	-
Yhdystiet (60)	0,9	800	36	-

4.2 Nyky menetelmän kyky kuvata ajomukavuutta

Nykyiset painumakriteerin raja-arvot ovat arvoja tienpinnan muutokselle alkuperäisestä tilanteesta. Koska käytössä ei ole alkuperäisiä tietoja, ei nykyistä painumien määrittäminen menetelmää voida hyödyntää ohjeistuksen mukaisesti. Menetelmää testattiin siten, että laskettiin rajapituuden (L_r) mittaisen tarkasteluvälin alku- ja loppupisteen välinen erotus. Suurin kallistuksen muutos laskettiin jakamalla rajapituuden mittaisen tarkasteluvälin alku- ja loppupisteen välinen erotus tarkasteluvälillä. Kohdissa, joissa painumille asetetut raja-arvot ylittyivät, löytyi huomattava määrä.

Ajomukavuuden kannalta nämä raja-arvot eivät oletetussa tapauksessa ole perusteltuja. Sillä usein tien pituuskaltevuus jo lähtötilanteessa ylittää sallitut pituuskaltevuuden muutoksen raja-arvot. Täten näitä raja-arvoja ei voi soveltaa selvittäessä ajomukavuutta heikentäviä tienkohtia. Tien 170 osan 8 pituuskaltevuuden muutokset ja suurimmat painumat laskettuna 55 metrin rajapituudella on esitetty kuvassa 10. Kuvasta nähdään, että sallitut maksimi painuman (600mm) arvot ylitetään monessa kohtaa, lisäksi myös pituuskaltevuuden muutokset ylittävät sallitut rajat (0,7% (pituuskaltevuuden arvoja on kerrottu 1000) useissa kohdissa.



Kuva 10. Tien 170 osan 8 suurimmat painumat ja pituuskaltevuudet. Vaaka-akselilla paalulukema. Rajapituutena on käytetty 55 m. Pituuskaltevuuden muutos on kerrottu 1000.

5 Painumatunnuslukuja

5.1 Mittaustavat

Painumat voivat olla tyypiltään hyvin erilaisia. Laajoja tasaisia, jotka aiheuttava tulvariskin ja heikentävät näkyvyyttä tai pieniä, jotka heikentävät ajoneuvon hallittavuutta, tien kuivatusta tai ajomukavuutta. Täten on vaikea määrittää yksi tunnusluku kuvaamaan haitallisia painumia.

Nykyisin painumamittaus suoritetaan metrin välein toistettavalla vaaituksella, jonka perusteella lasketaan pituuskaltevuus ja painuman syvyys. Itse painuman muoto ei ole erityisen merkitsevä, vaikka tiedetään, että muodolla on suuri vaikutus tiellä liikkuviin ajoneuvoihin ja matkustajiin. Nykyisin painumien seurannassa on käytössä sama menetelmä niin moottoriteille kuin seututeille, raja-arvot on määritetty tie-luokittain. Maailmalta löytyy kaikenlaisia lähinnä ajomukavuutta kuvaavia menetelmiä. Monet löydetyt vastaavat tai antavat pitkälti samansuuntaisia tuloksia kuin IRI.

5.1.1 Hanketason painumamittaus

Hanketason painumamittauksilla tarkoitetaan yksittäisten rakennuskohteiden mittaamista. Tällainen menettely tulee kyseeseen uusien teiden rakentamisessa ja niiden kunnan seurannassa. Teiden kunnolle asetetaan raja-arvot, jotka sen on täytettävä sopimuksen takua aikana. Tien painuminen on yksi seurattavista muuttujista.

Hanketasolla tienpinnan profiilista on mahdollista suorittaa PTM-tulosten perusteella yksityiskohtaisempi analyysi. Verkkotasolla tietä tarkastellaan usein 50-100 metrin tarkasteluvälillä, mutta hankekohtaisesti on tarpeen huomattavasti tiheämpi tarkastelu, jotta ongelmakohtat ja muodot saadaan selville jatkotoimenpiteitä varten.

5.1.2 Painumien mittaaminen verkkotasolla

Verkkotason PTM-mittauksia tehdään Suomessa vuosittain noin 30 000 kaista kilometriä. Mittauksen laajuuden vuoksi haitallisten painumien laskennan tulee olla osa nykyistä laskentamenettelyä, jossa tulokset toimitetaan tilaajalle 100 ja 10 metrin tarkasteluvälillä. Nykyisin lasketaan jokaiselle 10 metriselle pituusheittoriski (PH-riski). 100 metrin tuloksissa toimitetaan niiden 10 metristen määrä joilla riski on olemassa.

Tunnusluvun tulee olla sellainen että se voidaan ottaa helposti mukaan PTM-tuloksista tehtäviin analyyseihin. Lisäksi tunnusluvun tulee olla sellainen, että se kertoo painuman vaikutuksen suuruudesta, esimerkiksi asteikolla 1-5.

5.2 Määrittämenetelmiä

5.2.1 Pituusprofiiliin pohjautuvat määrittämenetelmät

5.2.1.1 Ympyrän kaarisovitus

Ruotsissa painumien arvioinnissa huomioidaan painuman muoto, ottamalla mukaan tien pystysuora kaarevuussäde. Alla olevilla kaavoilla saadaan laskettua raja-arvot, joiden avulla voidaan laskea suurimman sallitun painuman suuruus. Kuvassa viisi on raja-arvot esitettyinä graafisessa muodossa.

$$\Delta_S = \Delta_{tot} - \Delta_R \quad (1)$$

$$\Delta_{tot} = \frac{L^2}{v^2} \left[2,1 + 3,8 \cdot \left(v - 2 \frac{L}{v} \right)^2 \right] \quad (\text{m}), \text{ kun } L < 0,5v \quad (2)$$

$$\Delta_{tot} = 2,1 \frac{L^2}{v^2} \quad (\text{m}), \text{ kun } L \geq 0,5v \quad (3)$$

$$\Delta_R = \frac{L^2}{4R} \quad (\text{m}) \quad (4)$$

joissa, L on matka [m]
R on tien pystysuora kaarevuussäde [m]

Tasaisuusluokan nopeus nähdään taulukosta 7. Tasaisuusluokan 5 arvo on tasaisuusluokan 4 arvo jaettuna 1,3:lla. Kuvasta 11 voidaan katsoa tasaisuusluokan ja kaarevuussäteen mukaan tietyn tarkastelupituuden mukaiset arvot, joiden perusteella saadaan laskettua maksimi painuman suuruus.

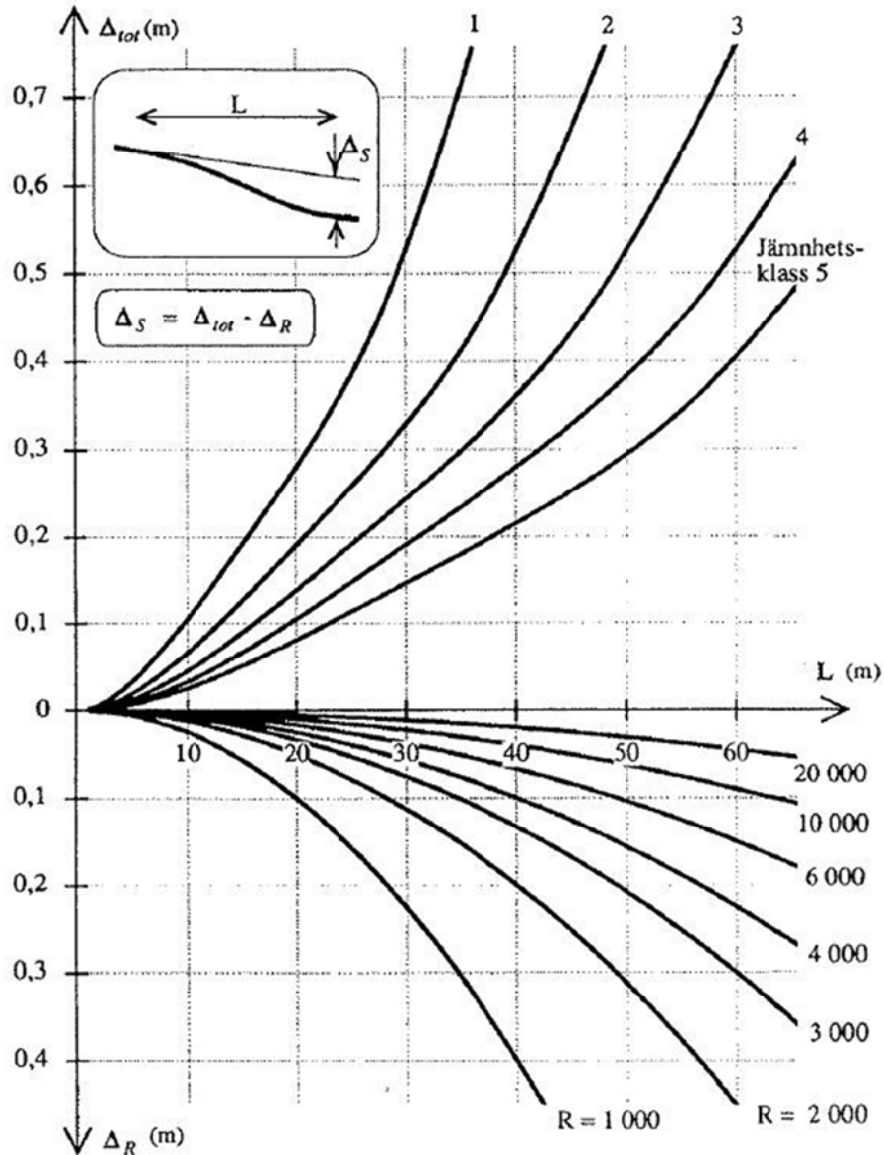
Taulukko 8. Tasaisuusluokkien 1-4 nopeudet [13].

Tasaisuusluokka	v
1	60
2	80
3	100
4	120

Esitelty menetelmä on suomalaista painumien määrittämenetelmää kehittyneempi juuri pystykaarevuussäteen huomioimisen takia. Ruotsalaista menetelmää ei voitu ottaa mukaan vertailuun, koska pystykaarevuussäteen määrittäminen ei ole selvillä.

Esitellyn painumamenetelmän lisäksi Ruotsissa on kehitteillä uusi tunnusluku, jolla voidaan löytää sellaiset paikalliset epätasaisuudet, joita IRI:llä ei löydetä (Leif Sjögren). Se että Ruotsissa kehitetään painumanmäärittämenetelmän ja IRI:n lisäksi

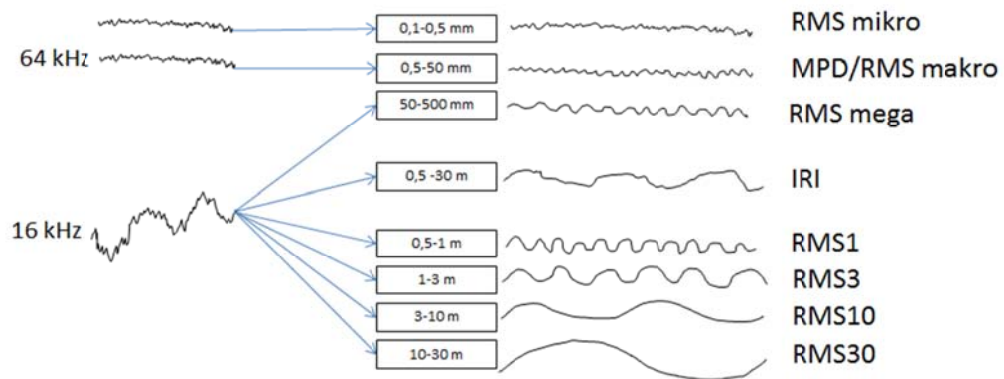
uutta pituussuuntaista epätasaisuutta kuvaavaa tunnuslukua, viittaa siihen, ettei olemassa olevilla menetelmillä löydetä kaikkia tiellä liikkujan haitallisiksi kokemia kohtia.



Kuva 11. Suurimman sallitun painuman raja-arvot Ruotsissa. Käyriltä poimitaan nopeusluokkaa ja tasaisuusluokkaa/kaarevuussädettä vastaava piste. Näiden pisteiden välinen erotus kertoo suurimman sallitun painuman. [13]

5.2.1.2 Pintaprofiilin tunnusluvut

Tien pintaprofiilista on tuotettavissa useita eri tunnuslukuja. Yleinen laskettava tunnusluku on eri aallonpituusalueille laskettava pinnan pystysuuntaisen vaihtelun tehollinen keskiarvo (root mean square). Tunnusluvut tuotetaan sekä karkeusmuuttujille että eri aallonpituusalueen muuttujille tehollisina arvoina. Poikkeuksina ovat makrokarkeudelle laskettava MPD-arvo ja epätasaisuudelle laskettava IRI-arvo.



Kuva 12. Pintaprofilista tuotettavia tunnuslukuja.

5.2.1.3 Pituusheittoriski

Suomessa lasketaan palvelutasomittausten tuloksista pituusheittoriskiä. Sillä pyritään löytämään tienkohtia, jotka ovat pituussuunnassa hyvin epätasaisia. Pituusheittoriski saa 10 metrin laskentavälillä arvon nolla, kun riskiä ei ole ja arvon 1, kun jokin seuraavan taulukon raja-arvoista ylittyy (taulukko 9).

Taulukko 9. Pituusheittoriskin (PH-riski) määräytymisen raja-arvot.

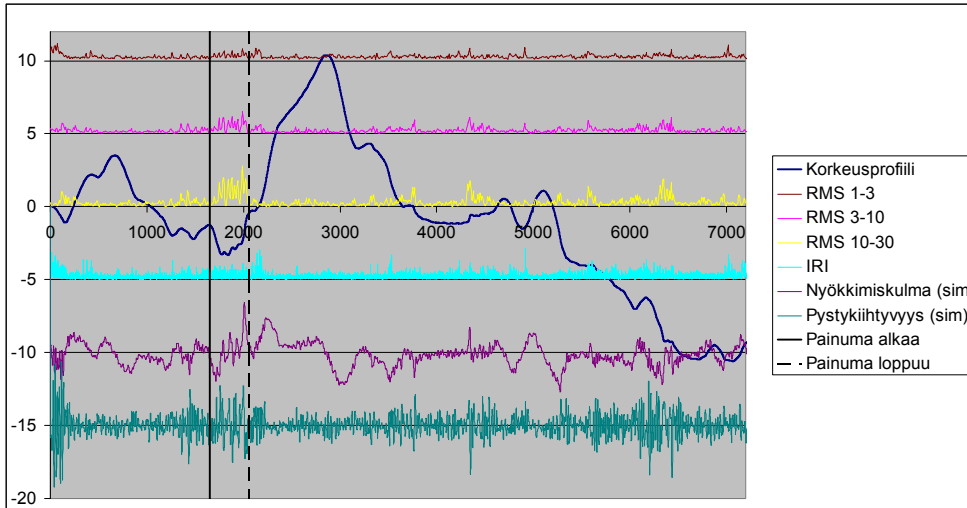
	IRI _{10m}	RMS ₃ (1-3m)	RMS ₁₀ (3-10m)
Riski on olemassa, jos jokin raja-arvoista ylittyy	11.4 mm/m	3.2 mm	5.7 mm

Alla olevissa kuvissa on haettu PH-riskiin vaikuttavien tunnuslukujen kykyä löytää painumia. Testikohteena on maantien 170 osa 8, jolla Boxin painumakohde sijaitsee. Selkeä painuma on ainakin välillä 1600-2000, myös välillä 3800-4300 näyttää olevan painumaa.

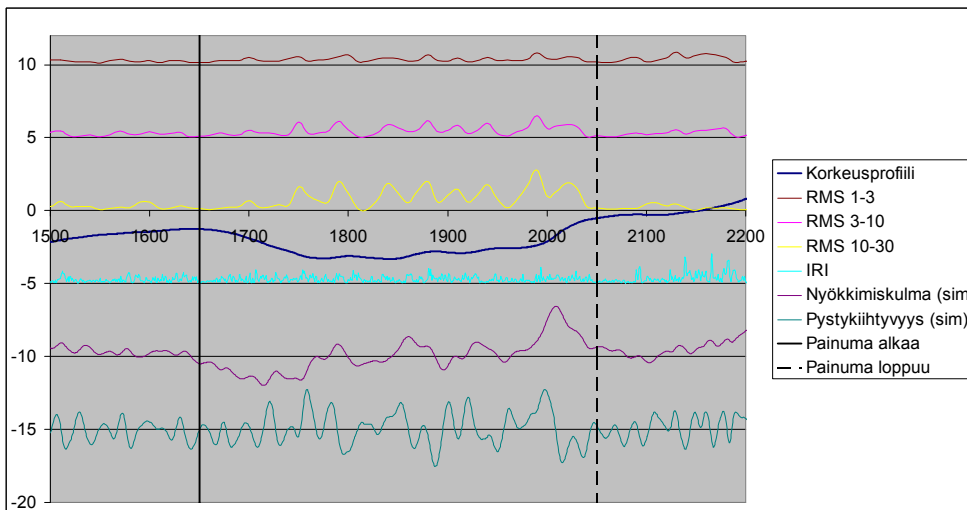
Kuvista 10 ja 11 nähdään RMS muuttujien saavan suurimpia arvoja painumien alku ja loppukohdissa. IRI ei tuota vastaavissa kohdissa suuria arvoja, vaan IRI saa suurimmat arvonsa lyhyistä epätasaisuuksista. Etenkin RMS₃₀ (10-30) saa suuria arvoja painuman alku- ja loppukohdissa.

Simulointien perusteella nähdään ajoneuvon käyttäytyvän poikkeuksellisesti painumien alku ja loppukohdissa. Täten voidaan alustavasti olettaa, että ajoneuvosimulointien avulla löydetään haitalliset painumat. Simulointien perustana on käytetty henkilöautoa.

Kuvissa 13 ja 14 muuttujat on skaalattu ja niihin on lisätty/vähennetty vakioarvo, jotta eri tunnuslukujen profiilit on saatu sopimaan samaan kuvaan.



Kuva 13. Tien 170 osan 8 pituusprofiili, 10 metrin laskentavälin IRI ja RMS arvot sekä simuloineista saatu nyökkimiskulma ja korin pystykiihtyvyys. Arvoja on skaalattu ja niihin on lisätty vakioita, kuvan selkeyttämiseksi. Tunnettu painumakohde on välillä 1650-2000. Lisäksi välillä 3800-4300 näyttää olevan painuma.



Kuva 14. Tien 170 osan 8 painumakohteen lähitarkastelussa nähdään painuman pohjalla olevat epätasaisuudet, jotka osaltaan aiheuttavat korkeita RMS-arvoja. Epätasaisuudet ovat pitkäaaltoisia, joten IRI-arvoon niillä ei ole juuri vaikutusta. Simulointien perusteella painumakohde aiheuttaa poikkeavia nyökkimiskulmien muutoksia ja pystykihtyvyksiä.

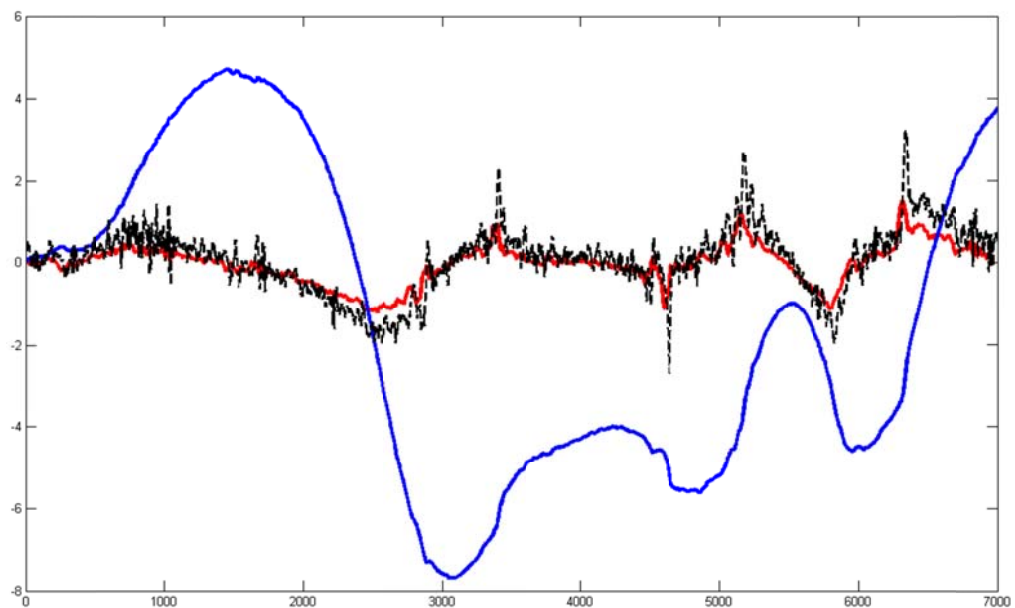
5.2.1.4 Pituusgradientti

Pituusgradientti on Suomen palvelutasomittausurakassa mitattava ja toimitettava muuttuja. Muuttujan laskenta perustuu mittausajoneuvon kokemiin kiihtyvyyksiin. Eri jännevälien vaikutusta ja merkitystä raja-arvoon tulisi tarkastella erikseen. Määritettyjä raja-arvoja ei ole olemassa.

Alla olevassa kuvassa 15 gradientti (1 metrin jänneväli, PTM-tuloksista) on piirrettyä mustalla katkoviivalla, sinisellä tien korkeusprofiili ja punaisella ajoneuvon simuloitu nyökkimiskulma. Kuvasta nähdään simuloitun nyökkimiskulman ja gradientin korreloivan hyvin. Nähdään myös, että gradientti saa poikkeavia arvoja painumien alku ja

loppukohdissa. Tämän yksittäisen tarkastelun valossa gradientti näyttäisi sopivan nykyisellään ainakin selkeiden teräväpiirteisten painumien alku ja loppukohtien tunnistukseen tai vain yleisesti tien korkeusprofiilin nopeiden muutosten tunnistamiseen. On kuitenkin muistettava, että suuri gradientin arvo ei välttämättä indikoi epätasaisuudesta, vaan ainoastaan gradientin nopeat muutokset. Jyrkässä mäessä gradientti voi saada suuria arvoja, mutta ajaminen ei välttämättä ole epämukavaa.

Huomioitava, että tässä korkeusprofiilin laskennan perusteena on PTM-tuloksista saatava gradientti. Täten on väistämätöntä, että gradientti korreloi korkeusprofiilin muutosten kanssa



Kuva 15. VT 7 suunta 1 kaista 1, 6/4976- 8/136. Huomioitava, että korkeusprofiilin laskennan perusteena on PTM-tuloksista saatava gradientti. Täten on väistämätöntä, että gradientti korreloi korkeusprofiilin muutosten kanssa. Sininen: Korkeusprofiili, Punainen: Nyökkimiskulma, Musta: Gradientti

5.2.2 Pintaprofiilien spektrianalyysit

5.2.2.1 Power Spectral Density

PSD on menetelmä tarkastella signaalin sisältämien taajuuksien jakautumista ja niiden voimakkuuksia. PSD avulla voidaan esittää esimerkiksi tieprofiilin sisältämien aallonpituuksien jakautuminen. Hurtigin diplomityössä tarkasteltiin PSD:tä tarkemmin. Siinä todettiin, että sen avulla yksittäisten tiessä olevien poikkeamien havaitseminen on vaikeaa. Vaikka PSD-menetelmällä löytyisikin poikkeavuuksia, niiden paikantaminen ei PSD:llä onnistu, koska menetelmä on tieosatasoinen ts. tuottaa tieosan epätasaisuudesta jakaumatietoa. Menetelmä voisi tietysti toimia tarkempaa tarkastelua vaativien tieosien tunnistamisessa, mutta vaatisi rinnalleen ongelmakohtien paikannusmenetelmän.

5.2.2.2 Wavelet

PSD:llä voidaan kuvata tietyn taajuisen aallon voimakkuus, mutta aallon sijaintitieto menetetään tarkastelussa. Wavelet muunnos on kehitetty paikkaamaan tätä puutetta. Käsitteenä Wavelet-muunnos on jo melko vanha, ensimmäisen kerran Wavelet on tunnistettu 1900-luvun alussa.

Wavelet-analyysi tehdään joko jatkuvalla (CWT) tai diskreetillä (DWT) Wavelet-muunnoksella. Wavelet analyysillä pituusprofiilidatasta on mahdollista löytää päällysteen vaurioita, kuten reikiä, painumia, heittoja ja kuoppia (Wei, et al., 2005). Se on käytettävissä mm. Matlab-ohjelmassa, mutta on perusteiltaan melko teoreettinen.

5.2.3 Palvelutasoindeksit

5.2.3.1 Present Serviceability Index

Present Serviceability, PSI, kuvaa tien käyttäjän kokemaa kuntoa luokka-asteikolla 0-5. Normaalinkuntoisella tiellä ollaan luokka-alueella 2-3. PSI voidaan tutkimuksen ”Evaluating the ride number as a pavement management roughness index, 1998” mukaan laskea seuraavalla kaavalla IRI-arvosta.

$$PSI = 4.9879 - 0.0078 * IRI \quad (5)$$

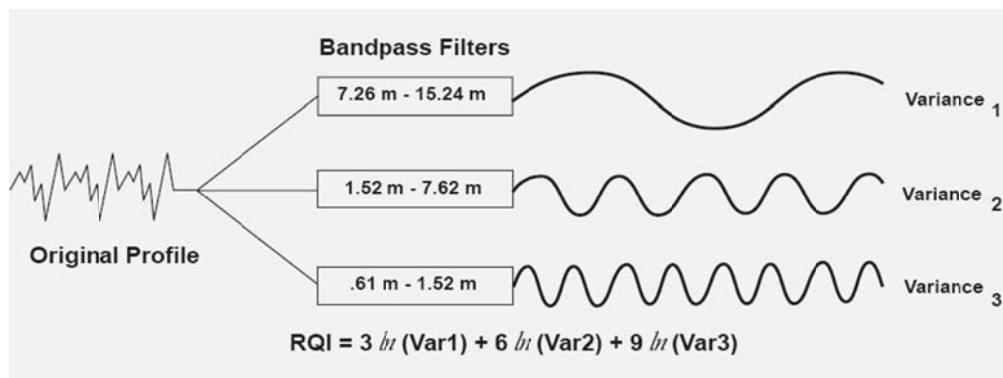
Suomessa on jo käytössä IRI sekä sen liikennemäärä- ja nopeusrajoitusluokkiin sovellettu luokitus, joten IRI kaltaisiin muuttujiin kiinnitetä erityistä huomiota tässä työssä.

5.2.3.2 Ride Number (RN)

Ride Number-menetelmässä laskenta perustuu PSI:hin ja se on mukana mm. ProVal-profiilinanalysointiohjelmistossa. RN kuvaa IRI:iä lyhyempiaaltoista epätasaisuutta. Se on käytössä ainakin Yhdysvalloissa. IRIn kaltaisuutensa takia tähän tunnuslukuun pätee sama, mitä edellisessä kappaleessa todettiin.

5.2.3.3 Ride Quality Index (RQI)

Menetelmä on kehitetty yhdysvalloissa 1980-luvulla, sitä on käytetty päällystysurakoiden arvonlennuskriteerinä. RQI on PSD:n taajuusfunktiosta johdettu lukuarvo, jolla pyritään kuvaamaan käyttäjän kokemaa ajomukavuutta. Menetelmässä on yhtäläisyyttä Suomessa mitattavien RMS-tunnuslukujen kanssa, joissa tien profiilissa havaitut epätasaisuudet suodatetaan kaistanpäästösuodattimilla aallonpituusalueen mukaan (kuva 16). RQI ei sovellu sellaisenaan painumien tarkasteluun [12]. Mutta se saattaisi soveltua hakemalla sen osille uudet Suomen tieolosuhteisiin sopivat painotukset. Toisaalta lisäarvo RMS-tunnuslukuihin verrattuna lienee vähäinen.



Kuva 16. RQI:n laskenta perustuu mitatun profilin jakamiseen kolmeen aallonpituusalueeseen ja niiden painottamiseen. Pitkien aaltojen painokerroin on 3, keskipitkien 6 ja lyhyiden 9. RQI:n arvoon eniten vaikuttavat lyhyimmät epätasaisuudet, [Materials and Technology, 1996].

5.2.4 Ajoneuvovasteet

Ajoneuvovasteisiin luettavia tunnuslukuja ovat kaikki ne tulokset, joiden laskennassa on käytetty dynaamista ajoneuvomallia. Tällaisia muuttujia ovat mm. IRI, puoliajoneuvo-IRI (half-car-IRI) ja täysajoneuvon IRI (full-car-IRI). Puoli- ja täysajoneuvojen IRI:t ovat periaatteeltaan yhteneväisiä perinteisen IRI:n kanssa, mutta ne tuotetaan monimutkaisemmilla malleilla. Mallin jousitusominaisuudet voivat vastata joko henkilö- tai kuorma-auton jousitusominaisuuksia. Yksittäisen pyörän jousitusjärjestelmän sijasta tarkastellaan ajoneuvon korin painopisteen liikkeitä. FIRI/FRI ei ole käytössä missään maassa, mutta on raportin (VTI 2002a) mukaan eräs tärkeimmistä uusista pituusprofiilista laskettavista muuttujista. FIRI/FRI:n laskenta on kuvattu esimerkiksi lähteessä (Capurço et al. 2005). Jos tunnuslukua lasketaan täysautomallilla, niin pystysuuntaisista liikkeistä johdettujen liikevasteiden lisäksi kannattaa siirtyä x- ja y-akseleiden ympäri tapahtuviin kierähdysliikkeisiin roll ja pitch, jotka ovat ajoneuvomallissa simuloinnin pääasiallisia tuloksia.

5.2.5 Tierasitus

5.2.5.1 Dynaaminen kuormituslisä

Raskaan ajoneuvon dynaaminen kuormituslisä, Dynamic Load Coefficient, DLC, kuvaa eräällä tavalla tien epätasaisuuden aiheuttamaa ajoneuvon tiekuormitusta. DLC laskenta perustuu dynaamisen ja staattisen pyöränkuorman suhteeseen. Se kertoo kuinka paljon pyöränkuormat kasvavat staattiseen kuormaan verrattuna. DLC lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$DLC = \frac{RMS(\text{DynamicWheelLoad})}{\text{StaticWheelLoad}}. \quad (6)$$

Normaali raja DLC-arvolle on 0,1 – 0,3 kun taas DLC = 0,4 sopii tyypilliseksi arvoksi huonosti suunnitellun teliakselin aiheuttamalle kuormitukselle. Simulointitulosten perusteella lasketussa DLC:ssä dynaamista pyöränkuormaan on verrattu staattiseen sellaisenaan, lopuksi arvosta on otettu itseisarvo.

5.2.5.2 Kuormitusekvivalentti

Raskaan ajoneuvon kuormitusekvivalentti kuvaa ajoneuvon tiehen kohdistamaa rasitusta. Tien epätasaisuus aiheuttaa pyöräpainojen kasvun ja sitä kautta tierakenteisiin kohdistuva rasitus kasvaa. Koska rasitus muuttuu syklimäiseksi, niin tierakenne alkaa rappeutua epähomogeenisesti. Epätasainen tien kohta saa kuormitusvaikutuksen entisestään vahventumaan. Tämä on usein painumia lisäävä ilmiö. Kuormitusvaikutusten määrittämisessä tarvitaan tien pintaprofiileja ja dynaamista kokoajoneuvomallia. Ajoneuvomalli tuottaa ajoneuvon tiehen kohdistamat pyöräpainot ja niiden perusteella voidaan laskea ajoneuvon aiheuttama tierasitus.

Ajoneuvon tierasitusta kuvataan sen kuormitusekvivalenttikertoimella, ESAL (Equivalent Standard Axle Load), joka lasketaan esim. 2-akseliselle kuorma-autolle seuraavasti:

$$ESAL = \left(\frac{P_{ETU}}{P_{STD}} \right)^4 + \left(\frac{P_{TAKA}}{P_{TSTD}} \right)^4 \quad (7)$$

Kun yksirenkaisen etuakselin suurin sallittu pyöräpaino on 8 tn ja sen yksikköakselikuormitusta vastaava standardikuormitus myös 8 t on etuakselista tuleva tierasitus 1. Vastaavasti paripyörärengastuksella varustetun taka-akselin suurin sallittu akselipaino on 10 tn ja sen vastaava standardikuormitus myös 10 tn, on koko ajoneuvon staattinen kuormitus yhtä kuin 2. Kun pyöräkuormat epätasaisuuden takia vaihtelevat, niin rasituskin vaihtelee keskiarvonsa 2 molemmin puolin. Pyöräpainojen kasvu painumatai epätasaisuuskohdissa aiheuttaa neljännen potenssin säännön perusteella suuremman rasitusvaikutuksen kuin niiden lasku alle 2 ja kokonaisrasitus on siten enemmän kuin ajoneuvon staattisen tilanteen rasitus. Teliakselitot ja single-rengastus vaikuttavat laskentaan vastaavasti.

5.2.6 Yhteenveto

Taulukkoon 10 on koottu pituussuuntaisen epätasaisuuden arviointiin kehitettyjä tunnuslukuja ja menetelmiä. Menetelmien hyviä ja huonoja puolia arvioitiin lyhyesti. Menetelmä valittiin jatkotarkasteluun, jos se ei vastaa Suomessa jo käytössä olevaa tunnuslukua tai se on mahdollinen laskea PTM-mittauksen perusteella.

Pystysuuntaiseen kaarevuussäteeseen perustuvaa menetelmää ei valittu sen hankalan laskettavuuden takia. Ajoneuvon korin pystysuuntainen kiihtyvyys on helposti laskettavissa ja se on kytkettävissä tärinälle määritettyihin raja-arvoihin. Pituusheittoriski otettiin mukaan validointiin, koska se toimii vertailukohtana. Pituuskaltevuutta on tutkittu aiemmissa selvityksissä painumien tunnistamisen näkökulmasta ja sen mukaan ottaminen ei liene enää tarpeen. Kansainvälisistä palvelutasoindekseistä ja taulukossa luetelluista teoreettisista menetelmistä ei näyttänyt olevan käyttökokeuksia saatavilla, joten niitä ei valittu jatkotarkasteluihin. Tiekuormitukseen liittyvät tierasitus ja sen dynaamisuus otettiin tarkasteluun, koska ne ovat ajoneuvosimuloinnissa pyöräpainojen kautta helposti sovellettavissa.

Taulukko 10. Pituussuuntaisen epätasaisuuden arvioinnissa käytettäviä menetelmiä. Mukaan vertailuun valittiin menetelmiä, jotka voidaan laskea PTM-tulosten perusteella ja sellaisia, jotka eivät muistuta Suomessa jo käytössä olevia tunnuslukuja.

Menetelmän nimi	Plussat	Miinukset	Käytössä	Vertailuun
Ruotsin painumakriteeri	Painumien määrittelyyn, huomioi pystysuuntaisen kaarevuussäteen.	Pystysuoran kaarevuus-säteen määrittäminen epäselvää.	Ruotsissa	Ei
RMS-Kiihtyvyys	Menetelmä korreloi ajopaneelin kanssa hyvin.	Tunnusluvun lähtötietona ihmisen kokemat kiihtyvyydet.	Ei tiedossa	Mahdollisesti
Pituusheittoriski	Saadaan laskettua PTM-tuloksista. Olemassa olevat raja-arvot.		Suomi	Kyllä
Pituusgradientti	Saadaan laskettua PTM-auton kokemista kiihtyvyyksistä.	Laskentamenetelmä aiheuttaa virhettä. Raja-arvoja ja sopivaa jännettä ei ole määritetty.	Suomi	Ei
Power Spectral Density (PSD)		Ongelmakohtien paikallistaminen ei onnistu. Vaikeasti tulkittava.	Ei tiedossa	Ei
Wavelet	PSD:n kaltainen, mutta saadaan ongelmakohdat paikallistettua.	Laskentaperusteet epäselvät.	Ei tiedossa	Ei
Present Serviceability Index (PSI)	IRI:n kaltainen	IRI:n kaltainen	Ei tiedossa	Ei
Ride Number (RN)	IRI:n kaltainen	IRI korvaamassa.	Yhdysvallat	Ei
Ride Quality Index (RQI)	Kuvaa ajomukavuutta aallonpotuusalueen mukaan.	Vastaa Suomessa käytössä olevaa RMS-menettelyä.	Yhdysvallat	Ei
Full-Car IRI (FIRI)	Vastaa paremmin todellista tilannetta kuin IRI:n neljännesautomalli.	Vastaa IRI:ä.	Ei tiedossa	Ei
Dynamic Load Coefficient (DLC)	Kertoo kuinka paljon pyöränkuormat muuttuvat verrattuna staattiseen tilanteeseen.	Vaatii erillisen mittausjärjestelmän tai simuloinnin PTM-mittausten perusteella.	Ei tiedossa	Kyllä

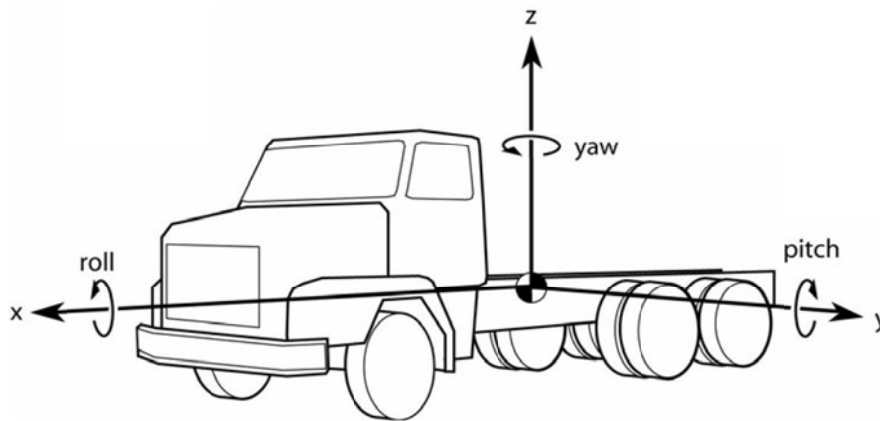
6 Ajoneuvomalli

6.1 Ajoneuvon liikesuunnat

Ajoneuvojen dynaamisissa liiketilatarkasteluissa niiden painopisteeseen sijoitetaan xyz-koordinaatisto, missä x kuvaa ajosuunnan suuntaista liikettä, y kuvaa sivuttaisliikettä, z kuvaa pystysuuntaista liikettä, *roll* kuvaa x-akselin ympärillä tapahtuvaa sivuttaisheilahdusta, *pitch* kuvaa y-akselin ympärillä tapahtuvaa nyökkimisliikettä ja *yaw* kuvaa z-akselin ympärillä tapahtuvaa kiertoliikettä (kuva 17). Koska ajoneuvo on yhteydessä tiehen pyöriensä välityksellä, niin kunkin pyörän pystysuuntainen liike erotellaan malleissa erikseen.

Nelipyöräisen ajoneuvon liiketilaa hallitaan siten yhteensä seitsemällä vapausasteella, jotka ovat pyörien pystysuuntaiset vapausasteet sekä ajoneuvon kiertoliikkeet koordinaatiston akseleiden ympäri. Ajoneuvojen suunnittelussa käytettävissä malleissa vapausasteita on yleensä enemmän, koska suunnittelussa ollaan kiinnostuneita ajoneuvon eri osien keskinäisistä liikkeistä ja voimista. Ajoneuvoyhdistelmien malleissa monimutkaisuus on luonnollisesti suurempaa.

Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden, erityisesti painumien, hallinnassa keskeisin liikeulottuvuus on ajoneuvon nyökkimisliike eli pitch-liike.



Kuva 17. Ajoneuvon liikesuunnat.

6.2 Käytettävissä olevia malleja

Ajoneuvon ja tien välisen vuorovaikutuksen kuvaamiseen on kehitetty useita erilaisia ajoneuvomalleja. Mallin monimutkaisuus riippuu siitä miten kattavasti tien ja ajoneuvon rakenteet ja ominaisuudet halutaan ottaa huomioon. Yksinkertaisin dynaaminen malli on taulukon 11 malli A, joka on perinteinen IRI:n laskentamalli. Siinä on kaksi vapausastetta eli sillä pystytään tuottamaan ajoneuvon yhden pyörän ja rungon pystysuuntaisia liikkeitä (z-akseli). Siihen syötetään vain yhtä pituusprofiilia. Liiketilaa voidaan tarkastella sijaintina, nopeutena tai kiihtyvyytenä ko. akselin suunnassa. Mallin tuottama tunnusluku on rungon ja pyörän välisten heilahdusten summa pituusyksikköä kohti ja sillä kuvataan tien ajomukavuutta. Muihin liiketiloihin malli ei ylety.

Mallit B ja C ovat puoliajoneuvomalleja siten, että B-mallissa on ajoneuvon puolikkaan etu- ja takapyörät ja C-mallissa on vastaavasti jompikumpi akseli. Niillä on 4 vapausastetta. B-mallilla voidaan tuottaa A-mallin tunnuslukujen lisäksi korin puolikkaan pystyliikettä ja nyökkimisliikettä ja C-mallilla vastaavasti heilahdusliikettä. B-malliin syötetään yhtä pituusprofiilia siten, että taka-akselille profiili syötetään akselivälin ja nopeuden määräämällä viiveellä. C-malliin syötetään sekä vasemman että oikean ajouran pituusprofiilia.

Malli D on nelipyöräisen ajoneuvon täysmalli vaikka se ei varsinaisesti ole vielä täysajoneuvo. Sillä voidaan tuottaa edellä lueteltujen mallien tuottamat tunnusluvut eli pyörien ja korin pystyliike sekä korin heilahdus- ja nyökkimisliikkeet. Sillä ei pystytä tuottamaan korin kierähdysliikettä eikä pitoon liittyviä tunnuslukuja.

Malli E on 14 vapausasteen täysajoneuvomalli siten, että malliin D on lisätty kaarregeometria sekä ohjaus- ja rengasdynamiikka. Siihen syötetään tien ajourien pituusprofiilien lisäksi myös tien vaakageometria ja siinä huomioidaan pyörien ja tien pinnan välinen sivuttaiskitka. Sillä voidaan tuottaa malliin D verrattuna kaarreajoon liittyvät sivusuunnan liikkeet: sivuttaiskiihtyvyyt ja kierähdysliike, mutta ei vetoon tai jarrutukseen tarvittavaa kitkaa. Mallia voidaan täydentää pituussuuntaisen dimension suhteen lisäämällä syötteeksi tien pystygeometria (mäkisyys). Raskaiden ajoneuvojen kohdalla malliin pitäisi lisätä myös moottorin ja voimansiirron toiminta, koska tien pystygeometria vaikuttaa ajoneuvojen nopeuksiin ja vedon tarpeeseen ja sitä kautta myös tarjolla olevan sivuttaiskitkan määrään.

Mallit F-G ovat monimutkaisempia ajoneuvomalleja, joissa on enemmän kuin kaksi akselia ja kymmeniä vapausasteita ja joilla pystytään hallitsemaan jopa yhdistelmäajoneuvojen liikkeitä. Niihin syötetään tien pituusprofiilin lisäksi myös tien geometria ja niissä huomioidaan pyörien ja tien pinnan välinen kitka sekä ajoneuvon vetokyky. Malleja käytetään ajoneuvojen suunnittelussa sekä onnettomuussimuloinneissa.

Taulukko 11. Ajoneuvomalleja ja niiden ominaisuuksia.

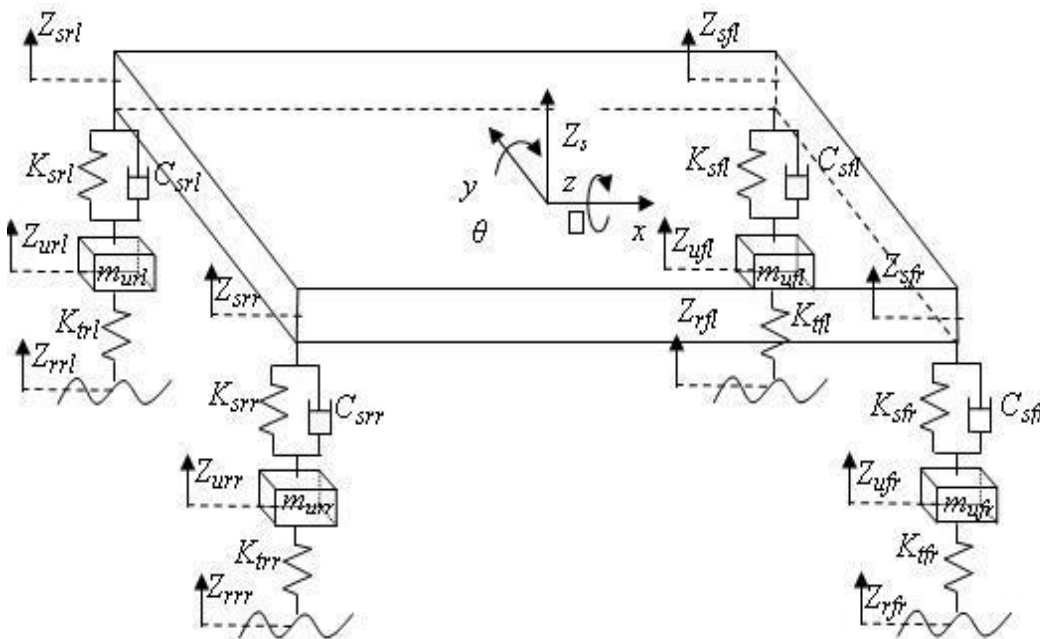
		Malli							
		A	B	C	D	E	F	G	
		1 pyörä	1 akseli	Puoliajoneuvo	Koko ajoneuvo	Koko ajoneuvo	Koko ajoneuvo	Yhdistelmä ajoneuvo	
		Vapausasteet (DOF)	2	4	4	7	14	33	100+
Herätteet Vasteet	Pituusprofiili	Oikea	x	x	x	x	x	x	x
		Vasen	x	x	x	x	x	x	x
	Geometria	Vaaka	-	-	-	-	x	x	x
		Pysty	-	-	-	-	x	x	x
Pystysuunnan 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	

6.3 Valittu ajoneuvomalli

6.3.1 Ajoneuvomalli

Ajoneuvosimulointien ajoneuvomalliksi valittiin taulukon 11 malli D eli nelipyöräinen jäykkäkorinen seitsemän vapausasteen täysajoneuvomalli. Aluksi kokeiltiin kaksipyöräistä ajoneuvomallia muuntamalla sivuttaisheittoriskien tarkasteluissa käytetty yksiakselimalli kahden akselin puolijoneuvomalliksi. Koska tämän työn rinnalla oli käynnissä myös sivuttaisheittoihin kohdistuva vastaavan tyyppinen työ ja kummassakin tarvittiin ajoneuvomallia, oli luontevaa ottaa pohjaksi täysajoneuvomalli, jolla voitiin tuottaa simuloinnit yhtä aikaa kumpaankin työhön.

Valittu ajoneuvomalli on 7 vapausasteen täysajoneuvomalli, jossa on kori ja neljä pyörää. Ajoneuvon kori on mallinnettu jäykkänä kappaleena, jolla on massa ja hitausmomentti. Kori voi siirtyä pystysuunnassa (z) ja kallistua sekä vaaka-akselin (y), että pitkittäisakselin (x) suhteen. Renkaat on kytketty runkoon jousien ja vaimentimien avulla. Korilla tarkoitetaan runkoa ja kuormaa yhdessä. Korilla on kolme vapausastetta, siirtymä pystysuunnassa ja kiertymät sekä vaaka-akselin (pitch) että pituusakselin (roll) ympäri. Kullakin neljällä pyörällä on yksi vapausaste, siirtymä pystysuunnassa.



Kuva 18. Seitsemän vapausasteen jäykkäkorinen ajoneuvomalli.

Mallin herätteenä on tien ajourien pintaprofiili, jota syötetään ajonopeuden määräämässä tahdissa. Herätteeksi voitaisiin laittaa myös tien sivukaltevuus ja vaaka- ja pystygeometria, mutta sitä ei tässä yhteydessä ole tehty, koska malliin on sisällytetty ainoastaan pystysuuntainen dynamiikka.

Ajoneuvomallia voidaan säätää parametreilla vastaamaan kuorma-autoa, linja-autoa tai henkilöautoa. Simuloinnissa ajonopeus on valittavissa. Mallin tuloksia tarkasteltaessa on syytä muistaa, että profiilisidonnaiset tunnusluvut tunnistavat monenlaisia tiehen liittyviä ongelmia. Ajoneuvomallilla tunnistetaan vain ajoneuvon liiketilaan vaikuttavat tien kohdat. Ajoneuvojen suunnittelussa huomioidaan tien ajoneuvon kohdistamat herätteet ja pyritään estämään näiden välittyminen ajoneuvon koriin.

Täten kaikki tienpinnan epätasaisuudet eivät vaikuta ajoneuvon korin liiketilaan. Toisin ne epätasaisuudet, jotka pääsevät aiheuttamaan vasteita koriin, ovat sitten enemmän tai vähemmän haitallisia.

Ajoneuvomallin jousitus ja vaimennus on mallinnettu toimivan täysin lineaarisesti, vaikka nykyisin on yleisesti käytössä progressiivisia jousitusratkaisuja. (Lineaarisuus on korvattavissa esim. iskunvaimentimissa epälineaarisilla vaimentimilla). Malli on aina yksinkertaistettu kuvaus ajoneuvosta, joten se kuvaa todellisen ajoneuvon käyttäytymistä rajoitetusti. Ajoneuvomallissa käytetään PTM:n 10 cm:n raakadataa ja se lasketaan Matlab/Simulink-ohjelmalla. Mallin laskentavaiheet on esitetty kuvassa 20.

6.3.2 Ajoneuvotyypit ja niiden parametrit

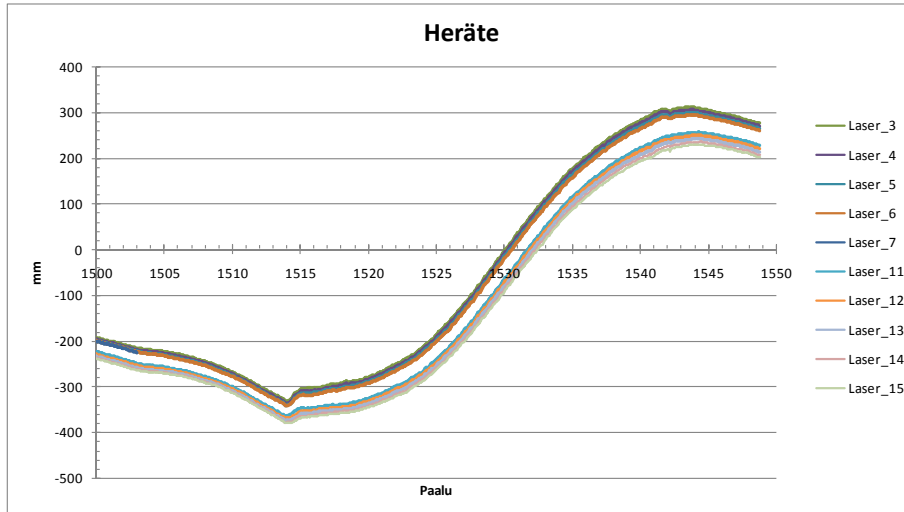
Simuloinnissa ajoneuvotyyppinä oli kolme, mutta niiden määrä on periaatteessa vapaasti valittavissa, kunhan määrittää vastaavat (taulukon 12 mukaiset) parametrit. Taulukossa on esitetty henkilö- ja kuorma-autoille tyypilliset simulointiparametrit.

Taulukko 12. Mallissa käytettävät ajoneuvotyypit ja niiden parametrit.

Parametri	Yksikkö	Henkilöauto	Kuorma-auto
Renkaan jousivakio	N/m	150000	1200 * 10 ³
Renkaan vaimennuskerroin	Ns/m	150	125
Etujousen jousivakio	N/m	14900	525 * 10 ³
Takajousen jousivakio	N/m	14900	968 * 10 ³
Etuiskarin vaimennuskerroin	Ns/m	475	12500
Takaiskarin vaimennuskerroin	Ns/m	475	12500
Etupyörän massa	kg	38	500
Takapyörän massa	kg	38	1000
Korin massa	kg	1513	18000
Akseliväli	m	2.65	4.65
Taka-akselin et. painopisteestä	m	1.17	2.00
Etuakselin et. painopisteestä	m	1.68	2.65
Etupyörien raideväli	m	1.54	2.36
Takapyörien raideväli	m	1.54	2.20
Hitausmomentti x-akselin suhteen	kgm ²	637	3000
Hitausmomentti y-akselin suhteen	kgm ²	2443	20000
Painopisteen korkeus	m	0.55	1.05
Korin kallistuskeskiön korkeus	m	0.55	0.78

6.3.3 Malliin syötettävä heräte

Malliin syötetään herätesignaali, joka muodostuu kummallekin ajouralle PTM:n viiden anturin tuottamista pituusprofiileista. Pituusprofiili tuotettiin usean anturin tiedoista, koska se stabiloi profiilitietoa ja kuvaa renkaan kulkemaa ajouraa paremmin (kuva 19). Herätesignaalin askelväli oli 100 mm. Pituusprofiilista oli suodatettu mäkisyys pois.



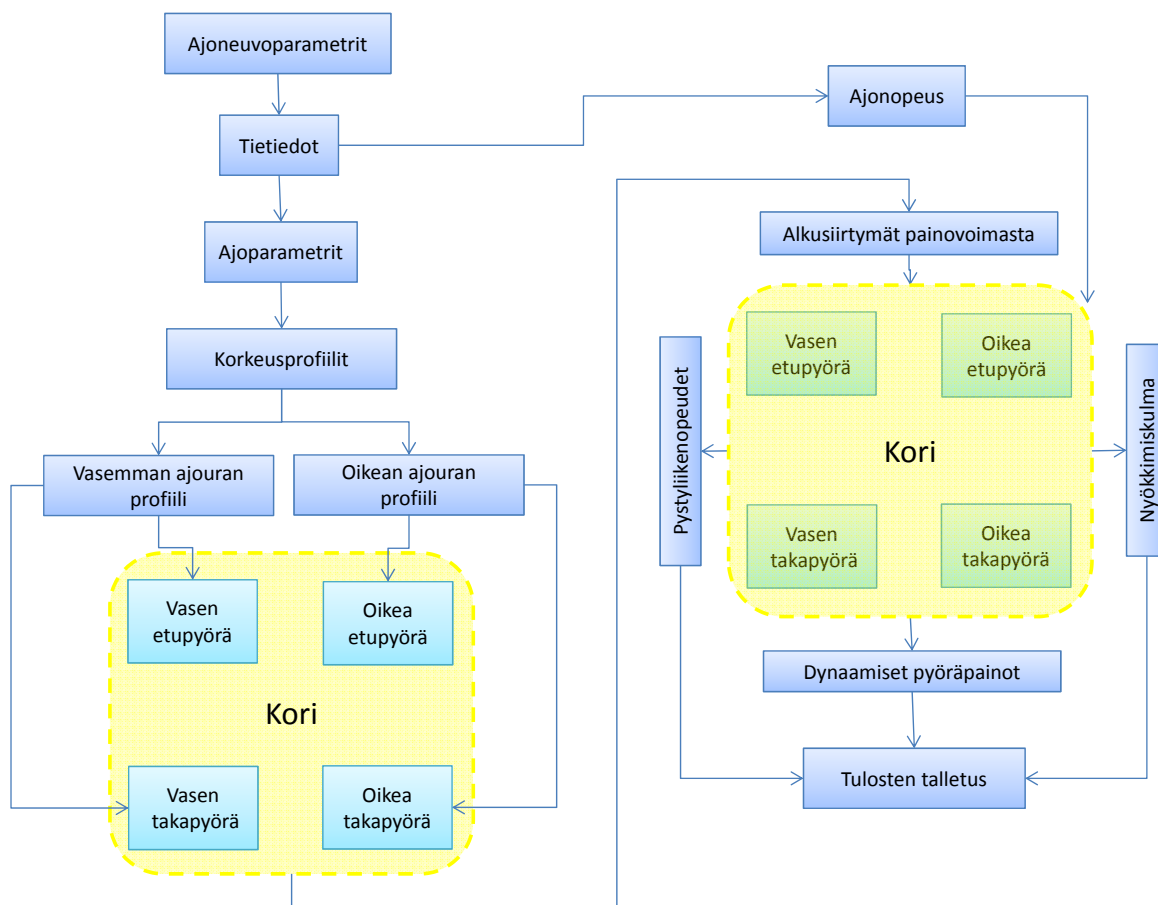
Kuva 19. Malliin syötettävä pituusprofiili heräte. Kummallekin pyörälle lasketaan keskiarvoprofiili ajourassa olevien viiden anturin tuottamista tiedoista.

6.3.4 Vasteiden laskenta

Simuloinnissa vasteiden laskenta tapahtui siten, että ohjelmaan syötettiin ajoneuvo-parametrit, ajoparametrit sekä syötteeksi annetun tieosan pituusprofiilit. Ajoneuvo-tyyppi ja sen ajoneuvoparametrit pidettiin vakioina. Nopeudeksi valittiin 80 km/h. Simulointi tehtiin tieosa, suunta ja kaista kerrallaan.

Ajoneuvon etupyörille syötettiin urien pituusprofiilia ajonopeuden määräämässä tahdissa ja takapyörille ajonopeuden ja akselivälin määräämällä viiveellä. Maan veto-voima vetää ajoneuvon painoa tien pintaa kohti ja ajoneuvon kori asettuu jousituksen määräämälle tasolle. Tien pituusprofiilit ovat herätteenä massa-jousi-systeemille, jonka avulla ajoneuvon korin liikkeet (vasteet) lasketaan. Perusvasteina olivat pystyliike, nyökkimisliike sekä pyöräpainot ja sitä kautta laskettu tierasitus. Vasteille laskettiin tunnusluvut, jotka olivat sijainti, nopeus ja kiihtyvyys siis pystysijainti, pystynopeus ja pystykiihtyvyys. Vastaavasti laskettiin nyökkimiskulma, sen muuttumisnopeus ja muuttumiskiihtyvyys. Siirtymille laskettiin itseisarvo. Muille muuttujille laskettiin 10 m matkalle muodostuva hajonta.

Dynamiikan simuloinneissa systeemin vasteet lasketaan Matlabilla ns. state-space -toiminnon avulla, missä laskennalla on tietty yleinen matemaattinen muoto.



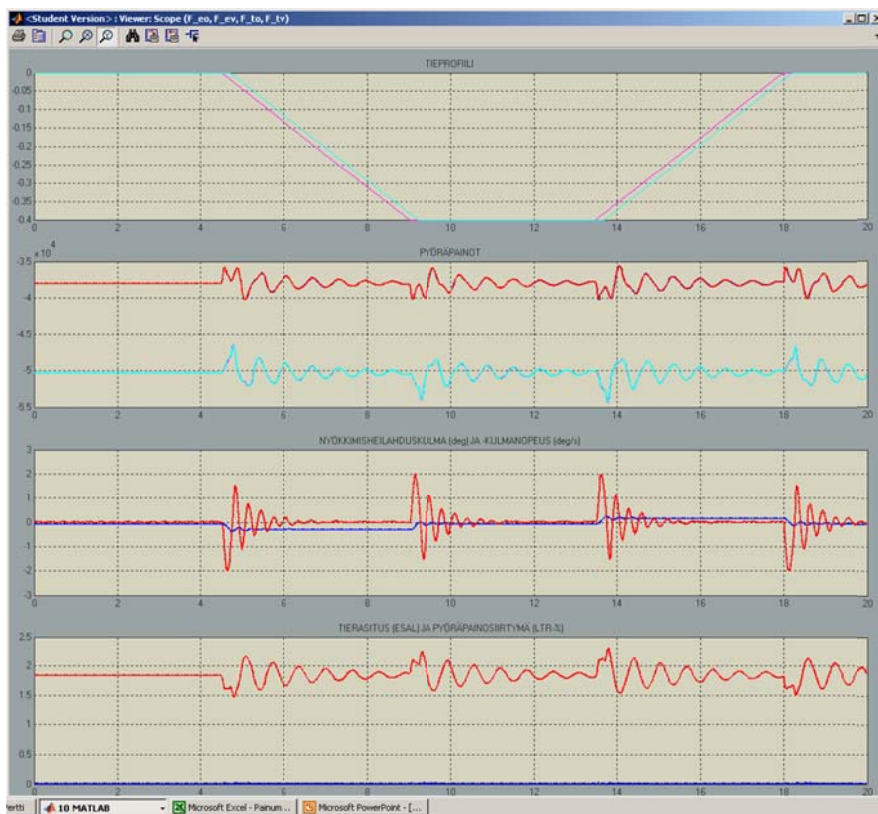
Kuva 20. Ajoneuvomallin vasteiden laskennan vaiheet.

7 Mallin tulokset

7.1 Pöytätestaus

Ajoneuvomallia testattiin ns. pöytätestillä syöttämällä herätteeksi tunnettuja profiilimuotoja ja tarkastelemalla miten mallin vasteet reagoivat siihen. Alla olevassa kuvassa (kuva 21) on esimerkki testauksen tuloksista. Kuvan yläosassa on fiktiivinen painumaprofiili, jossa pituuskaltevuus on ensin 0 noin 100 m matkan (vajaa 5 s). Sitteen se laskee 0,4 % kunnes saavutetaan painuma 400 mm. Tasainen kohta jatkuu noin 4 s ja sen jälkeen profiili jälleen nousee alkuperäiselle tasolle samalla 0,4 %:n kaltevuudella.

Profiilia pitkin asetetaan simuloinnissa kulkemaan 2-akselinen kuorma-auto 80 km/h vakionopeudella.



Kuva 21. Mallin pöytätestausta.

Kuvan toisessa osiossa on ajoneuvomallilla lasketut pyöräpainot (kN). Etuakselilla pyöräpainot ovat hiukan alle 4 t ja taka-akselilla noin 5 t. Vasemman ja oikean puolen pyöräpainot ovat samat, joten ne eivät erotu toisistaan. Koska ajoneuvon koordinaatistossa z-akseli osoittaa ylöspäin, ovat pyöräpainot negatiivisia. Kuvien vaaka-akselilla juoksee aika (s). Kuvasta havaitaan, että pyöräpainot reagoivat profiiliin painuman alkaessa, sen taittuessa sekä sen loppuessa. Suurin pyöräpainojen vaihtelu tapahtuu profiiliin taittumiskohdassa hiukan sen jälkeen.

Kolmannessa kuvassa on esitetty nyökkimiskulma asteina (sinisellä) sekä sen muutosnopeus (punaisella astetta/s). Alamäkeen mentäessä kulma on negatiivinen ja

ylämäkeen mentäessä positiivinen. Nyökkimiskulma ei vaihtelee kovin paljon sen sijaan sen muuttumisnopeus vaihtelee ja näyttää tunnistavan profiilin vaihtumiskohdat hyvin.

Kuvan alimmassa osassa tulostuvat ajoneuvon tierasitusta kuvaava kuormitusekvivalentti sekä pyöräpainsiirtymä (%). Koska molemmille ajourille syötetään samaa profiilia, on pyöräpainsiirtymä (vasemman ja oikean puolen välillä) nolla. Kuormitusekvivalentti osoittaa, miten ajoneuvo kuormittaa tierakennetta. Jos profiili olisi virheetön ja tasainen olisi kuormitus yhtä kuin ajoneuvon staattinen kuormitus. Koska profiili sisältää vaihtelua, ajoneuvon dynaaminen massa-jousitus –systemi reagoi siihen ja kuormitus muuttuu sykliseksi.

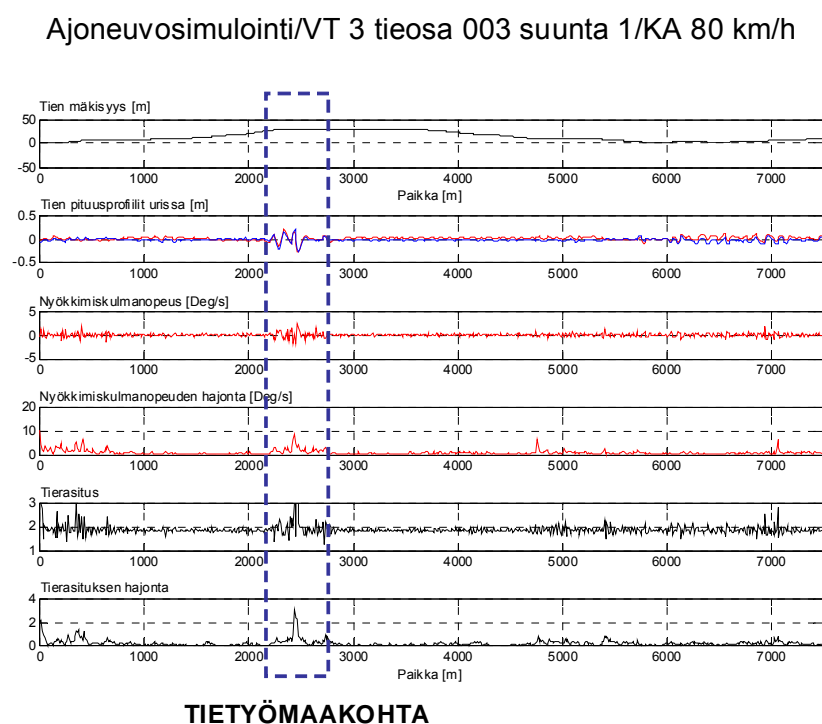
Kun mallia testattiin eri nopeuksilla, huomattiin, että nopeus vaikutti vasteisiin loogisesti. Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että malli tunnistaa profiilissa olevat epäsäännöllisyydet loogisesti.

7.2 Graafinen tarkastelu

7.2.1 Tasainen valtatie

Esimerkkinä tasaisen valtatieen tuottamista simulointivasteista on seuraava kuva 22, jossa on simuloitu valtatieen 3 tieosa 003 (Kehä III pohjoiseen päin). Simulointiajoneuvona on kuorma-auto ilman perävaunua ja nopeutena 80 km/h.

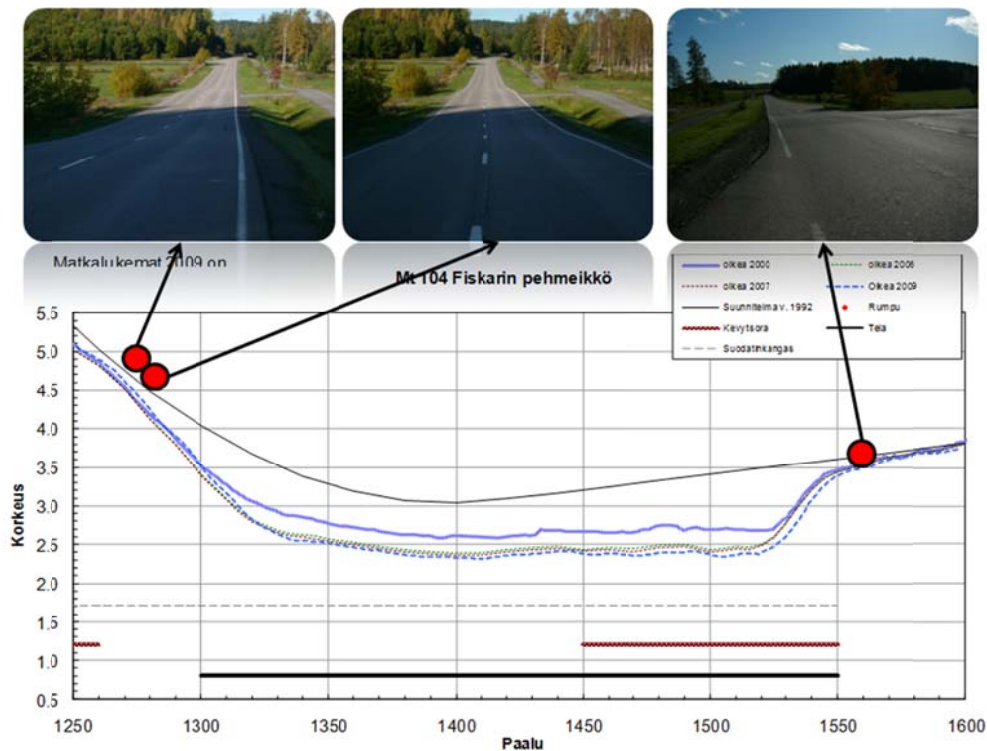
Tieosalla on mäkisyyttä siten, että tasausviiva nousee noin 30 m alkupisteeseen verrattuna ja laskee takaisin samalle tasolle. Pituusprofiilissa (mitattu keväällä 2012) on normaalia pientä vaihtelua, paitsi paaluvälillä 2200-2800, jossa havaittiin nyt tietyömaa. Nyökkimiskulma pysyy alle 1 asteessa (paitsi tietyömaakohdassa).



Kuva 22. Simulointituloksia tasaisella valtatiellä vt3 tieosalla 003 (mitattu 2012).

7.2.2 Painumia sisältävä maantie 104

Maantiellä 104 on painumakohta, jota on seurattu useita vuosia sekä palvelutasomittauksilla että vaaituksilla. Painumakohta alkaa pienen alamäen jälkeen peltoalueelle tultaessa ja loppuu peltoalueen päättyessä noin 300 m jälkeen. Painuma on noin yhden metrin suuruinen verrattaessa tien suunniteltuun tasaukseen. Painumamittausten tuloksia on esitetty kuvassa 23.



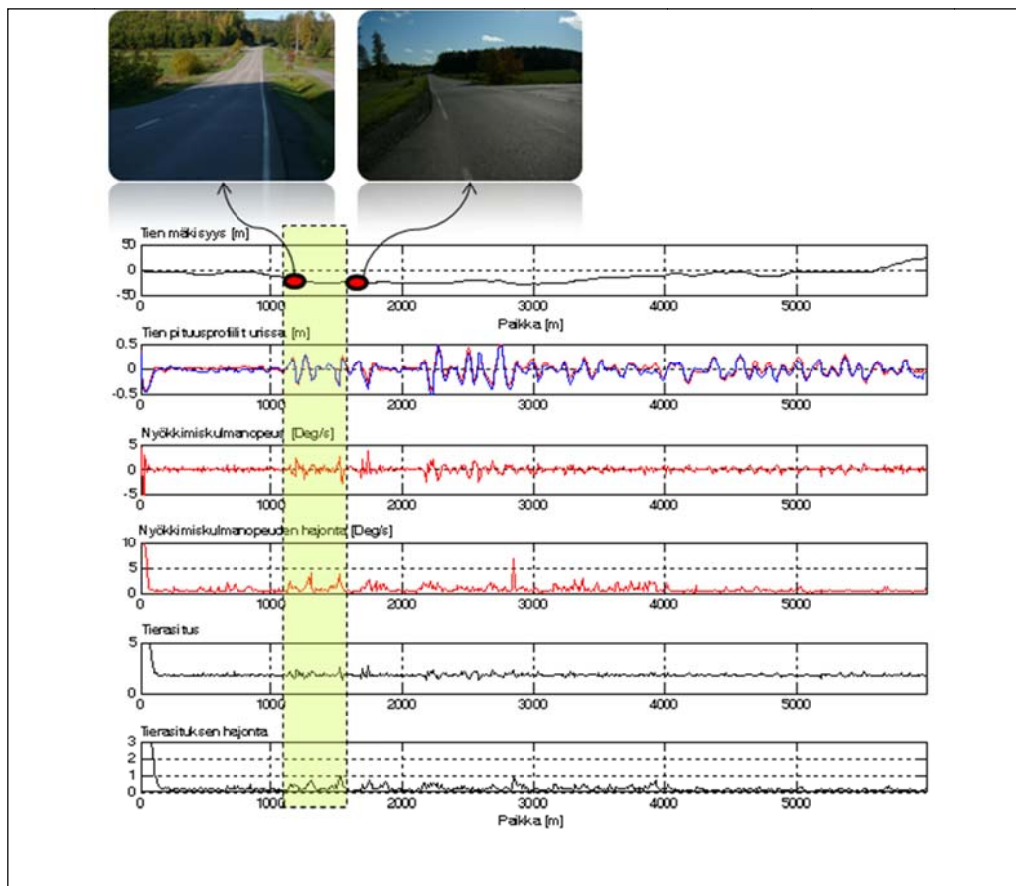
Kuva 23. Painumia sisältävä kohta maantiellä 104 tieosalla 1 paaluvälillä 1250-1550.

Kuvissa 24-25 on esitetty ajoneuvosimuloinnin tuloksia vastaavalta tieosalta. Simuloinnit on tehty koko tieosalle ja tarkastelun kohteena oleva painumakohta on kuvattu kellertävällä suorakaiteella. Kuvassa 24 on esitetty ajoneuvosimuloinnin nyökkimiskulmatulokset. Tuloksissa on kuusi kuvaa, jotka kuvaavat tieosan pituusprofiilia ja siitä laskettuja ajoneuvovasteita. Kuvasta voidaan tehdä seuraavia johtopäätöksiä:

- **Mäkisyys** vaihtelee alkukohtaan verrattuna ± 20 m. Painumakohta on alavalla kohdalla välillä 1250-1550 m.
- Tieosan ensimmäinen kilometri on **pituusprofiililtaan** melko tasaista. Toisella kilometrillä sijaitseva painumakohta näkyy pituusprofiilin vaihteluna. Pituusprofiili vaihtelee tieosalla myös painumakohdan jälkeen tieosan loppuun asti.
- Tunnusluvut tunnistavat tieosalla jotain poikkeavaa paaluväleillä 1000-3000.
- **Ajoneuvosimuloinnin nyökkimiskulma** saa suuria arvoja heti tieosan alussa, painumakohdassa sekä tieosan toisella kilometrillä. Tieosan alussa tapahtuvat suuret nyökkimisliikkeet ovat seurausta siitä, että simuloinnissa lähdetään heti liikkeelle täydellä nopeudella ja pituusprofiilissa saattaa olla alussa suuria vaihteluita ja ajoneuvon alkuaseman nopea asettuminen aiheuttaa suuria vasteita. Alkukohdan suuret vasteet tulee tavalla tai toisella kuitenkin

poistaa eikä niihin kannata tässä vaiheessa kiinnittää sen enempää huomiota. Nyökkimiskulma saa painumakohdassa suuria arvoja, noin ± 3 astetta. Samansuuruisia arvoja saadaan myös painumakohdan jälkeisessä ylämäessä sekä tieosan toisella kilometrillä. Nyökkimiskulma ei sellaisenaan paljasta haitallisia kohtia, koska se saa suuria arvoja ala- ja ylämäessä.

- **Nyökkimiskulmanopeus:** Nyökkimiskulmanopeus saa suuria arvoja painumakohtaan tultaessa ja siitä poistuttaessa. Samansuuruisia suuria arvoja saadaan myös painumakohdan jälkeen kohdassa 2800-2900. Nyökkimiskulmanopeus paljastaa painumakohdat paremmin kuin pelkkä nyökkimiskulma.
- **Tierasitus** saa suuria arvoja samalla osuudella kuin nyökkimiskulmanopeus. Tierasituksen huiput tulevat paremmin esille tarkastelemalla sen hajontaa.

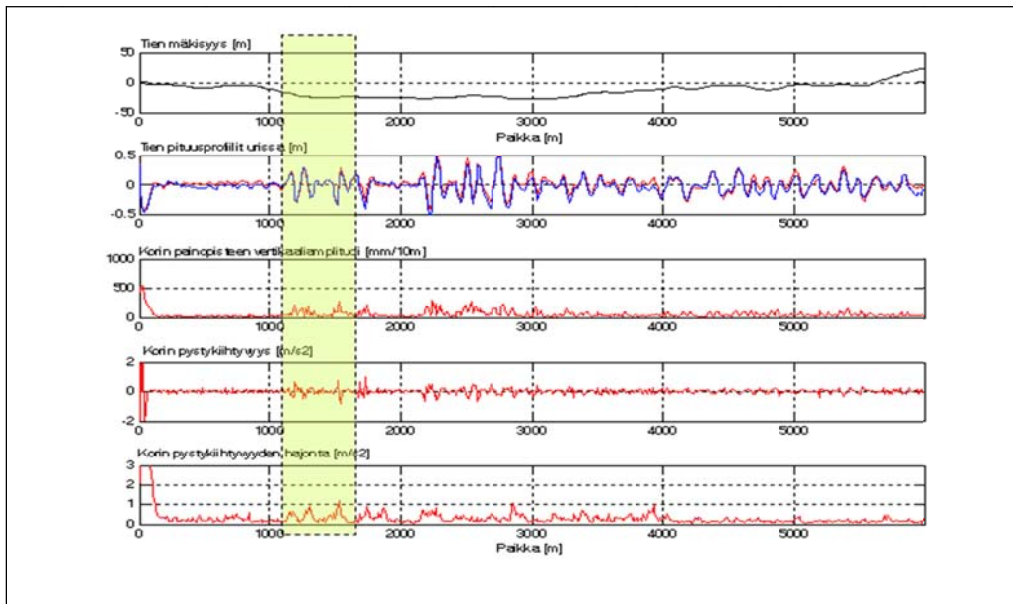


Kuva 24. Ajoneuvosimuloinnin (60 km/h) nyökkimiskulma-analyysi maantieltä 104 kohdasta 011_001.

Ajoneuvosimuloinnin toinen tulososio on esitetty kuvassa 25, joka kuvaa korin saamia pystyliikkeitä. Kuvan kaksi ylintä osaa ovat samoja kuin edellisessä kuvassa kuvaten tien mäkiisyyttä ja pituusprofiilia. Kolme alinta osaa kuvaavat ajoneuvon korin pystyliikkeitä. Niistä voidaan tehdä mm. seuraavia johtopäätöksiä:

- Korin painopisteen **pystysuunnan liikeamplitudi** (mm) kullakin 10 m jaksolla saa suuria arvoja sekä painumakohdassa että kolmannella kilometrillä. Amplitudit ovat suurimmillaan noin 250 mm kun simulointinopeus on 60 km/h. Simulointinopeuden nostaminen arvoon 80 km/h tai 90 km/h ei näytä kasvattavan pystysuunnan amplitudien maksimiarvoja.

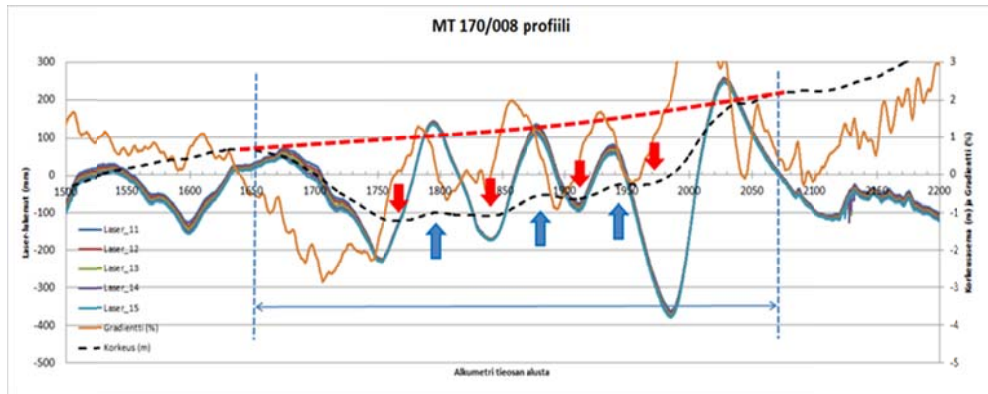
- Korin painopisteen **pystykiikkyvyys** saa suuria arvoja edellisen kuvan tapaan sekä painumakohdassa että sen jälkeisellä kilometrillä. Pystykiikkyvyksien maksimiarvot ovat painumakohdassa noin 1 m/s^2 . Simulointinopeus vaikuttaa pystykiikkyvyksiin selvästi. Nopeudella 90 km/h pystykiikkyvydet saavat jo yli 2 m/s^2 arvoja, mikä olisi käytännön ajotilanteessa melko epämiellyttävää.
- Korin **pystykiikkyvyyden hajonta** saa suuria arvoja sekä painumakohdassa että sen jälkeisillä kahdella kilometrillä.
- Kaikki kolme pystyliikkeisiin liittyvää tunnuslukua reagoivat painumakohdassa selvästi. Pystyliikkeiden tunnusluvut tunnistavat tiesalla olevan jotain poikkeavaa paaluvälillä $1000\text{-}4000 \text{ m}$.



Kuva 25. Ajoneuvosimuloinnin (60 km/h) pystyliikeanalyysi maantieltä 104 kohdasta 011_001 (Ajorata=0, suunta=1, kaista=1).

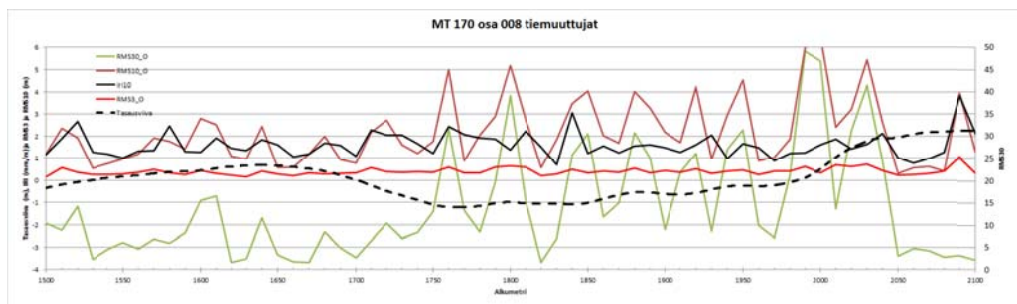
7.2.3 Painumia sisältävä maantie 170

Maantiellä 170 tiesalla 8 on useita painumia, joista yksi on paaluvälillä $1600\text{-}2100$. Painuman kokonaispituus on noin 400 m ja sen maksimiarvo (vapaasti piirrettyyn oletettuun ideaaliseen tasausviivaan nähden) noin 2 m . Kuvassa 26 on palvelutasomittausten oikean ajouran viiden anturin lukemat ja hetkellinen pituuskaltevuus, josta on laskettu ajouran korkeusasema tiesosan alussa asetettuun 0 -arvoon nähden. Pituuskaltevuus on painuman alkaessa keskimäärin -2% . Painunut tasausviiva aaltoilee raskaiden ajoneuvojen kuormitustaajuuden asettamalla taajuudella siten, että sen kokonaispituudella on noin kolme nyökkimispaikkaa, kunnes tullaan painuman loppukohtaan, jossa tasausviivan pituuskaltevuus on yli 5% . Painumakohdille on tyypillistä, että niille syntyy ajoneuvojen nyökkimisliikkeiden ja syklisen kuormituksen taakia aaltoileva profiili, jossa painuminen jatkuu eniten aallon pohjissa.

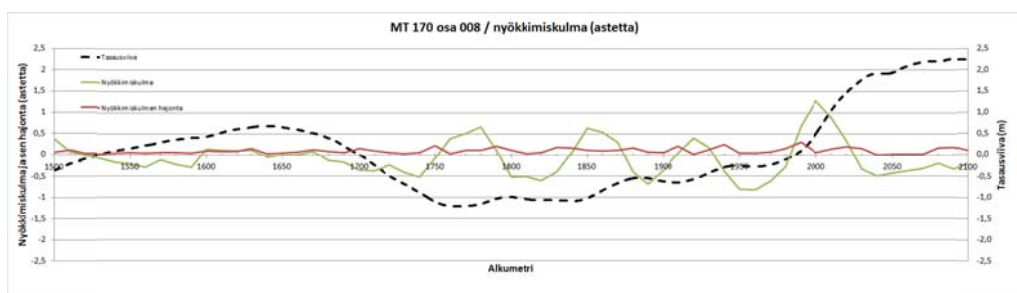


Kuva 26. Painumia sisältävä kohta maantiellä 170 tieosalla 8 paaluvälillä 1650-2050.

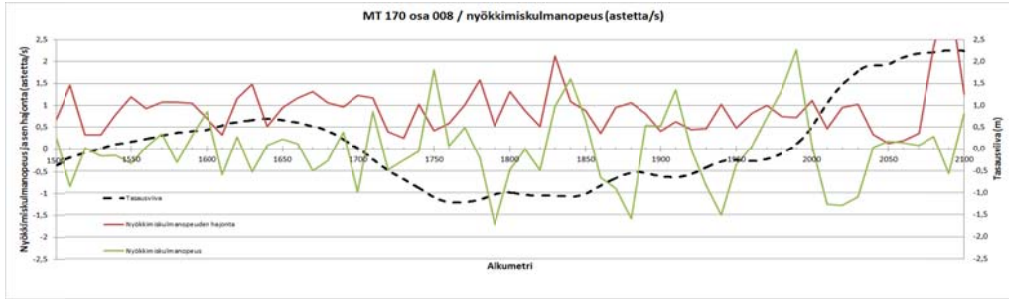
Kuvassa 27 on esitetty sama painumakohta kuin edellisessäkin kuvassa, mutta on tarkasteltu pienempää osuutta. Lisäksi on esitetty tärkeimmät tietunnusluvut IRI10, RMS3, RMS10 ja RMS30. Pituusheittoriski tunnistaa painuman kohdissa 1880-1890 ja 1990-2000. Samoissa kohdissa RMS10 ja RMS30 saavat suuria arvoja, mutta ne eivät poikkea mitenkään muissa kohdissa olevista suurista arvoista. IRI ja RMS3 eivät tunnista painumakohtaa ollenkaan.



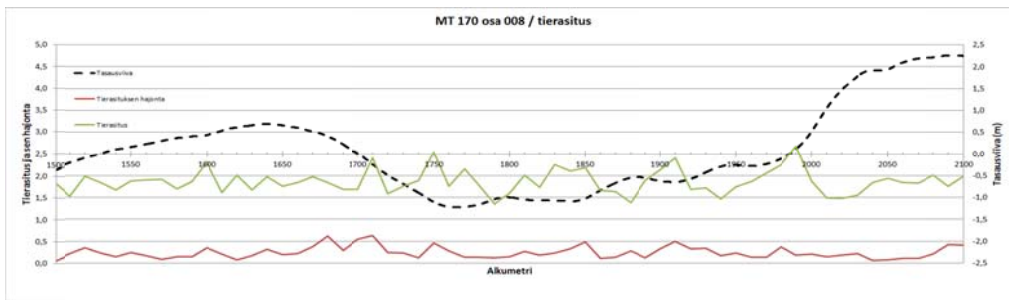
Kuva 27. Mt 170/008 painumakohdan tietunnusluvut IRI, RMS3, RMS10 ja RMS30.



Kuva 28. Maantien 170 tieosan 8 painumakohta ja nyökkimiskulma.



Kuva 29. Maantien 170 tieosan 8 painumakohta ja nyökkimiskulmanopeus.



Kuva 30. Maantien 170 tieosan 8 painumakohta ja tiersitus.

Nyökkimiskulma saa kuvassa 28 arvoja välillä $\pm 0,5$ astetta ja noudattaa tiessä olevaa aaltoilevaa profiilia. Nyökkimiskulmanopeus saa vaihtelevia suuria arvoja kuvassa 29. Nyökkimiskulmanopeuden hajonta ei kuitenkaan näytä reagoivan kovin selvästi. Kuvassa 30 tiersitus saa vaihtelevia arvoja painuman kohdalla. Tiersituksen hajonta tunnistaa painumakohtien alku- ja loppukohdat, mutta ei tunnista niiden välissä mitään erityistä. Pystyakseleiden skaalat haittaavat hiukan joidenkin käyrien visuaalista tulkintaa.

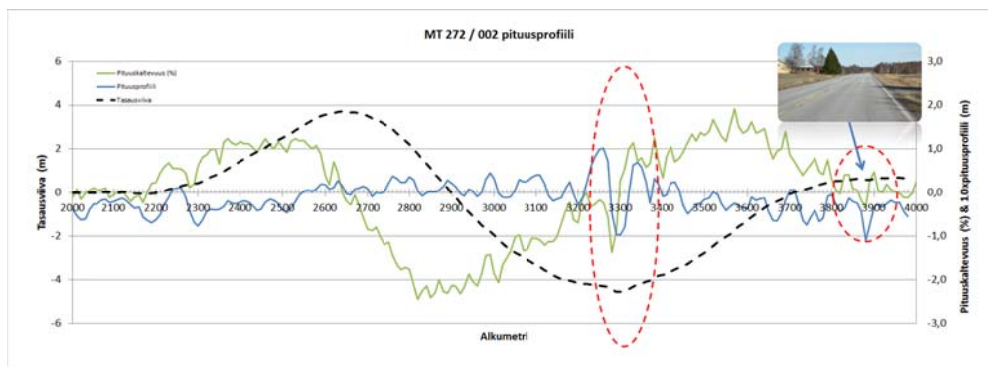
7.2.4 Jyrkän painuman sisältävä kohde

Maantien 272 tieosalta 2 oli käytettävissä paaluvälin 2000-4000 profiilitiedot (kuva 32). Kyseinen jakso sisältää useita painumia, joista yksi on lyhyehkö jyrkkiä pituus- kaltevuusmuutoksia edustava kohta paaluvälillä 3860-3900 (kuva 33). Painuman näkyvä kokonaispituus on noin 40 m ja sen maksimiarvo (vapaasti piirrettyyn oletettuun ideaaliseen tasausviivaan nähden) noin 20 cm.

Kuvissa 33-37 on esitetty 150 m osuus, josta painumakohta ja siihen sovitettut eri tunnuslukujen käyrät näkyvät selvemmin. Painumakohta sijaitsee pelto-osuudella, mutta ei ole tieosan alavimmalla kohdalla. Se on samanmuotoinen molemmissa ajo-suunnissa.

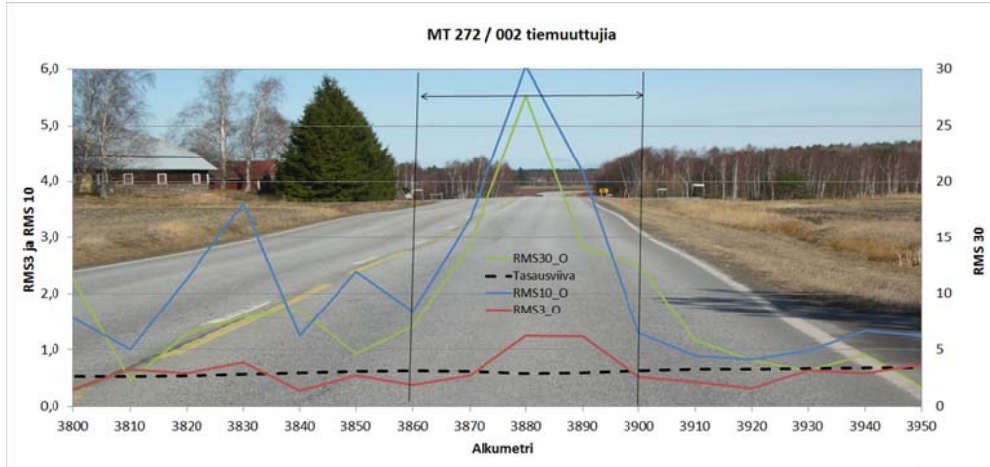


Kuva 31. Suhteellisen jyrkkä pituuskaltevuuden muutoskohta maantiellä 292 tieosalla 2 kohdassa 3270.

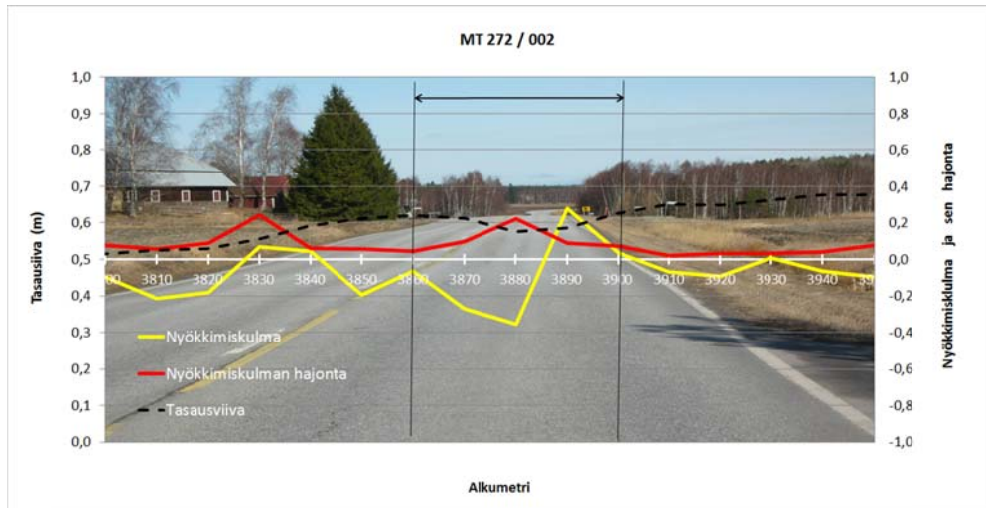


Kuva 32. Maantien 272 tieosan 2 paaluvälin 2000-4000 tasaus, pituuskaltevuus ja pituusprofiili. Kohdassa 3260-3330 on pitkähäkö painumakohta ja kohdassa 3880 lyhyempi mutta toistuva painumakohta.

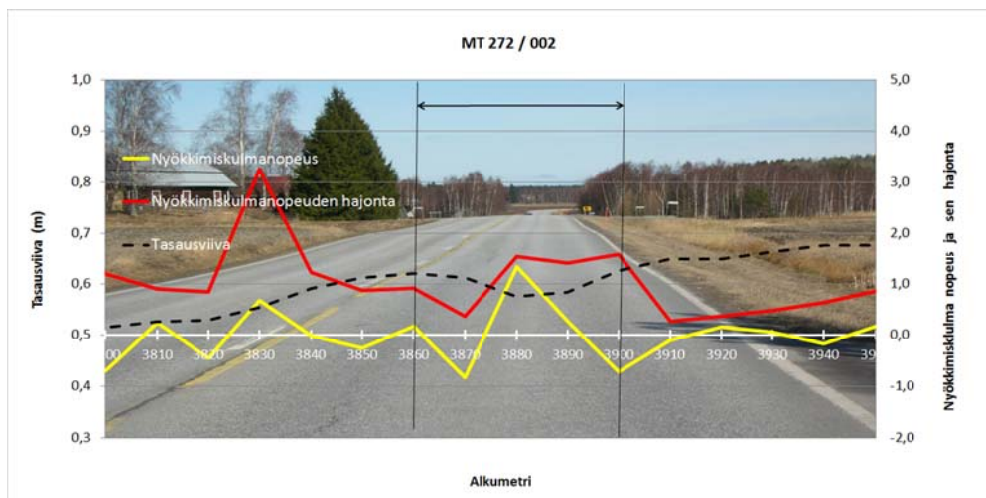
Painumakohta on tunnistettavissa RMS3, RMS10- ja RMS30-tunnusluvuilla, joista paras erottelukyky on pitkäaaltoisimmalla RMS30-tunnusluvulla. Toinen painuma on tunnistettavissa kohdassa 3830 (kuva 33), mutta sen tunnistaa vain RMS10.



Kuva 33. Maantien 272 tieosa 2 paaluvälin 3800-3950 RMS3, RMS10 ja RMS30.



Kuva 34. Kuorma-auton nyökkimiskulma ja sen hajonta mt 272 tieosan 2 paaluvälillä 3800-3950.

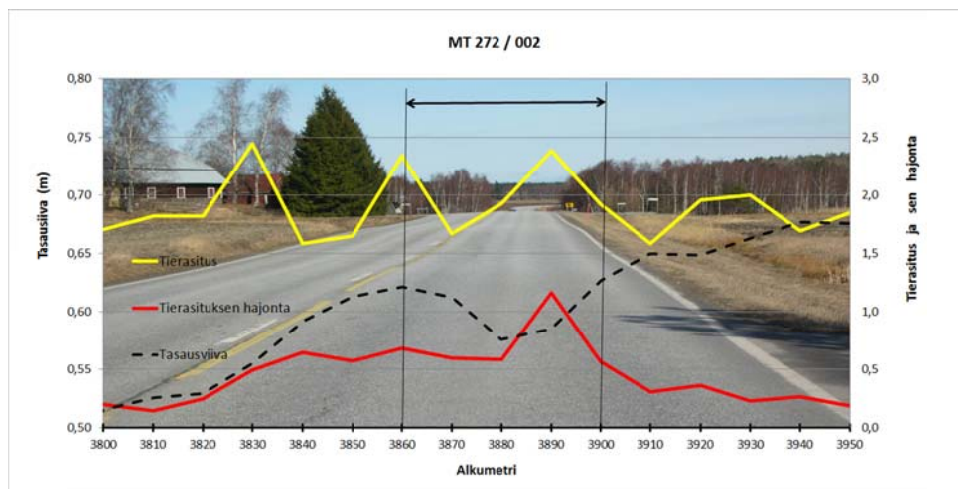


Kuva 35. Kuorma-auton nyökkimiskulmanopeus ja sen hajonta.

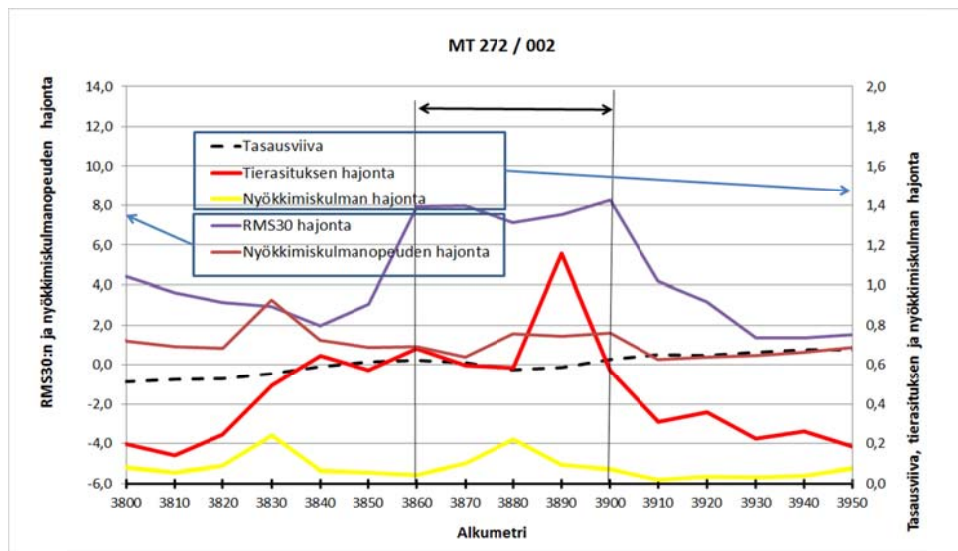
Kuvissa 34 ja 35 on esitetty vastaavan kohdan simuloidut kuorma-auton liikevasteet, nyökkimiskulma ja sen nopeus. Nyökkimiskulma saa negatiivisen ja positiivisen havaittavan arvon painuman kohdalla. Nyökkimiskulman hajonta tunnistaa molemmat edellä mainitut kohdat.

Nyökkimiskulmanopeus (kuva 36) tunnistaa pääpainumakohdan ja sen hajonta tunnistaa sitä aikaisemman painumakohdan.

Kuorma-auton aiheuttama tierasitus saa kolme suurehkoa arvoa ja sen hajonta yhden suurehkon arvon. Painunut tasausviiva aaltoilee raskaiden taajuudella, joka on usein ajoneuvojen nyökkimistaajuuden suuruinen. Kuvan 36 kohdassa nyökkimisiikkeen aallonpituus on noin 30 m, mikä vastaa 80 km/h tuntinopeudella 1,3-1,4 Hz:n taajuutta.



Kuva 36. Kuorma-auton aiheuttama tierasitus ja sen hajonta.



Kuva 37. Yhdistelmä hajonta-tunnuslukujen käyttäytymisestä jyrkähkön painuman kohdalla.

Kuvassa 37 on yhdistelmä eräistä tunnusluvuista. Erityisesti herättää huomiota RMS30:n hajonta, joka tunnistaa painumakohdan hyvin, tosin jättää siitä alkuosan tunnistamatta. Tierasituksen hajonta tunnistaa yhden muita haitallisemman kohdan. Nyökkimiskulman hajonta tunnistaa kaksi kohtaa. Akseleiden skaalat jälleen haittaavat tulkintaa.

8 Tunnuslukujen vertailu

8.1 Vertailtavat tunnusluvut

Vertailtaviksi tunnusluvuiksi valittiin tieprofiilista laskettuja tunnuslukuja ja ajoneuvomallien vasteista saatavia tunnuslukuja. Tieprofiilista saatavat perinteiset tunnusluvut ovat taulukon 13 mukaiset. Tieprofiilista laskettavia tunnuslukuja ovat pituuskaltevuus, IRI, eri aallonpituusalueelta tuotetut RMS-tunnusluvut sekä komposiittitunnusluku pituusheittoriski. Pituuskaltevuutta tuotetaan 1-50 m laskentapituuksille. Muille tunnusluvuille laskentapituusvaihtoehdot ovat 10 m ja 100 m. RMS1 voidaan lyhytaaltoisuutensa takia tuottaa myös metrin laskentavälille.

Taulukko 13. Tieprofiilista saatavia perinteisiä tunnuslukuja.

Tunnusluku	Laskentapituus (m)			
	1	10	50	100
Pituuskaltevuus (%)	grad ₁	grad ₁₀	grad ₅₀	-
PH-riski	-	PH-riski ₁₀	-	PH-riski ₁₀₀
IRI (O&V)	-	IRI ₁₀ ¹	-	IRI ₁₀₀
RMS1 (O&V)	RMS1 ₁	RMS1 ₁₀	-	RMS1 ₁₀₀
RMS3 (O&V)	- ²	RMS3 ₁₀	-	RMS3 ₁₀₀
RMS10 (O&V)	- ²	RMS10 ₁₀	-	RMS10 ₁₀₀
RMS30 (O&V)	- ²	- ²	-	RMS30 ₁₀₀

¹ IRI on ajodynamiikkaan perustuva tunnusluku ja se sisältää aallonpituuksia 0,5-30 m. Se kohdistuu 10 m laskentavälille tuotettuna osittain väärälle 10 metriselle.

² Pitkäaaltoisia RMS-muuttujia ei kannata tuottaa liian lyhyille laskentapituuksille.

Ajoneuvosimuloinnista tuotettavat tunnusluvut ovat taulukon 14 mukaiset. Pystysuuntaisia tunnuslukuja lienee tarpeetonta ottaa vertailuun, koska IRI-malli jo ottaa (ainakin jossain määrin) huomioon ne. Keskeisimmät ajoneuvosimuloinnista saatavat tunnusluvut ovat nyökkimiskulman liikkeet, joko kulma itsessään tai kulmanopeus. Koska tarkastelu painottuu raskaisiin ajoneuvoihin, myös kuormitusekvivalentti tai dynaaminen kuormituslisä olisivat tarkastelun arvoisia. Ajoneuvosimuloinnissa on keskeistä nopeus. Simuloinnit voidaan tuottaa halutuille nopeuksille joko niin, että tuotetaan kaikki nopeudet tai niin, että tuotetaan kullekin tielle vain sen nopeusrajoituksen mukaiset laskennat (raskaiden ajoneuvojen ajoneuvokohtaiset nopeusrajoitukset huomioiden). Tunnuksien vertailussa pitäydytään samassa nopeudessa kuin IRI-laskennoissakin eli 80 km/h.

Jotta ajoneuvosimulointi tuottaisi lisäarvoa, tulisi simuloinnissa tuotettujen tunnuslukujen pystyä tunnistamaan painumakohdat (ja tien ongelmakohdat ylipäätään) paremmin kuin perinteiset olemassa olevat tunnusluvut.

Taulukko 14. Ajoneuvomallista saatavia tunnuslukuja.

Tunnusluku	Tien nopeusrajoitus (km/h)					
	60	70	80	90	100 ²	120 ²
Korin painopisteen pystyliike (mm/m) ³	Z_{zk60}	Z_{zk70}	Z_{zk80}	Z_{zk90}	Z_{zk100}	Z_{zk120}
Korin painopisteen pystynopeus (m/s) ¹	V_{zk60}	V_{zk70}	V_{zk80}	V_{zk90}	V_{zk100}	V_{zk120}
Korin painopisteen pystykiihtyvyys (m/s ²) ¹	a_{zk60}	a_{zk70}	a_{zk80}	a_{zk90}	a_{zk100}	a_{zk120}
Korin nyökkimiskulma (°) ¹	Θ_{60}	Θ_{70}	Θ_{80}	Θ_{90}	Θ_{100}	Θ_{120}
Korin nyökkimiskulmanopeus (°/s) ¹	$d\Theta_{60}/dt$	$d\Theta_{70}/dt$	$d\Theta_{80}/dt$	$d\Theta_{90}/dt$	$d\Theta_{100}/dt$	$d\Theta_{120}/dt$
Ajoneuvon kuormitusekvivalentti ¹	ESAL ₆₀	ESAL ₇₀	ESAL ₈₀	ESAL ₉₀	- ²	- ²
Dynaaminen kuormituslisä (%) ¹	DLC ₆₀	DLC ₇₀	DLC ₈₀	DLC ₉₀	- ²	- ²
¹⁾ Eräänä varteenotettavana tunnuslukuvaihtoehtona myös hajonta ²⁾ Raskaille ajoneuvoilla käytettävissä nopeuksia rajoitetusti. ³⁾ Vastaisi täysajoneuvon IRI-mallia.						

8.2 Kohteet ja niiden valinta

Tunnuslukujen testaamista varten valittiin 43 Uudenmaan, Varsinais-Suomen ja Vaasan alueilta löydettyä painumia sisältävää kohdetta. Kohteet käytiin mittaamassa PTM-autolla ja samalla painumia sisältäneet tien kohdat kartoitettiin merkkimalla niiden kohtiin painumaa osoittava merkki. Mittauksen yhteydessä kohteet myös kuvattiin ajoneuvon still-kameralla.

Muut kuin paikallistiekohteet mitattiin molempiin suuntiin, koska usein ongelmakohdat ovat siinä suunnassa, jota ei ole mitattu. Uudenmaan kohteita ei kuitenkaan mitattu kuin yhteen suuntaan. Kohteiden mitattava yhteispituus oli 119 km.




Uudenmaan kohteet valittiin ns. painumakohteista, joista saatiin lista Heikki Onniselta (Destia). Varsinais-Suomen ja Vaasan kohteet saatiin ao. ELY-keskuksilta.

Pääteiltä oli 17 kohdetta ja maanteiltä 16 kohdetta ja loput 10 yhdysteiltä.

8.3 Kohteiden maastokatselmus

Kohteiden maastokatselmuksessa määritettiin kuinka monta ja miten vakavaa pituus-suuntaista painumanomaista kohtaa kullakin kohteella oli. Luokitus oli kolmiportainen, missä lievin vakavuusluokka oli juuri ja juuri havaittava painuma ja vakavin luokka oli selvästi havaittava ja haitallinen painuma. Väliluokan painumat olivat selvästi havaittavia, mutta eivät tuntuneet haitallisilta.

MAASTOKATSELMUKSEN LUOKITUS:

-  = PITUUSHEITTO JUURI JA JUURI HAVAITTAVISSA
-  = PITUUSHEITTO SELVÄSTI HAVAITTAVISSA, MUTTA EI HAITALLINEN
-  = PITUUSHEITTO SELVÄSTI HAVAITTAVISSA JA SELVÄSTI HAITALLINEN

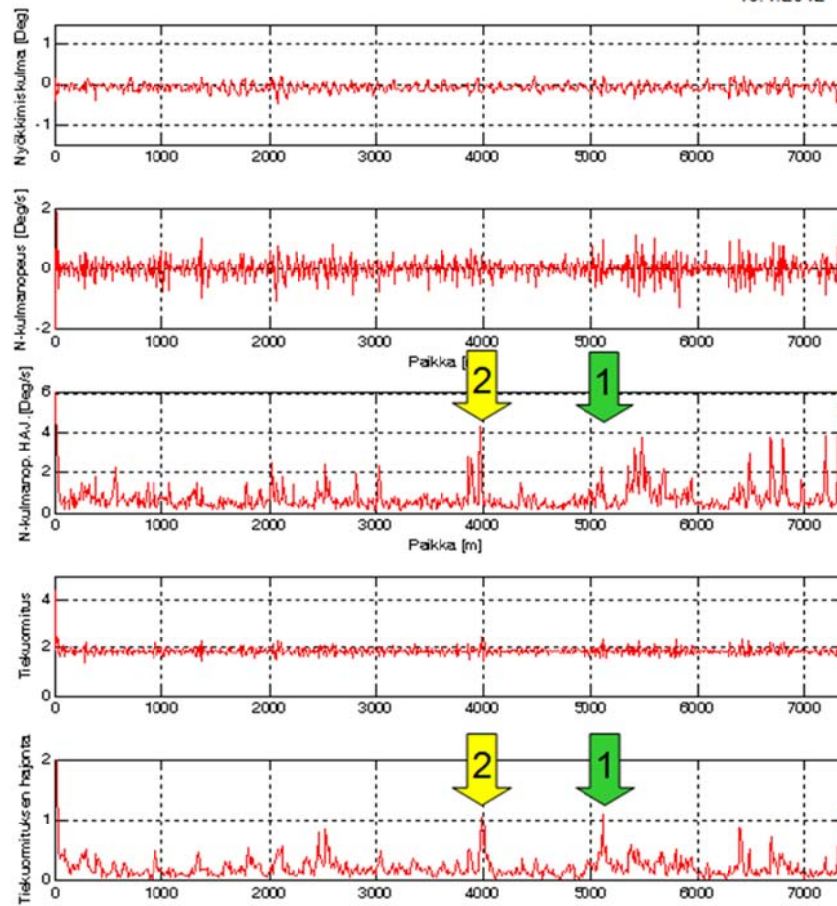
Kuva 38. Maastokatselmuksessa käytetty pituussuuntaisten kohtien vakavuusarviointi.

Maastokohteet laskettiin läpi ajoneuvosimuloinnilla ja niistä tuotettiin ajodynamiikkaan liittyvät tunnusluvut 10 m laskentavälillä. Osa tuloksista tuotettiin kuvan 39 mukaisina kuvina, joihin sijoitettiin maastossa havaitut arviot. Kuvista saatiin alustava tuntuma sille, miten hyvin havaittu pituussuuntainen painuma on kullakin muuttujalla tunnistettavissa.

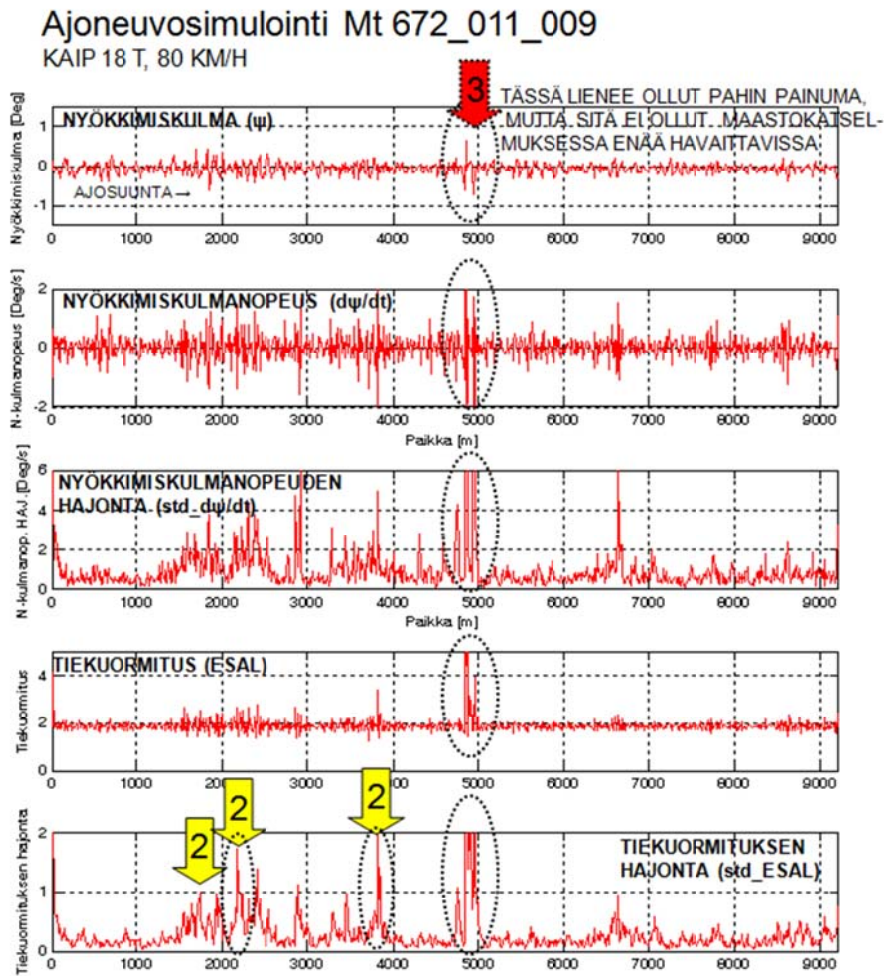
Ajoneuvosimulointi Kt 68_011_038

KAIP 18 T, 80 KM/H

16.1.2012



Kuva 39. Simulointitulosten ja maastokatselmuksen vertailu.



Kuva 40. Simulointitulosten ja maastokatselmuksen vertailu.

8.4 Painumien tunnistuskyky

8.4.1 Aineisto

Tunnuslukujen painumantunnistuskkyä selvitetiin 43 kohteelta saatujen mittaustietojen perusteella. Kohteiden kokonaispituus oli 132 km. Kohteet mitattiin palvelutasomittarilla syksyllä 2011. Kohteille tehtiin myös maastokatselmus, missä ne ajettiin läpi henkilöautolla ja ne arvioitiin painumaluokkiin ajotuntuman perusteella. Painumaluokat olivat koodeina 0, 1, 2, ja 3. Koodi 1 kuvaa juuri ja juuri havaittavissa olevaa pituussuuntaista heilahdusta, joka ei välttämättä ole painuma vaan yksittäinen pituussuuntaiselta heitolta tai epätasaisuudelta tuntuva kohta. Sen arvioinnissa on oltava erittäin tarkkana ja usein on valitettavasti niin, ettei samaa herkkyyttä pysty sen arvioinnin osalta pitämään yllä. Eli sen oikeellisuuteen on syytä suhtautua varauksella.

Taulukoissa 16 ja 17 on esitetty eräitä keskiarvoja kohteittain eri painumaluokissa. Osalta kohteista painumaluokat arvioitiin, osalta ne jäivät arvioimatta tai kohteet olivat painumien arvioinnin kannalta epämääräisiä, jolloin arviointi on myös jätetty pois.

Mitattujen kohteiden pituus oli 132 km, josta painumaluokat arvioitiin vähän yli 80 km:ltä. Eniten oli luonnollisesti painumaluokkaa nolla eli ei havaittavia painumia. Juuri ja juuri havaittavia painumia oli 770 m, selvästi havaittavia 2257 m ja haitallisia 170 m. Tietunnuslukujen keskiarvot nousevat painumaluokan vakavuuden suhteen loogisesti.

Taulukko 16. Kohteiden pituus ja keskimääräinen IRI maastokatselmuksen painumaluokissa.

Kohteiden pituus painumaluokittain (m)							Kohteiden keskimääräiset IRI-arvot painumaluokittain (mm/m)							
Tie	Ajorata Suunta Kaista Tiesosa	Vakavuusluokka-arvio				(tyhjä)	Yhteensä	Kohde Tie/AjorataSuuntaKaista/Tiesosa	Vakavuusluokka-arvio				(tyhjä)	Yhteensä
		Ei painumaa	Juuri ja juuri havaittava painuma	Havaittava painuma	Haitallinen painuma				Ei painumaa	Juuri ja juuri havaittava painuma	Havaittava painuma	Haitallinen painuma		
7111004						4643	4643	7111004					1,52	1,52
7111005						2432	2432	7111005					1,61	1,61
7111006						5487	5487	7111006					1,56	1,56
7111007						6322	6322	7111007					1,49	1,49
7111008						3864	3864	7111008					1,64	1,64
8011310		3000				202	3202	8011310	1,29				1,56	1,31
8021310		3010				191	3201	8021310	1,09				1,42	1,11
45111002						499	499	45111002					1,92	1,92
50011001		312		40			352	50011001	1,65		5,25			2,05
50111008		473		30			503	50111008	1,58		1,97			1,60
51111005						197	197	51111005					2,07	2,07
51111006						1094	1094	51111006					1,21	1,21
55011001		6799	10	280		100	7189	55011001	1,73	2,91	2,38		2,04	1,76
55011002		5812	30	150			5992	55011002	1,73	1,61	2,91			1,76
55011003		7696	50	150			7896	55011003	1,71	2,27	2,50			1,72
68011038		7290		20		58	7368	68011038	1,32		2,81		5,60	1,36
68021038		7200	10			155	7365	68021038	1,26	1,50			2,87	1,29
104011001		350		530		5120	6000	104011001	2,16		2,94		1,92	2,03
170011008			90	320		7041	7451	170011008		1,75	1,74		1,59	1,60
181011010						695	695	181011010					4,01	4,01
181021010						682	682	181021010					3,88	3,88
192011008		978		20			998	192011008	1,75		2,81			1,77
192021008		190		20		789	999	192021008	1,14		3,14		1,48	1,44
196011010		933	20	50			1003	196011010	2,08	4,35	4,22			2,23
196021010		974	10	20			1004	196021010	1,79	6,20	5,51			1,91
272011002		1842	30	110	20		2002	272011002	2,03	4,31	2,79	4,04		2,12
272021002		190		100	20	1692	2002	272021002	1,53		3,15	4,37	1,63	1,72
672011009		8870	10	80	50	215	9225	672011009	1,41	3,09	5,90	12,32	2,19	1,53
672021009		8890	30	60	30	216	9226	672021009	1,49	1,92	3,02	45,21	2,28	1,67
2260011010						1001	1001	2260011010					1,99	1,99
2260021010						1004	1004	2260021010					2,14	2,14
2652011001		2280	210	117			2607	2652011001	2,24	3,15	3,10			2,35
2652021001		2416	130	60			2606	2652021001	2,17	2,35	3,31			2,21
12151011001						60	60	12151011001					4,81	4,81
12157011002						3000	3000	12157011002					2,67	2,67
12269011001		940	30	20	10		1000	12269011001	3,12	2,52	10,49	6,86		3,28
12270011001		852	30	30	20	20	952	12270011001	2,74	7,40	7,93	19,05	12,46	3,59
12274011001		1191	80	50	20		1341	12274011001	3,70	3,87	5,70	3,94		3,78
12275011001						1967	1967	12275011001					2,10	2,10
12871011004						1725	1725	12871011004					3,48	3,48
12875011001						1002	1002	12875011001					2,15	2,15
12960011001						1985	1985	12960011001					2,57	2,57
13508011002						2969	2969	13508011002					2,88	2,88
Yhteensä		72488	770	2257	170	56457	132142	Yhteensä	1,63	2,99	3,07	15,70	1,94	1,82

Juuri ja juuri havaittavien painumakohtien RMS10- ja RMS30-arvot ovat melkein yhtä suuret kuin selvästi painumiksi havaittavissa kohdissa (taulukko 17). Tämä viittaa siihen, että kyseiset luokat voitaisiin joko yhdistää tai sitten siihen, että ne ovat erilaisia vaikka erilaisuus ei RMS-tunnusluvuissa näy.

PH-riski tunnistaa painumia sisältämättömistä kohdista 99 %, lieviä painumia sisältävistä kohdista 19 %, selviä painumia sisältävistä kohdista 23 % sekä haitallisia painumia sisältävistä kohdista 59 %. Jos lievät painumat luetaan painumia sisältämättömiksi kohdiksi, ja selvät ja haitalliset painumat painumia sisältäviksi kohdiksi, niin PH-riskin painumien tunnistuskyky on vain 26 % mikä on melko heikko (taulukko 18).

Taulukko 17. Kohteiden keskimääräiset RMS10 ja RMS30 maastokatselmuksen painumaluokissa

Kohteiden keskimääräiset RMS10 painumaluokittain							Kohteiden keskimääräiset RMS30 painumaluokittain						
Kohde Tie/Ajorata SuuntaKaista/Tieosa	Vakavuusluokka-arvio					Yhteensä	Kohde Tie/Ajorata SuuntaKaista/Tieosa	Vakavuusluokka-arvio					Yhteensä
	Ei painumaa	Juuri ja juuri havaittava painuma	Havaittava painuma	Haitallinen painuma	(tyhjä)			Ei painumaa	Juuri ja juuri havaittava painuma	Havaittava painuma	Haitallinen painuma	(tyhjä)	
7111004					0,9	0,9	7111004					3,9	3,9
7111005					1,3	1,3	7111005					5,9	5,9
7111006					0,9	0,9	7111006					4,5	4,5
7111007					1,0	1,0	7111007					4,7	4,7
7111008					0,9	0,9	7111008					4,1	4,1
8011310	1,1				1,3	1,1	8011310	5,6				7,3	5,7
8021310	1,0				1,2	1,0	8021310	5,4				3,6	5,3
45111002					1,6	1,6	45111002					8,5	8,5
50011001	1,6		5,1			2,0	50011001	8,3		21,5			9,8
50111008	1,3		3,1			1,4	50111008	6,1		17,5			6,8
51111005					1,6	1,6	51111005					5,1	5,1
51111006					0,6	0,6	51111006					2,9	2,9
55011001	1,1	2,5	3,1		1,2	1,2	55011001	5,5	12,7	19,8		4,2	6,0
55011002	1,0	1,8	3,1			1,0	55011002	5,1	13,9	22,4			5,6
55011003	1,0	1,9	5,0			1,1	55011003	4,8	13,2	35,0			5,4
68011038	1,1		3,1		4,5	1,2	68011038	4,5		3,8		10,1	4,5
68021038	1,1	0,8			1,8	1,1	68021038	4,6	4,5			8,0	4,7
104011001	2,3		3,5		2,2	2,3	104011001	12,4		15,5		12,2	12,5
170011008		2,0	3,4		1,5	1,6	170011008		14,9	25,9		6,3	7,3
181011010					5,0	5,0	181011010					32,6	32,6
181021010					4,9	4,9	181021010					31,0	31,0
192011008	1,6		2,5			1,6	192011008	6,5		18,3			6,8
192021008	1,0		3,4		1,5	1,4	192021008	4,8		12,5		6,8	6,5
196011010	1,9	2,8	6,5			2,1	196011010	8,5	19,0	38,0			10,2
196021010	1,6	7,8	9,7			1,8	196021010	7,8	26,3	57,4			9,0
272011002	1,3	3,8	3,1	4,7		1,5	272011002	4,7	18,1	14,7	21,7		5,6
272021002	0,9		3,4	5,8	1,1	1,3	272021002	4,8		14,8	29,3	4,4	5,2
672011009	1,2	5,8	5,1	10,1	1,8	1,3	672011009	5,2	12,3	20,9	24,5	5,7	5,5
672021009	1,3	2,4	2,8	29,8	2,7	1,4	672021009	5,6	11,3	9,7	82,2	15,0	6,1
2260011010					2,0	2,0	2260011010					7,8	7,8
2260021010					2,0	2,0	2260021010					7,1	7,1
2652011001	2,0	4,6	5,9			2,4	2652011001	10,9	27,0	39,1			13,5
2652021001	2,1	4,4	5,4			2,3	2652021001	11,3	31,2	43,3			13,0
12151011001					5,6	5,6	12151011001					23,5	23,5
12157011002					3,3	3,3	12157011002					20,0	20,0
12269011001	2,7	4,0	8,5	11,0		2,9	12269011001	12,7	34,8	17,8	30,1		13,6
12270011001	2,6	7,1	5,0	10,8	11,1	3,1	12270011001	11,5	23,5	23,6	22,9	58,2	13,5
12274011001	4,2	5,1	6,3	6,6		4,3	12274011001	23,8	38,4	34,4	44,9		25,4
12275011001					1,9	1,9	12275011001					8,3	8,3
12871011004					2,6	2,6	12871011004					10,6	10,6
12875011001					1,8	1,8	12875011001					6,5	6,5
12960011001					2,8	2,8	12960011001					14,9	14,9
13508011002					2,1	2,1	13508011002					7,3	7,3
Yhteensä	1,3	3,9	4,0	12,2	1,7	1,5	Yhteensä	6,1	24,4	22,7	37,4	8,0	7,4

Taulukko 18. Kohteiden pituus (m) PH-riski- ja maastoarvioluokissa sekä PH-riskin painumientunnistuskyyky.

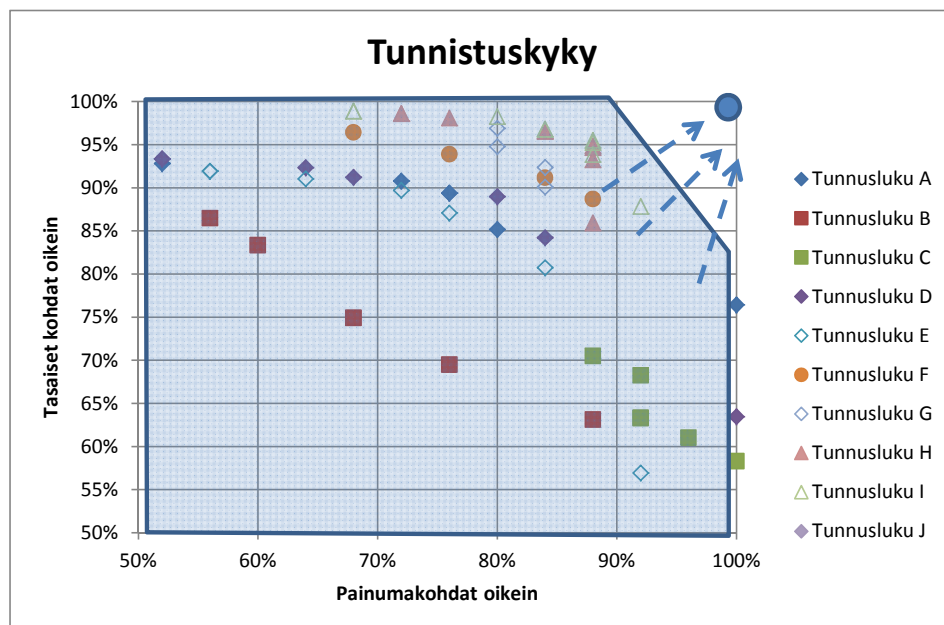
PH-riski	Maastoarvio				Yhteensä
	Ei painumaa	Lievä painuma	Selvä painuma	Haitallinen painuma	
	0	1	2	3	
0	71588	590	1360	70	73608
1	550	140	407	100	1197
Yhteensä	72138	730	1767	170	74805

Oikeat arviot	99,2 %	19,2 %	23,0 %	58,8 %	96,6 %
Se	26,2 % = Sensitiivisyys on erittäin huono				
Sp	99,1 % = Spesifisyys on erittäin hyvä				

8.4.2 Menetelmä

Tunnuslukujen kykyä tunnistaa painumia testattiin siten, että kullekin tunnusluvulle haettiin sellainen raja-arvo, jolla maastokatselmuksessa todettujen 2- tai 3-luokan painumien oikeintunnistuskky ja muiden ei-painumia sisältävien kohtien oikeintunnistuskky optimoituvat. Raja-arvot kuvaavat siten sitä, miten hyvin kukin tunnusluku tunnistaa selvän havaittavissa olevan pituussuuntaisen painuman eikä tuota ns. vääriä positiivisia kohtia eli tasaisia kohtia painumiksi. Koska haitallisia 3-luokan painumakohtia oli niin vähän, ei sen tunnistamiseen käytetty tätä menetelmää vaan raja-arvo sille asetetaan 2-luokan (selvästi ajettaessa havaittaville) painumille saatujen raja-arvojen ja muiden perustelujen avulla.

Tunnistuskyyyn määrittämisessä lähtötietoina olivat maastokohteiden tiedot 10 m laskentavälillä. Kukin 10 m jakso oli yksi kohde, jolle annettiin painumaa sisältävä koodi, 0, 1, 2 tai 3. Tätä maastokatselmuksessa havaittua painumakoodia pidettiin ”tosimittana” (on kuitenkin muistettava, että sen määrittäminen oli subjektiivista eikä siten täydellistä). Jos 10 m jaksolla oli painuma, niin tunnusluvun tuli pystyä tuottamaan sille painuma sillä tunnusluvun raja-arvolla, jolla tunnistuskky maksimoitui. Jos jaksolla taas ei ollut painumaa, niin tunnusluvun tuli pystyä tuottamaan sille jaksolle 0-koodi. Tunnistuskky lasketaan siten kaksivaiheisesti painumakohtien oikeintunnistusprosenttina ja ei-painumakohtien oikeintunnistusprosenttina. Tunnistuskkyä on käsiteltävä näillä kahdella termillä, koska muutoin painumat pystyttäisiin tunnistamaan 100 %:sti asettamalla raja-arvo tarpeeksi pieneksi, mutta samalla tuotettaisiin suuri määrä vääriä positiivisia kohtia eli jaksoja, joille tulkittaisiin painumaa, vaikkei niillä sitä ole. On sitten makuasia, miten saatuja kahta tunnistuskkyarvoa painotetaan keskenään. Työssä painotus tehtiin siten, että tuotettiin tulokset graafisesti useilla eri raja-arvoilla, jolloin nähtiin miten kukin tunnusluku käyttäytyy kun raja-arvot vaihtelevat. Sitten laskettiin, missä kohdassa kunkin tunnusluvun oikeintunnistuskäyrä on lähimpänä ideaalipistettä (100%,100%). Saatu kohta oli sen tunnusluvun raja-arvo ja sitä vastaava tunnistuskky. Intuitiivisesti pääteltynä painumakohtien oikeintunnistuskyyyn tulisi olla parempi kuin 85 % ja painumia sisältämättömien kohtien oikeintunnistuskyyyn tulisi olla parempi kuin 90 % (kuva 41).



Kuva 41. Tunnusluvun painumientunnistuskyyyn arviointi ns. ”Golden standard” menetelmällä. Oikeassa yläkulmassa tunnistuskyyyn ideaalipiste, jota kohti tunnistustarkkuudessa haluttaisiin päästä. Kunkin tunnusluvun tunnistuskky muuttuu kun raja-arvoja muutetaan.

Menetelmä on luokiteltavissa kahteen eri menetelmään riippuen tosimitan määrittämistarkkuudesta. Jos tosimita eli painumia sisältävät kohdat ja niitä sisältämättömät kohdat pystyttäisiin kohdistamaan oikeille 10 m jaksoille, niin silloin tarkoitetaan ns. ”Golden standard” –menetelmää. Jos taas tosimittaa ei pystytä välttämättä kohdistamaan oikeille 10 m jaksoille, tarkoitetaan ns. ”non-Golden standard” –menetelmää. Ensimmäisessä lasketaan oikein tai väärin menneitä luokituksia kun jälkimmäisessä verrataan painumia sisältävien tai painumia sisältämättömien 10 m jaksojen lukumääriä välittämättä niiden tarkasta sijainnista.

Käytännössä maastokatselmukseen ja eräiden tunnuslukujen tuottamiseen liittyy se epäkohta, että tunnusluvuilla ei pystytä paikallistamaan painumia välttämättä oikeille 10 m jaksoille. Tehtäessä maastokatselmusta liikkuvasta ajoneuvosta ja luettaessa GPS-pohjaista paikannustietoa viiveellä paikannukseen tulee paikannusvirhettä. Paikannus onnistuu eri tavalla riippuen siitä, ajetaanko tietä tierekisterisoitteen kasvuun tai sitä vastaan. Profiilipohjaiset tunnusluvut asettuvat oikeille 10 m jaksoille, mutta ajodynamiikkaan ja erityisesti koriin liikkeisiin pohjautuvat tunnusluvut tai niiden vaikutus ainakin jossain määrin saattaa osua kulkusuunnassa seuraavalle 10 m jaksolle. Tämä puoltaa ”non-Golden standard” –menetelmän käyttöä.

8.4.3 Tietunnuslukujen painumientunnistuskky

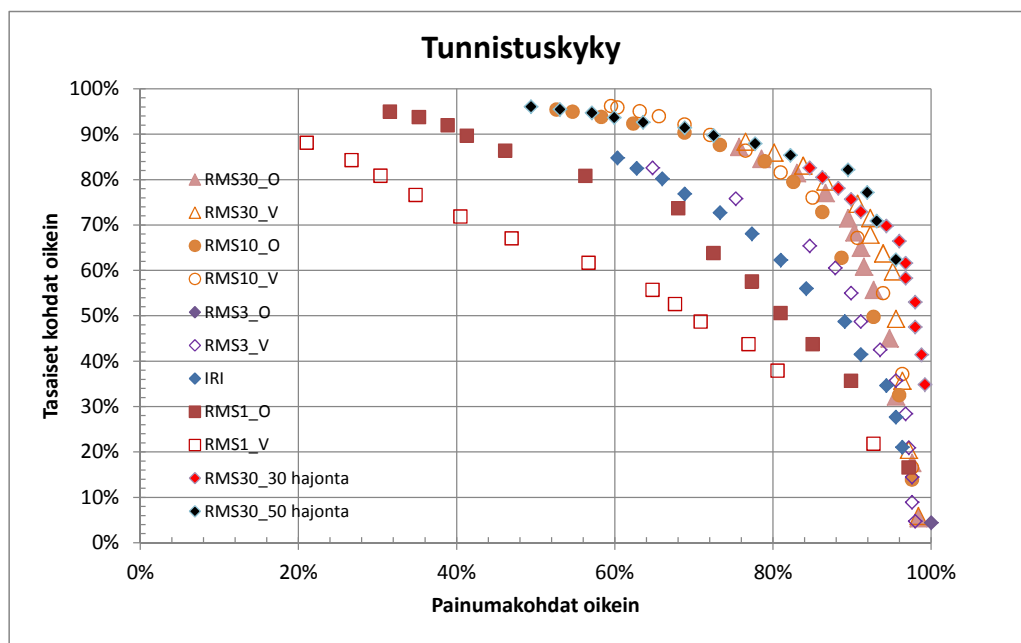
Tietunnuslukujen painumien tunnistuskky on esitetty kuvassa 42. Tunnistuskky vaihtelee tunnusluvusta ja sen raja-arvosta riippuen. Tunnistuskkyä mitataan kahden oikeintunnistusprosentin avulla. Tunnusluvun tulee toisaalta tunnistaa painumia sisältäneet kohdat, mutta toisaalta myös niitä sisältämättömät kohdat oikein. Kuvassa vaaka-akseli kuvaa painumia sisältämättömien kohtien tunnistusta ja pystyakseli painumien tunnistuskkyä. Tunnistuskkyä kokonaisuudessaan kuvaa kunkin tunnusluvun sijainti eli koordinaatti kuvassa. Tunnistuskky on sitä parempi mitä lähempänä oikeaa yläkulmaa tunnusluvun piste on. Paras tunnusluku on se, joka kulkee lähimpänä oikeaa yläkulmaa. Kunkin tunnusluvun paras raja-arvo on se, jolla tunnusluvun tunnistuskäyrän etäisyys oikeasta yläkulmasta minimoituu.

Paras tunnistuskky oli RMS30-tunnusluvulla, jonka optimaalinen piste asettuu noin kohdalle (85%,80%) tai (82%,82%) . Vasemman ajouran RMS30 tunnistaa painumakohdat hiukan paremmin kuin oikean ajouran vastaava tunnusluku. RMS10 tunnistaa painumakohdat melkein yhtä hyvin (85%,75%). Oikean ja vasemman ajouran mukaan laskettujen RMS10-tunnuslukujen tunnistuskkyssä ei ole eroja.

Seuraavaksi paras tunnistuskky on tunnusluvulla RMS3. Oikeasta ajourasta laskettu tunnusluku on hiukan parempi kuin vasemmasta ajourasta laskettu. IRI:n tunnistuskky on hiukan heikompi kuin RMS3:n. IRI:n tunnistuskkyä heikentää paikannuksen virheellisyys, koska 10 m IRI paikantuu usein vasta seuraavalle 10 m jaksolle. Siihen vaikuttaa se, että IRIin kuuluu pitempiä aallonpituuksia kuin 10 m. Huonoimmin tunnistaa lyhytaaltainen RMS1 (70%,50%). Oikeasta ja vasemmasta ajourasta laskettujen tunnuslukujen tunnistuskkyssä on merkittävä ero. Käyttökelpoisia tunnuslukuja painuman tunnistuksen kannalta ovat pitkäaaltoiset RMS-tunnusluvut RMS10 ja RMS30.

Koska simuloitujen tunnuslukujen tunnistuskky parani huomattavasti kun käsiteltiin itse tunnusluvun sijasta sen hajontaa, päätettiin tutkia myös RMS30:n hajonnan painumientunnistuskkyä. Hajonnalle laskettiin kaksi tunnuslukua, jotka olivat 30 m matkalle laskettu hajonta RMS30_30 ja 50 m matkalle laskettu hajonta RMS30_50. Tu-

lokseksi saatiin, että viiden havainnon avulla laskettu hajonta, missä yksi havainto on yhden kymmenen metrin RMS30-arvo. Viiden kymmenen metrin havainnon avulla laskettu RMS30:n hajonta tuotti parhaan painumientunnistuksen. Myös kolmen havainnon perusteella tuotettu hajonta oli muita tietunnusluja parempi. Hajonnan avulla tunnuslukujen painumien tunnistuskyky paranee, koska se suodattaa yksittäisiä suuria arvoja pois. Vastaavasti silloin kun tiessä on epätasaisuuksia, niin tunnuslukujen arvot vaihtelevat, mikä näkyy niistä tuotetuissa hajonnoissa. Hajonnan avulla tunnusluvun robustisuus (ja käyttökelpoisuus) kasvaa.

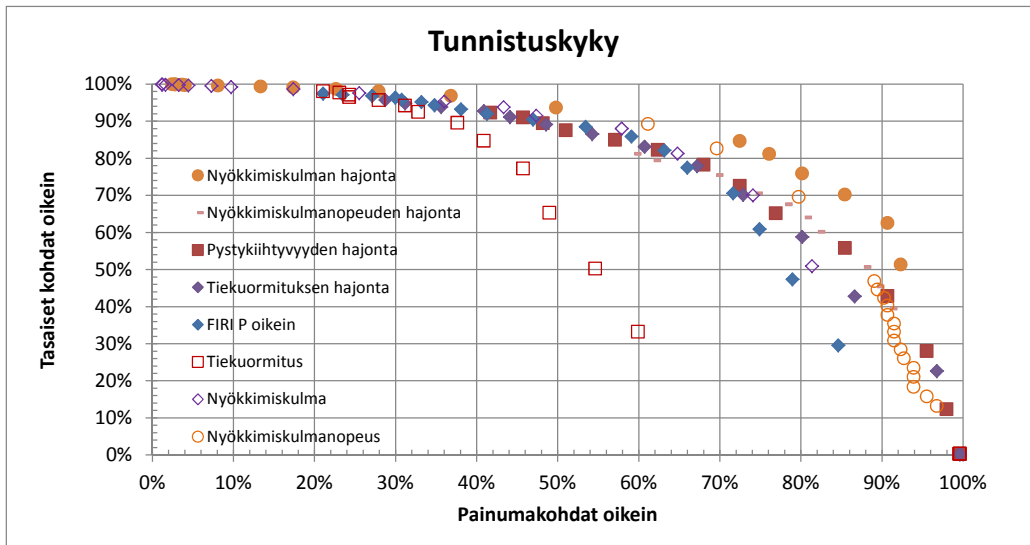


Kuva 42. Tietunnuslukujen painumientunnistuskyyky eri raja-arvoilla.

8.4.4 Ajodynamiikkatunnuslukujen painumientunnistuskyyky

Ajoneuvosimuloinnin tunnuslukujen tunnistuskyyky on esitetty kuvassa 43. Paras painumien tunnistuskyyky on Nyökkimiskulman hajonnalla, jolla käyrä on lähimpänä oikeaa yläkulmaa suunnilleen kohdassa (85%,70% - 80%,77%). Seuraavaksi paras tunnistuskyyky on nyökkimiskulmanopeuden hajonnalla. Samalle tasolle asettuvat pystykiiktyvyyden hajonta sekä tiekuormituksen hajonta.

Varsinaisilla ajoneuvosimuloinnin liiketilän vasteilla eli nyökkimiskulmalla, nyökkimiskulmanopeudella sekä tiekuormituksella tunnistuskyyky oli melko heikko. Nyökkimiskulman tunnistuskyykyä heikentävät mm. ylä- ja alamäet, joissa kulman arvo on suuri, vaikka mitään painumaa ei ole. Syötteenä annettavassa profiilissa ei periaatteessa ole mäkisyttä, mutta se sisältää sitä mm. IRI:n laskenta-aallonpituuden takia jonkun verran.



Kuva 43. Ajoneuvosimuloinnin liiketilavasteiden painumientunnistuskyky eri raja-arvoilla.

8.5 Tunnuslukujen raja-arvot

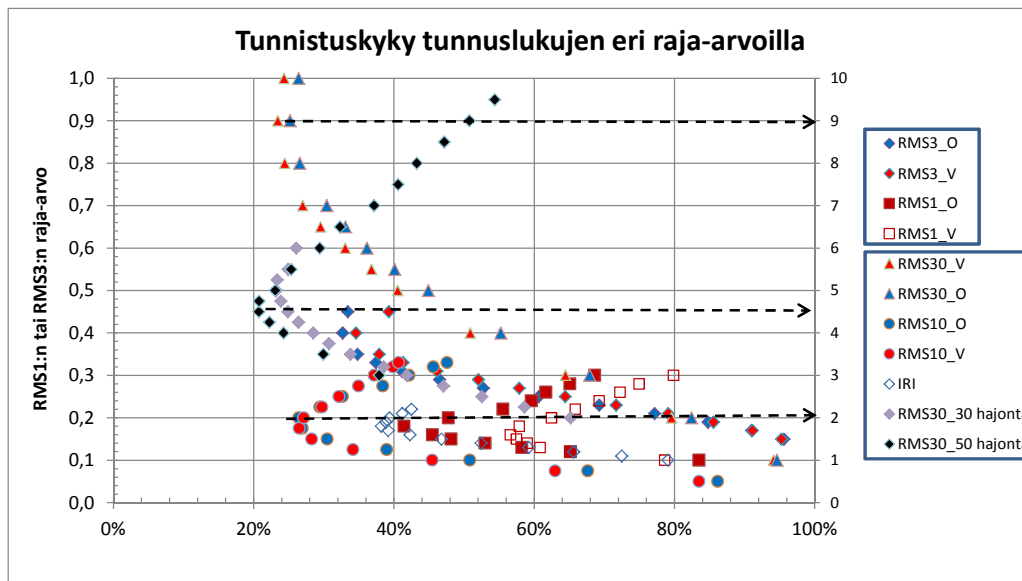
Tunnuslukujen raja-arvot viritettiin siten, että niillä tunnistettavien painumakohtien ja painumattomien kohtien lukumäärä maksimoituvat. Painumakohtien totuusmitaksi otettiin se paaluväli, jolle mittaja oli laittanut merkin mittauksen yhteydessä. Muille paaluväleille ei painumaa ollut.

Sekä mittauksista että ajoneuvosimuloinneista tuotettiin ensin yhden metrin data, josta sitten muodostettiin 10 m data keskiarvoistamalla. Kullekin kymmenmetriselle annettiin painumaa kuvaava totuustieto (0, 1, 2 tai 3), joka luokiteltiin uudelleen seuraavasti: 0=0-1 ja 1=2-3. Kullekin tunnusluvulle annettiin alustava raja-arvo. Tämän jälkeen laskettiin, ylittääkö ao. kymmenmetrinen tämän raja-arvon. Jos ylitti, niin annettiin painumaa kuvaava koodi (1) ja ellei niin annettiin koodi 0. Tämän jälkeen laskettiin minkä verran oli oikein luokitettavia painumakohtia ja oikein luokitettavia ei-painumakohtia. Sitten tunnusluvun raja-arvo viritettiin siten, että oikein luokitettavien kohtien lukumäärä maksimoitui. Saatua raja-arvoa oli paras raja-arvo sille tunnusluvulle. Sama toistettiin kaikille tunnusluvuille.

Saatua tulos oli raja-arvo, jolla painumakohta kullakin tunnusluvulla on havaittavissa (maastoarvioluokka 2). Vaikka painuma on havaittavissa, niin se ei välttämättä ole haitallinen. Haitallisuutta kuvaava raja-arvo on valittava jollain toisella tavalla. Mittausten yhteydessä todettiin, että painumat olivat havaittavia, mutta eivät läheskään aina haitallisia.

Tämän jälkeen valitaan tunnusluvuista se, joka on paras ja haetaan sille sellainen raja-arvo, jolla tunnistuskyky on paras.

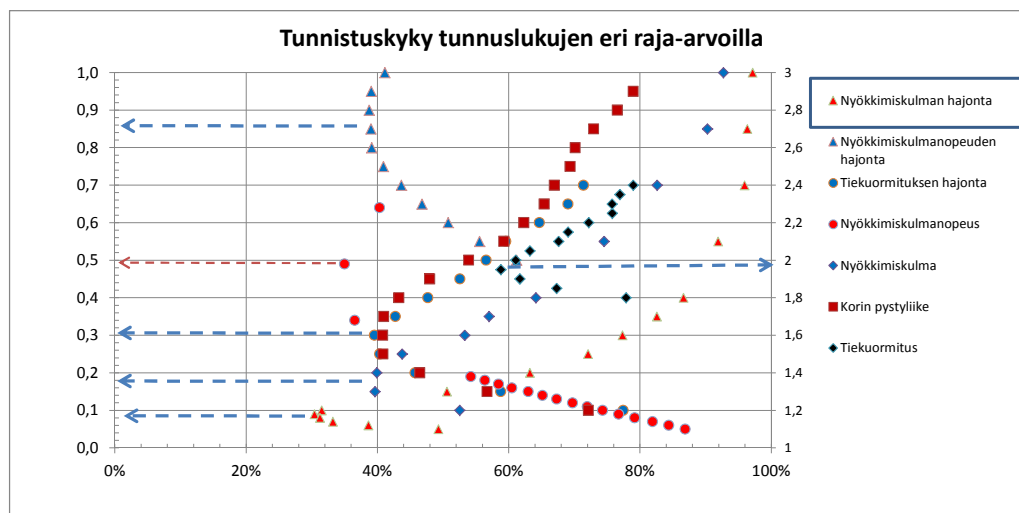
Kuvassa 44 on esitetty tunnuslukujen tunnistuskyky eri raja-arvoilla siten, että vaakakselilla on kaikille tunnusluvuille yhteinen kokonaistunnistuskykyä etäisyytenä oikeasta yläkulmasta ja pystyakseleilla tunnuslukujen raja-arvo. Kokonaistunnistuskyky on laskettu pythagoraan kaavalla painumien ja tasaisten kohtien oikeintunnistuksista kuva 41 oikeasta yläkulmasta nähdessä. Mitä pienempi etäisyys on, sitä parempi on tunnistuskyky.



Kuva 44. Tietunnuslukujen tunnistuskyky eri raja-arvoilla (IRI ja RMS10 ja RMS30 raja-arvot oikean puoleisella pystyakselilla. RMS10:n optimiraja-arvo on 2,0 ja RMS30:n optimiraja-arvo on 9. Painumien tunnistuskyky vaaka-akselilla.

Pitkääaltoisella RMS-30 tunnusluvulla ja erityisesti sen hajonnalla on paras painumientunnistuskyky. Se maksimoituu raja-arvolla 9. Seuraavaksi paras tunnistuskyky oli RMS10:llä, jonka tunnistuskyky maksimoituu raja-arvolla 2,0. Muille tietunnusluvuille raja-arvojen tarkastelua ei kannata niiden huonohkon tunnistustarkkuuden takia tehdä.

Simuloinnista saatujen ajoneuvovasteiden vastaava raja-arvojen tarkastelu on kuvassa 45. Nyökkimiskulman hajonnalla oli paras tunnistuskyky ja se maksimoitui raja-arvolla 0,09 astetta/10m. Seuraavaksi paras tunnistuskyky oli nyökkimiskulmanopeudella (itseisarvo) ja tiekuormituksen hajonnalla. Listan viimeisinä olivat nyökkimiskulma (itseisarvo) ja tiekuormitus.



Kuva 45. Ajoneuvovasteiden tunnistuskyky eri raja-arvoilla. Painumien tunnistuskyky vaaka-akselilla. Tunnistuskyky on sitä parempi mitä enemmän vasemmalle käyrä ulottuu.

8.6 Tunnuslukujen paremmuus

Maastohavaintoihin suhteutettujen tunnuslukujen tunnistuskyvyn perusteella havaittiin, että parhaiten painumaluokkien 2 ja 3 painumia tunnisti pitkäaaltoinen RMS30. Sitä lyhyempiaaltoinen RMS10 tunnisti painumia melkein yhtä hyvin. Lyhyempiaaltoiset tieprofiilista tuotetut muut tunnusluvut eivät tunnistaneet painumakohtia tai painumia sisältämättömiä kohtia kovin hyvin. Työn loppuvaiheessa kokeiltiin lisäksi ko. tunnuslukujen hajontojen tunnistuskykyä, joka osoittautuikin parhaaksi.

Ajoneuvosimuloinnin tuottamista vasteista paras tunnistuskyky oli nyökkimiskulman hajonnalla, jonka tunnistuskyky ulottui melko lähelle RMS10:n ja RMS30:n tunnistuskykyä. Vaikka graafisissa tarkasteluissa esimerkiksi tierasitus ja erityisesti sen hajonta näytti olevan hyvä painumien tunnistaja, niin se ei laajemmassa analyysissä tullut esiin. Tierasituksen tunnistuskykyä heikentää mm. se, että tieosien alussa profiileissa on usein sellaisia epäsäännöllisyyksiä, jotka saavat simuloinneissa aikaan suuria vasteita. Tällaisia kohtia pyrittiin karsimaan aineistosta pois, mutta jos simuloitujen lukujen eivät olleet kovin suuria, niin karsimista ei suoritettu. Tämän takia tieosien alkujen karsinta ei ole ollut kaikilta osin johdonmukaista.

Vastoin alkuoletusta pitkäaaltoiset tunnusluvut ja erityisesti niiden hajonnat osoittautuivat ajoneuvosimuloinnin pystyliikkeitä ja nyökkimiskulmia paremmiksi painumien tunnistajiksi.

Tunnuslukujen painumien tunnistuksen paremmuusjärjestys on esitetty seuraavassa taulukossa. Paremmuusjärjestys on määritetty tunnistusvirheen perusteella. Tunnistusvirhe on määritelty tunnistuskykyä esittävässä kuvissa (39 ja 40) tunnistuskäyrän minimietäisyytenä oikeasta yläkulmasta (ideaalipisteestä). Viiden 10 m havainnon perusteella laskettu liukuva RMS30:n hajonta tuotti parhaan tunnistustarkkuuden. Painumakohdista tunnistuu 90 % oikein ja tasaisista kohdista 82 % oikein. Raja-arvona on tällöin 4,5. Tunnistuskyvyn optimikohta on sen verran laakea, että raja-arvo voi vaihdella välillä 4-5.

Nyökkimiskulman hajonta oli vasta 7:llä sijalla ja sen tunnistusvirhettä kuvaava arvo oli 0,1 (astetta/s) raja-arvolla 30 %. Nyökkimiskulman itseisarvo oli 10:nnellä sijalla raja-arvolla 0,5 (astetta/s). Tunnistuskyky oli samaa tasoa kuin IRI:llä, joka oli järjestyksessä seuraavana. Vertailun vuoksi taulukkoon listattiin myös PH-riskin tunnistuskyky, joka oli kaikkein huonoin.

Taulukko 19. Yhteenveto tunnuslukujen painumien tunnistuskyvystä.

Sija	Tunnusluku	Raja-arvo ja yksikkö	Painumien tunnistuskyky %	Tasaisten kohtien tunnistuskyky %	Tunnistusvirhe (=tunnusluvun tunnistuskäyrän etäisyys ideaalikohtasta) %
1.	RMS30_50_hajonta	4,5 (mm)	89,5	82,1	20,7
2.	RMS30_30_hajonta	5,0 (mm)	82,6	96,1	23,2
3.	RMS30 vasen	9,0 (mm)	83,8	83,0	23,4
4.	RMS30 oikea	9,0 (mm)	83,0	81,4	25,2
5.	RMS10 oikea	2,0 (mm)	82,6	79,5	26,4
6.	RMS10 vasen	1,75 (mm)	81,0	81,6	26,2
7.	Nyökkimiskulman hajonta	0,1 (ast.)	76,1	81,2	30,4
8.	RMS3 oikea	0,4 (mm)	76,1	77,7	32,7
9.	RMS3 vasen	0,4 (mm)	75,3	75,8	34,6
10.	Nyökkimiskulmanopeuden itseisarvo	0,5 (ast./s)	69,6	82,6	35,0
11.	IRI10 oikea	1,8 (mm/m)	73,3	72,7	38,2
18.	PH-riski	IRI10 11,4 RMS3 3,2 RMS10 5,7	28,0	99,6	72,1

8.7 Tunnuslukujen käyttö

Pituussuuntaisten painumien ja muiden lyhyempien yksittäisepätasaisuuksien tunnistamiseen suositellaan käytettäväksi 10 m matkalle laskettuja RMS30:n liukuvia viiden havainnon hajontoja. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää pelkkää RMS30 tai jopa RMS10. Peruseriaate käytössä on, että tuotetaan tunnusluvuilla kymmenmetrisille binäärinen koodi (PH-riskin tapaan) siten, että 100 m jaksolla voi olla 0-10 painumaa kuvaavaa kohtaa. Käytössä saadaan selkeämpi kuva siitä, miten monta painunutta kymmenmetristä jaksolla tulee olla, että se luokitellaan esim. huonokuntoiseksi. Alustavasti suositellaan käytettävän minimikriteeriä eli 100 m jakso on huonokuntoinen jos sillä on yksikin painuman sisältävä kymmenmetrinen.

9 Yhteenveto ja suositukset

Tässä työssä listattiin tien pituussuuntaisen profiilin muutosten vaikutuksia ajomukavuuteen, ajokustannuksiin, tierakenteeseen ja tiellä liikkujan terveyteen. Lisäksi tutkimuksessa tutkittiin maailmalla käytössä olevia tien pituussuuntaisen epätasaisuuden arviointimenetelmiä ja niiden soveltuvuutta Suomeen. Aiemmassa tutkimuksessa tien-pinnan sivukaltevuuden vaihtelun tarkasteluun kehitetty ajoneuvomalli muokattiin pituuskaltevuuden vaihtelun tarkasteluun sopivaksi.

Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden vaikutuksia tienkäyttäjiin ja tiehen itseensä tutkittiin kirjallisuuden avulla. Nämä seikat haluttiin nostaa esille, epätasaisuuden haittojen vakavuuden ymmärtämiseksi. Kirjallisuudesta löytyi muutamia raja-arvoja pystykiihtyvyyksille. Tieliikenteen ammattikuljettajiin sovellettuna niitä voitaisiin tulkiten siten, että tien ei tulisi aiheuttaa yli 1.15 m/s^2 suuruisia kiihtyvyyksiä (tärinää) kuin vain yksittäistilanteissa eikä yli 0.5 m/s^2 suuruisia kiihtyvyyksiä jatkuvasti. Esitetyt raja-arvot tarkoittavat ajoneuvon istuimella koettavaa pystysuuntaista tärinää kiihtyvyyksien RMS-arvoina. Ajoneuvomallissa tulisi olla jousitetun korin lisäksi myös istuin-kori –systemi. Sen puuttuessa voidaan ajatella seurattavan korin pystykiihtyvyyksiä esitettyjä raja-arvoja vasten.

Maailmalla käytössä olevia pituussuuntaisen epätasaisuuden arviointimenetelmiä etsittiin kirjallisuudesta ja kyselemällä tiealan asiantuntijoilta pohjoismaista ja erityisesti Ruotsista. Pituussuuntaisten epätasaisuuksien hallinta tapahtuu joko pituuskaltevuuksia arvioimalla tai epätasaisuuden tunnusluvuilla.

Nyt tehdyssä selvityksessä oli tavoitteena saada mallinnettua ajoneuvossa tapahtuvia liikkeitä ja perustaa painumien tunnistamisessa käytettävät tunnusluvut näiden liikkeiden haitallisuuteen. Ensimmäisessä vaiheessa käännettiin sivuttaisheilahtelujen mallintamisessa käytetty ajoneuvomalli. Sillä tuotettiin tunnuslukuja, joiden käyttökelpoisuutta verrattiin käytössä oleviin tunnuslukuihin. Simulointien perusteella todettiin, ettei nykyisellä painumien arviointimenetelmällä (PH-riski) löydetä kaikkia ajomukavuuteen vaikuttavia tienkohtia. Projektin toisessa osavaiheessa verifioitiin ajoneuvomallin tuottamien tunnuslukuja maastossa koettuihin havaintoihin nähden.

Ajoneuvosimuloinnin tulosten perusteella näytti lyhyen tarkastelun jälkeen olevan mahdollista selvittää tienkohdat, jotka ovat haitallisia turvallisen ja mukavan liikkumisen kannalta. Projektin toisessa osavaiheessa suoritettiin vertailu, missä verrattiin simuloinnilla tuotettujen tunnuslukujen ja maastossa havaittujen painumien välistä yhteyttä. Alustavasti näytti siltä, että nyökkimiskulman ja korin pystysuuntaisen liikkeenopeuden nopeat muutokset indikoivat pituussuuntaisista epätasaisuuksista.

Kun käsiteltäviä tunnuslukuja verrattiin maastotarkastelusta saatuun painumaluokitukseen ja muodostettiin tunnusluvuille painumien tunnistuskykyä kuvaavat mittarit, niin todettiin, että ajoneuvosimuloinnista saatavat tunnusluvut eivät sellaisenaan tunnista painumakohtia niin hyvin kuin aluksi oletettiin. Simuloinnista saadaan ajoneuvon nyökkimiskulma ja sen muutosnopeus sekä ajoneuvon aiheuttama tierasitus, joiden avulla painumakohtia pystytään tietyissä tilanteissa tunnistamaan. Useissa graafisissa tarkasteluissa yhteys oli hyvä, mutta koko aineistolla tarkasteltuna ei kuitenkaan niin hyvä kuin oletettiin.

Simulointi sisälsi tiettyjä puutteita, joilla saattoi olla tuloksia heikentävä vaikutus. Tieosien alut olivat mitatulta profiililtaan usein epäsäännöllisiä ja ajoneuvon todellista nopeutta ei pystytty simulointisovelluksen nykyisellä versiolla käyttämään vaan tieosat ajettiin ennalta määrätyllä vakionopeudella. Tieosien aluista poistettiin sellaisia havaintoja, joilla vasteet olivat erittäin suuria. Nopeusrajoitusten vaihtumiskohtia ei pystytty myöskään huomioimaan. Simulointinopeus (80 km/h) on saattanut olla tietyillä 60 km/h nopeusalueilla liian suuri, mikä on kasvattanut vasteita. Yhdysteiden tiegeometria on usein sellainen, että se aiheuttaa suuria ajoneuvovasteita, ellei ajonopeutta pienennetä.

Pitkäaaltoisilla tien epätasaisuutta kuvaavilla RMS-tunnusluvuilla ja erityisesti niiden hajonnalla saatiin paras painumien tunnistuskyky. Koska niiden tulos oli parempi kuin ajoneuvosimuloinnilla saatujen tunnuslukujen, suositellaan käytettäväksi niitä. Simulointimalleja voidaan kyllä kehittää ja kehitettäviä kohtia ovat mm. erilaisten ajoneuvotyyppien mukaan ottaminen, todellisten nopeuksien käyttö simuloinnissa, erilaisten suodattimien käyttö erityistilanteissa sekä ajoneuvomallin täydentäminen kuljettajamallilla, jolloin mahdollistuisi ajoneuvossa olijan kokemien liiketilojen simuloiminen. Esim. pään ja niskan seudun sekä ristiselkään kohdistuvien liikkeiden mallintaminen mahdollistaisi raja-arvojen määrittämisen ajomukavuus- ja työterveysnäkökulmasta.

Tehdyssä selvityksessä käytettiin kuorma-auton simulointimallia, mutta maastotarkastelu suoritettiin henkilöautolla, mikä saattaa sisältää vääristymän lähteen. Selvityksen alussa tehtiin muutama ajo kuorma-autolla tai oltiin kuorma-autossa matkustajana, mutta niistä ei tehty niin dokumentoitua maastoarviota, jotta sitä olisi voinut käyttää tunnuslukujen arvioinnissa. Maastotarkastelut tulisi tehdä tarkasti ja mielellään usean arvioijan tekemänä.

Tehdyn selvityksen paras anti oli itse ajoneuvosimulointimallin kehittämisen lisäksi se, että pystyttiin osoittamaan nykyisin tuotettavista tietunnusluvuista nykyistä pituusheittoriskiä huomattavasti parempi muuttuja. Lisäksi pystyttiin parantamaan sen tunnistuskykyä kehittämällä sille liukuvan hajonnan laskennan kautta tehtävä suodatin. Saadun tunnusluvun käyttökelpoisuus on nyt saatujen tulosten valossa suhteellisen hyvä. Samalla on kuitenkin todettava, että tunnuslukujen ns. spesifisyystason tulisi kuitenkin yltää yli 95 %, jotta välttyttäisiin vääriä kohteilta. Nyt saadun tunnusluvun spesifisyys oli vain 82%.

Tehty selvitys oli rinnakkainen toisen, sivukaltevuusvaihteluihin liittyvän, selvityksen kanssa. Aluksi käytettiin kummassakin työssä puolikasajoneuvomalleja, kunnes päädyttiin koko ajoneuvomalliin, joka on molemmille tarkasteluille sama. Sivukaltevuus-tarkasteluista puuttuu edelleen kaarergeometrian dynaaminen huomiointi. Jos ja kun sitä edelleen kehitetään, joudutaan kehittämään ajonopeuden hallintaa enemmän todellisuutta vastaavaksi. Sitten kun se saadaan tehtyä, voivat pituuskaltevuuteen liittyvien simulointien tulokset parantua. Tällöin kannattaa tarkistaa nyökkimiskulman ja sen johdannaisten käyttökelpoisuus uudelleen.

Lähteet

1. Antti Ruotoistenmäki (2005): Kuntotiedon käyttö tie- ja katuverkon ylläpidon päätöksenteossa. Tiehallinnon selvityksiä 7/2005. Tiehallinto. 2005.
2. Eetu Hurtig (2010): *Raskaan kaluston kallistelun voimakkuuden arvioiminen tienpinnan profiilista*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 2010.
3. Lauri Suikki (2009): ”*Painumaprofiilin dynaaminen määrittäminen, ISSN 1459-1561*”. Eri menetelmien soveltaminen painumien mittaamisessa. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 5/2009. Helsinki. 2009.
4. *Painumamittaus PTM-kalustolla. 2010. Julkaisematon.*
5. Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden aallonpituusalueiden vaikutukset ajoneuvoon ja matkustajiin [Chavet et al 1987].
6. Anita Ihls, Georg Magnusson (2000): Functional characteristics of roads.
7. Granlund, Johan (2008): Health Issues Raised by Poorly Maintained Road Networks. Swedish Road Administration Consulting Services. Roadex III report, March 2008.
8. Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet - Suunnitteluvaiheen ohjaus. 2001. Helsinki: Tiehallinto. ISBN 951-726-743-6. TIEH 2100002-01.
9. Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). ISO 2631-1
10. <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31989L0656:FI:HT ML:Direktiivi 89/391/ETY 16>.
11. Capuruço, R.A.C., Hegazy, T., Tighe, S.L. & Zaghloul, S. (2005), A Full-Car Roughness Index as a Summary Roughness Statistic. Proc. 84th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C, USA.
12. K. Rantanen & M-T Juurinen. Painumien määrittämismahdollisuudet. TKK. Tietekniikka. T165.
13. Julian Weber (2009): Automotive Development Processes, Springer 2009.
14. Ulkomaiset painumien raja-arvot. Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimus-ohjelma. 1995.
15. Pertti Virtala, Eetu Hurtig: Tien haitallisten sivukaltevuusmuutosten tunnistaminen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 2012 (editointivaiheessa).

