

PERTTI VIRTALA
EETU HURTIG

Tien haitallisten sivukaltevuusmuutosten tunnistaminen



Pertti Virtala, Eetu Hurtig

Tien haitallisten sivukaltevuusmuutosten tunnistaminen

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 35/2012

Liikennevirasto

Helsinki 2012

Kannen kuvat: Pertti Virtala

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-180-1

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Pertti Virtala, Eetu Hurtig: Tien haitallisten sivukaltevuusmuutosten tunnistaminen. Liikennevirasto, väylätekniikkaosasto. Helsinki 2012. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 35/2012. 80 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-180-1.

Avainsanat: tiet, tien kunto, päällysteet, kaltevuus

Tiivistelmä

Liikennevirasto mittaa päällysteiden pintakuntoa laserpohjaisilla mittausvälineillä, joilla saadaan suhteellisen tarkka kolmiulotteinen malli päällysteen pinnasta sekä tien pysty- ja vaakageometriaan liittyviä tunnuslukuja. Päällysteiden ylläpidon toimintalinjoissa on lähdetty tavoittelemaan parempaa asiakkaiden ja tienkäyttäjien huomioon ottamista ja sen takia päällysteiden ylläpitoon tarvittavia kuntotilakuvauksia myös monipuolistetaan. Yhtenä kehityskohteena on ollut viime vuosina päällysteen sivukaltevuuden hallinta. Tiet on suunniteltu ajodynamiikan ja kuivatuksen kannalta oikeaan sivukaltevuuteen, mutta kevyt ylläpitopolitiikka on osaltaan aiheuttanut sen, että routiminen on päässyt muuttamaan päällysteiden pintoja ja heikentämään niiden sivukaltevuuksia. Liian pienet sivukaltevuudet aiheuttavat kuivatuksen toimimattomuutta sekä liikenteen kaarekäyttämisen vaaratilanteita. Puutteet sivukaltevuuksien tasalaatuisuudessa aiheuttavat raskaille ajoneuvoille vaarallisia sivuttaisheilahduksia, joista saattaa pahimmillaan aiheutua tieltä suistumisia tai muita onnettomuuksia.

Sivukaltevuuksien hallintaa ovat haitanneet puutteet sekä teiden kaarregeometrian että ajoneuvojen dynamiikan hallinnassa. Tässä työssä on testattu ja sovellettu vuonna 2010 tehdyn diplomityön tuloksia, missä tuotettiin yksinkertainen 7 vapausasteen ajoneuvomalli raskaan ajoneuvon sivuttaisheilahteluille. Lisäksi kehitettiin tiegeometriaan liittyvien tunnuslukujen suodatusperiaatteet, jotta kaarteiden sivukaltevuuksien käsittely olisi mahdollista. Edellä mainitun jatkeeksi laadittiin laskentamenetelmä, jolla ajoneuvon liikkeitä, kaarregeometriaa ja sivukaltevuus sekä kitkantarve voidaan hallita. Yksittäisten sivukaltevuusheittojen vaikutus lasketaan dynaamisesti simuloimalla. Kaarregeometriaan liittyvät tarkastelut tuotetaan staattisina.

Työ mahdollistaa palvelutasomittausten tunnuslukujen laajemman käytön sekä tuo sivukaltevuustiedon ja siitä johtuvien puutteiden käsittelyn lähemmäksi todellisuutta. Kehitetty tarkastelu mahdollistaa liikenneturvallisuutta heikentävien sivukaltevuuspuutteiden hallinnan ennen kuin onnettomuuksia ehtii tapahtua. Lisäksi päästään käsiin tien kuivatuksen toimimattomuuteen ja parantamaan teiden kestävyyttä.

Kaaregeometrian ja kitkan tarkasteluissa ei käytetä ajoneuvojen pyörän ja tien pinnan välisen kontaktipinnan dynamiikkaa. Ajamiseen liittyviä erityistilanteita, kuten kiihdytykset, jarrutukset, ohittaminen tai väistäminen, ei myöskään huomioida. Tällaisten seikkojen huomioinnissa tarvittaisiin kokonaisvaltaisempaa mallia ajoneuvon käyttäytymisestä.

Sivuttaisheilahtelujen laskennassa käytetään yksinkertaista nelipyörämallia, joka kuvaa kaksiakselista ajoneuvoa. Sivuttaisheilahduksessa lasketaan heilahduskulmaa (Roll), joka pahimmillaan voi johtaa ajoneuvon kaatumiseen. Tämäkin tilanne on yksinkertaistus verrattuna esimerkiksi täysperävaunulliseen rekkaan, missä perävaunun heilahdusliikkeet ovat suurempia ja vaikeammin mallinnettavia kuin vetoauton. Laskentaperiaatteet sisältävät kuitenkin tien ajouraprofiilien tuottamisen sekä ajoneuvon

sijoittamisen siihen siten, että tien ajoneuvon akseleihin ja runkoon aiheuttamat vas-
teet voidaan laskea. Jos ajoneuvomallia myöhemmin kehitetään, niin herätteen syöt-
tämisen muoto on jo valmiina.

Kehitetyt tarkastelut mahdollistavat verkkotasolla sivukaltevuuspuutteiden määrän ja
sijainnin määrittämisen, mutta eivät riitä esim. yksittäisten liikenneonnettomuuksien
syiden tarkasteluun. Siihen tarkoitukseen käytettäessä malleja tulee tarkentaa. Ajo-
neuvomallista jää puuttumaan ohjaajan toiminta, tie-rengas-kosketuspinnan dyna-
miikka sekä sivuttaisliikkeiden laskenta. Niiden sisällyttäminen malliin edellyttäisi
vapausasteiden määrän kaksinkertaistamista. Malli on kuitenkin pohja monimutkai-
semmille malleille ja tarkasteluille ja askel eteenpäin ajoneuvojen käyttäytymisen
huomioon ottamisessa tienpidon tarkasteluissa.

Pertti Virtala, Eetu Hurtig: Oegentligheter i vägars tvärsprofil. Trafikverket, infrastrukturteknik. Helsingfors 2012. Trafikverkets undersökningar och utredningar 35/2012. 80 sidor och 1 bilaga. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-180-1.

Sammanfattning

Bevarande av vägnätet i Finland bygger på uppgifter som samlats in med höghastighets-monitorer. En tredimensionell modell av ytan på en väg och geometriska parametrar för vägen mäts samtidigt. Vägförhållanden definieras dock i huvudsak med genomsnittliga 100 m värden för tre variabler som är spårbildning, ojämnheter och defekter. Samtliga variabler indelas i fem tillståndsklasser. Villkoret för en väg aggregeras sedan i två kategorier, dålig väg och icke dålig väg. Med dessa data baseras budgetering, planering och programplanering av projekt för bevaring.

De allmänna riktlinjerna för bevarande av belagda vägar uppdaterades 2006. Vid samma tid erkändes ett behov av att inkludera fler variabler i planeringsprocessen. Ett behov av bättre förståelse av de tvärgående och längsgående oregelbundenheter för vägen och textur av belagda ytor noterades. Under 2010 gjordes en studie, var en 4 graders bilmodell användes med 3-D yta modell av en väg. Denna studie fortsatte 2010-2012 då en mer sofistikerad, 7-DOF, modell användes för att analysera responsen för en tvåaxlad bil.

Denna studie har nästan varit parallell med den föregående och samma 7-DOF bilmodell användes för att analysera rullmotståndet för ett två-axlat fordon vid färdandet på en väg. En fältundersökning genomfördes också för att ta reda på de vägvägnitt, där det fanns allvarliga tvärgående oregelbundenheter, främst variation i tvärfall. En jämförande analys gjordes för att ta reda på vilka variabler som känner allvarliga variationer i tvärgående riktning. De regelbundna tillståndsvariablerna var megatextur, IRI, RMS1, RMS3, RMS10 och RMS30 mätt i vänster och höger hjulspår. RMS-variabler beskriver den längsgående ojämnheten av en väg med en cut-off våglängd av 1 m, 3 m, 10 m och 30 m avvikelse. En ny variabel beräknades med hjälp av värdena för vänster och höger hjuls värden för varje tillstånd variabel. Dessa variabler testades med hjälp av en fältstudie.

Andra variabler beräknades med data för 3-D yta och 7-DOF fordons dynamisk modell. Huvudsakliga svar var rullhastighet, rullacceleration och lastöverföringsförhållande, LTR, men också bounc och pitch respons beräknades. Dessa variabler testades med fältundersökning som i tidigare jämförelse. Det konstaterades att standardavvikelsen för LTR (i en 10 meter avsnitt) var den bästa variabeln för känna igen svåra tvärgående oregelbundenheter. Den näst bästa var standardavvikelsen för rullhastighet (i ett 10 m avsnitt). Det noterades att standardavvikelsen för en variabel i stället för medelvärdet av en 10 meter sektion bättre förklarade dåliga vägvägnitt. Den viktigaste upptäckten var att responsvariabler i en dynamisk bilmodell korrelerade med resultaten av fältstudie bättre än vanliga tillståndsvariabler.

Den huvudsakliga rekommendationen från denna studie är att variationen av responsvariabler av en tvåaxlad 7-DOF fordon dynamisk modell beräknade i 10 m sektioner ger bättre förståelse för hur bra vägytan som helhet är. 10 m avsnittet kan klassificeras i två klasser som beskrivs i dåligt skick och icke-dåligt skick med ett visst gränsvärde. Det allmänna tillståndet för en 100 m sektion beror på antalet 10 m sektioner i dåligt skick och kan ordnas på ett bättre sätt senare i en annan studie.

Laterala responser ingick inte i fordonsmodellen, därför att det då skulle ha varit tvunget att utöka dynamiska fordonsmodell från 7-DOF to 14-DOF. Men detta mål skulle vara det logiska steget i framtida studier. Krökning, tvärlutning och kurvatur av ett fordon är nästa intressanta frågor som skall analyseras. I denna studie var en statisk analys rekommenderad där laterala accelerationen av ett fordon hanteras enligt väggeometrin. En filtreringsalgoritm för kurvatur av en väg gjordes också genom att använda data från ett prov där vägar mättes i båda riktningar. Efter filtrering beräknades sedan radien av en väg. Detta är en grovfiltrering som gör det möjligt att skilja raka linjer från kurvor och använda kurvatur uppgifterna. Men separationen av den mellersta delen mellan en rät linje och kurva inte kan göras så bra och därför behövs ett bättre filter.

I denna studie filtrerades 3-D vägprofil för att användas i en 7-DOF Matlab / Simulink dynamisk fordonsmodell. Alla vägar som har uppmätts med höghastighets profilometer, kan nu analyseras med denna fordonsmodell. Vertikala krafter, rörelser, hastigheter och acceleration och rullmotstånd för vilket tvåaxlars fordon som helst kan beräknas. Variationen av svarsdata rekommenderas att användas genom beräkning av en standardavvikelse av svaren i 10 avsnitt. Denna åtgärd kan sedan användas för att igenkänna dåliga vägsnitt.

Pertti Virtala, Eetu Hurtig: Defining the unwanted lateral variation of a road. Finnish Transport Agency, Infrastructure Technology. Helsinki 2012. Research reports of the Finnish Transport Agency 35/2012. 80 pages and 1 appendix. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-180-1.

Summary

Preservation of road network in Finland is based on data collected with high speed monitors. A 3-dimensional model of the surface of a road and geometric parameters of the road is measured at the same time. However, road condition is mainly defined using 100 m average values for three main variables, which are rutting, roughness and defects. All variables are classified into five condition classes. The condition of a road is then aggregated into two categories; poor road and non-poor road. This data offers the base in budgeting, planning and programming of preservation projects.

The general guidelines for preservation of paved roads were updated in 2006. At the same time a need to include more variables into the planning process was recognized. A need for better understanding of the transversal and longitudinal irregularities of a road and texture of pavement surface were noticed. In 2010 a study was made, where a 4 degrees of freedom vehicle model was used with the 3-D surface model of a road. This study continued in 2010-12 where a more sophisticated, 7-DOF, model was used in analysing the pitch responses of a two-axle vehicle.

This study has been almost parallel with the previous one and the same 7-DOF vehicle model was used to analyse the roll response of a two axle vehicle when travelling on a road. A field survey was also conducted to find out those road sections, where there were severe transversal irregularities, mainly variation in cross slope. A comparative analysis was made to find out which variables are recognizing the severe variation in transversal direction. The regular condition variables were mega texture, IRI, RMS₁, RMS₃, RMS₁₀ and RMS₃₀ measured in left and right wheel paths. RMS-variables describe the longitudinal unevenness of a road with cut-off wave lengths 1 m, 3 m, 10 m and 30 m. A new deviation variable was calculated using the values of left and right wheel path values for each condition variable. The goodness of these deviation variables were tested using the field survey.

A second variable set was calculated using the 3-D surface data and the 7-DOF dynamic vehicle model. Main responses were roll velocity, roll acceleration, and load transfer ratio, LTR, but also bounce and pitch responses were calculated. The goodness of these variables was tested using the same field survey as in previous comparison. It was found out that the standard deviation of LTR (in a 10 m section) was the best variable recognizing severe transversal irregularities. The second best was the standard deviation of roll velocity (in a 10 m section). It was noticed that taking the standard deviation of a variable instead of the mean of a 10 m section was better explaining poor road sections. The main finding was that response variables of a dynamic vehicle model correlated with the results of the field survey better than regular condition variables.

The main recommendation of this study is that the variation of response variables of a two-axle 7-DOF dynamic vehicle model calculated in 10 m sections gives better understanding of how good the road surface as a whole is. The 10 m section could be classified into two classes describing the poor condition and non-poor condition with

a certain cut-off value. The overall condition of a 100 m section depends on the number of 10 m sections in bad condition and can be fixed in a better way later on in some other study.

Lateral responses were not included into the vehicle model, because it would have been forced to expand the dynamic vehicle model from 7-DOF to 14-DOF. However this goal would be the logic step in future studies. Curvature, cross slope and cornering of a vehicle are the next interesting issues to be analysed. In this study a static analysis was succeeded to handle lateral accelerations of a vehicle according to the geometry of a road. A filtering algorithm for curvature of a road was also made using data from a sample test roads which were measured in both direction. After filtering the radius of a road was then calculated. This is a rough filter which makes it possible to separate straight lines from curves and use the curvature data. However the separation of the middle element between a straight line and curve cannot be done so well and that is why a better filter is needed.

In this study the 3-D road profile was filtered to be used in a 7-DOF Matlab/Simulink dynamic vehicle model. All roads which have been measured with the high speed profilometer, can now be analysed with this vehicle model. Vertical forces, movements, velocities and acceleration and roll and pitch responses of any two axle vehicle can be calculated. The variation of response data is recommended to be used calculating a standard deviation of responses in 10 m section. This measure can be then used in recognizing bad road sections.

Esipuhe

Tämä selvitys on jatkoa diplomityönä tehdyille tutkimukselle raskaan ajoneuvon sivuttaisheilahdusten mallintamisesta. Aihetta koskevassa diplomityössä tutkittiin raskaan kaluston ja tien pinnan välistä suhdetta ja erityisesti tienpinnan kaltevuuksien vaihtelun aiheuttamaa raskaan kaluston heilahtelua. Siinä kehitettiin uusi tunnusluku kuvaamaan raskaan ajoneuvon korin heilahtelun voimakkuutta. Tunnusluku perustuu palvelutasomittauksesta saatavaan tien pinnan kaltevuustietoon.

Tämän selvityksen päätavoitteena on tutkia kehitetyn tunnusluvun ja todellisen tilanteen välistä yhteyttä eli tuottaa todisteita siitä, että tuotettu tunnusluku tunnistaa tiellä olevia sivuttaisheilahteluja aiheuttavia vaaranpaikkoja. Lisäksi tässä työssä kehitetään sivukaltevuuspuutteiden hallintaa ajoneuvodynamiikan ja tien kuivatuksen kannalta.

Työn ovat tehneet Eetu Hurtig ja Pertti Virtala Destia Oy:n Asiantuntijapalvelut yksiköstä ja sitä on ohjannut ohjausryhmä, johon ovat kuuluneet Liikennevirastosta projektipäällikkönä Juho Meriläinen ja muina osallistujina Olli Penttinen, Tuomas Toivonen ja Vesa Männistö.

Helsingissä syyskuussa 2012

Liikennevirasto
Väylätekniikkaosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	12
1.1	Tausta	12
1.2	Ongelma	14
	1.2.1 Tekninen ongelma	14
	1.2.2 Mittausongelma	15
2	TAVOITE JA RAJAUS.....	20
3	AIKAISEMPIA TUTKIMUKSIA	21
3.1	Sivukaltevuus	21
	3.1.1 Sivukaltevuustunnusluvun määrittäminen kuntovastuu-urakkaan	21
	3.1.2 Sivukaltevuustunnusluku.....	22
3.2	Talviliikenteen ja kitka.....	22
	3.2.1 Talviliikenteen ongelma-kohteet ja tiegeometria.....	22
	3.2.2 Poimintoja kitkaan liittyvästä aihepiiristä.....	23
3.3	Ajoneuvodynamiikka.....	25
	3.3.1 Raskaan ajoneuvon heilahtelun arvioiminen tien pinnan profiilista	25
	3.3.2 Kuormauksen vaikutus moduuliyhdistelmän ajostabiliteettiin.....	26
	3.3.3 Raskaiden ajoneuvojen ajovakaus ja turvallisuus.....	27
4	SIVUKALTEVUUDEN HALLINTA.....	29
4.1	Sivukaltevuusongelmat	29
4.2	Tarjolla oleva kitka	30
	4.2.1 Tienpidon tarjoama kitka	30
	4.2.2 Kitkaympyrä	31
4.3	Kitkan tarve kaarteissa	33
	4.3.1 Ajodynamiikka	33
	4.3.2 Pystysuuntainen ajodynamiikka	35
	4.3.3 Pituussuuntainen ajodynamiikka	37
	4.3.4 Sivusuuntainen ajodynamiikka.....	44
	4.3.5 Pyöräpainon siirtymän vaikutus kitkantarpeeseen.....	51
	4.3.6 Kitkantarvelaskelma ja sivukaltevuuspuute	51
4.4	Ajoneuvon sivuttaisheilahtelu.....	54
	4.4.1 Ajoneuvomalli	54
	4.4.2 Heräte	54
	4.4.3 Vasteet.....	55
	4.4.4 Sivuttaisheilahtelun laskeminen	55
	4.4.5 Sivuttaisheilahtelun tunnusluvut	56
5	HEILAHDUSTUNNUSLUVUN VALIDOINTI.....	59
5.1	Pöytätesti	59
	5.1.1 Testin profiilit.....	59
	5.1.2 Testin tulokset	59
5.2	Maastotarkastelu	60
	5.2.1 Janakkalan ympäristön kohteet	61
	5.2.2 Muut Uudenmaan alueen kohteet	67
5.3	Tunnuslukujen tunnistuskyky	71
	5.3.1 Tunnistuskyvyn maksimointi	71
	5.3.2 Tunnuslukujen paremmuus ja raja-arvot	72

6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	75
6.1	Yhteenveto.....	75
6.2	Johtopäätökset.....	76

LÄHTEET	79
---------------	----

LIITTEET

Liite 1	Tien geometrian suunnittelu
---------	-----------------------------

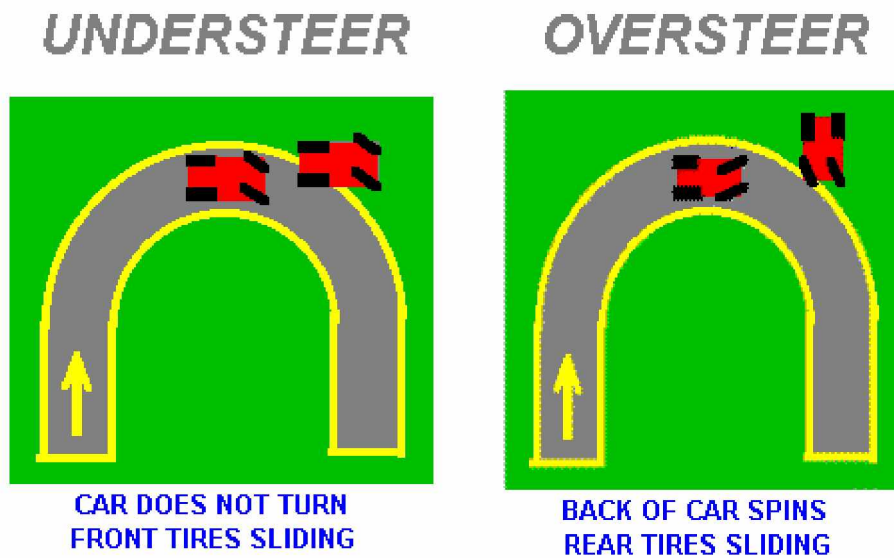
1 Johdanto

1.1 Tausta

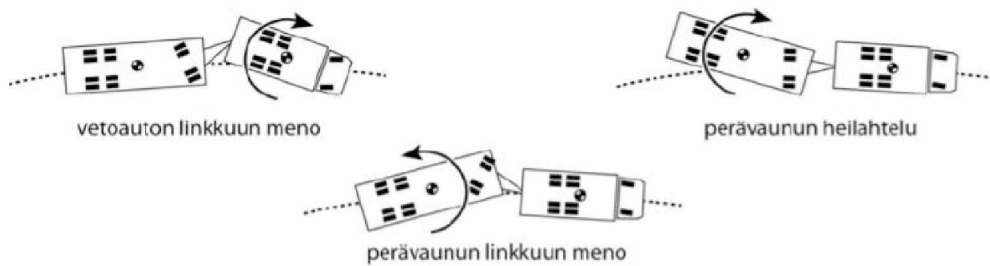
Päällystettyjen teiden kuntoa ja geometriaa on mitattu laserpohjaisilla mittauslaitteilla jo vuodesta 2003 lähtien. Yhtenä mitattavana tunnuslukuna saadaan kaistan sivukaltevuus. Tien geometriatiedoista tuotettavia tunnuslukuja ovat tien kaarteisuus ja pituuskaltevuus. Sivukaltevuustiedon hyödyntämistä on haitannut kaarteisuustiedon suodatustavan puuttuminen. Kaarregeometriaan liittyy lisäksi ajoneuvojen käyttäytyminen, mitä ei ole oikeastaan selvitetty ollenkaan.

Tiet rakennetaan sekä ajoneuvodynamiikan että kuivatuksen kannalta oikeaan sivukaltevuuteen. Sivukaltevuuteen vaikuttavat ajan kuluessa monet seikat. Tie routii talvella epätasaisesti kuivatus- ja lumitilanteesta riippuen ja tiepäällysteitä ylläpidetään yhä kevyemmällä toimenpiteillä, joissa massaa ei juuri lisätä tai sivukaltevuutta parantavia tasauksia ei tehdä. Sivukaltevuustietoa ei ole pystytty sisällyttämään tien huonokuntoisuuden määritelmään johtuen sen monitahoisesta kytkennästä kitkaan, geometriaan ja ajoneuvodynamiikkaan.

Sivukaltevuustilanne päällystetyillä teillä on päässyt heikkenemään. Vuosittain tapahtuu useita liikenneonnettomuuksia, joiden voidaan epäillä johtuvan ainakin osittain sivukaltevuuspuutteista. Rekkojen kaatumiset ovat eräs sellainen onnettomuustyyppi, jonka osasyynä voi olla sivukaltevuuspuute. Myös kevyille ajoneuvoille tapahtuu sellaisia suistumis- ja kohtaamisonnettomuuksia, joiden osasyynä saattaa olla sivukaltevuudesta aiheutuva hallinnan menetys. Sivukaltevuus on tärkeä tien päällysteen elementti varsinkin kaarteissa, jolloin ajoneuvon hallinnassa tarvitaan sivuttaispitoa. Ylämäki, joka loppuu kaarteeseen, voi aiheuttaa takavetoisille henkilöautoille yliojaustilanteen ja etuvetoiselle henkilöautolle aliojaustilanteen, jotka molemmat kasvattavat tieltä ulos suistumisen riskiä. Takavetoinen henkilöauto tarvitsee kitkaa vetäville pyörille nopeuden ylläpitämiseen ja jyrkissä kaarteissa sivuttaispito saattaa loppua ja aiheuttaa tieltä ulos suistumisen. Ylämäessä tosin tapahtuu pieni painon siirtymä etuakselilta taka-akselille, joka parantaa tilannetta. Etuvetoisella autolla nopeuden ylläpitämiseen tarvittava veto tarvitaan etupyörille, joiden pidon loppuminen aiheuttaa kaarteessa aliojaustilanteen eikä ajoneuvo käänny kaarteessa tarpeeksi. Tilannetta pahentaa ylämäessä tapahtuva painon siirtymä takapyörille.



Kuva 1. Etuvetoisen henkilöauton aliohjaustilanne (vasemmalla) ja takavetoisen henkilöauton yliohjaustilanne (oikealla) kaarrekäyttötymisissä.



Kuva 2. Kuorma-auton ja varsinaisen perävaunun erilaisia ei-toivottuja ajokäyttötymistilanteita [15].

Oikealle kaartuvissa kaarteissa riskinä on vastaantulijan kaistalle suistuminen ja vasemmalle kaartuvissa kaarteissa tieltä ulos suistuminen. Pidon heikkeneminen saattaa aiheuttaa myös sellaisia ohjausliikkeitä, jotka lisäävät suistumisen riskiä. Liikenneonnettomuuksien tutkintalausunnoissa on usein sellaisia viittauksia, jotka sopisivat edellä mainittuihin tilanteisiin.

Mies, 25, ajoi aamulla Fiat Pundo 55S -henkilöautolla seututietä noin 80 km/h-nopeudella. Ylämäen jälkeisessä oikealle kaartavassa mutkassa auto ajautui vasemmalle ulos tieltä, törmäsi liittymärakenteeseen ja sinkoutui ilmalentoon. Turvavyötön kuljettaja putosi matkustajatilasta ja kuoli. Tapahtumahetkellä oli päivänvalo. Lämpötila oli +21. Asfalttipäällysteinen tie oli äskettäin päällystetty uudelleen. Tiemerkinnot puuttuivat ja siksi nopeusrajoitus oli 50 km/h. Ennen päällystystyötä nopeusrajoitus oli 70 km/h.

Väsynyt ja alkoholin sekä lääkkeiden vaikutuksen alainen kuljettaja ajoi ylinopeutta. Turvavyö laukesi törmäyksessä. Turvavyö olisi pelastanut kuljettajan hengen. Päällystystyön yhteydessä tehty sivukaltevuuden korjaus oli puutteellinen.

Konginkankaan onnettomuuden uutisoinnissa ilmeni, että perävaunut luisuvat ja kaatuvat usein. Kuljettajat ilmoittivat jopa, että luisut ovat arkipäivää. Rekka-autojen kaatumisia tapahtui vuonna 1998 yhteensä 180 kappaletta eli rekkoja kaatuu keskimäärin joka toinen päivä. Pääosin kaatumiset johtuivat käsittelyvirheistä, teknisien ongelmien vuoksi kyljelleen oli päätynyt noin 14 prosenttia rekoista. Tutkija arvelee, että kaatumisien syynä ovat liian kireät aikataulut. <http://www.akt.fi/index.php?mid=233>.

Liikennevirasto on lähtenyt monipuolistamaan tiestön kuntoon liittyvien tekijöiden hallintaa uusissa ylläpidon toimintalinjoissaan. Eräs hallinnan alue on juuri päällysteiden sivukaltevuus. Sivukaltevuuspuutteita kartoitettiin ylläpidon toimintalinjojen laadinnan yhteydessä vuonna 2006. Keväällä 2010 valmistui diplomityö (Hurtig, 2010) tien sivukaltevuuden ja raskaan ajoneuvon välisen heilahtelun yhteydestä. Työssä verrattiin erilaisia tunnuslukuja ja kehitettiin lisäksi sellainen uusi tunnusluku, joka kuvasi raskaan ajoneuvon tien pinnasta johtuvan heilahtelun voimakkuutta. Tavoitteena oli löytää sellainen tunnusluku, jolla todelliset, ajoneuvon käyttäytymiseen vaikuttavat vaaranpaikat pystyttäisiin erottelemaan tavanomaisista sivukaltevuuden vaihteluista. Tunnusluvun käyttökelpoisuutta ei tuossa työssä tutkittu ja se onkin luonteva jatke tunnusluvun käyttöön otossa. Päällysteiden sivukaltevuuden hallinnassa on otettava huomioon sekä raskaan että kevyen ajoneuvoliikenteen tarpeet.

1.2 Ongelma

1.2.1 Tekninen ongelma

Teiden sivukaltevuuteen liittyviä tunnuslukuja on yritetty aiemmin kehittää useassa eri työssä. Lähtökohtana on useimmiten ollut vain mitattu sivukaltevuustieto. Sivukaltevuusproblematiikka on kuitenkin teknisempi ja edellyttää siihen liittyvän kokonaisuuden purkamista. Ensimmäinen osa ongelmaa on riittävän kitkavoiman olemassaolo kaarteissa kun ajoneuvo pyrkii kulkemaan suoraan kulkusuuntaansa. Toinen osa ongelmaa on yksittäisten ajamista ja ajoneuvon hallittavuutta haittaavien sivukaltevuusheilahtelujen tunnistaminen. Kolmas osa ongelmaa on tienpidollinen ja liittyy sivukaltevuuden toimimattomuuteen kuivatuksessa. Nämä kaikki olisi saatava hallintaan.

Ongelmia, niiden vaikutuksia ja poistamistoimia voidaan luonnehtia seuraavasti:

- **Kitkantarve.** Ajoneuvo tarvitsee kaarteissa kitkaa, jotta se voi pysyä halutulla ajolinjalla kaistaviivojen välissä. Tämän tarpeen määrää pääasiassa nopeudesta ja kaarresäteestä riippuva yhteys, johon vaikuttavat lisäksi sivukallistukset. Kitkantarve korostuu talviaikana kun lumi ja jää heikentävät sitä. Kitkan tarpeeseen voidaan vaikuttaa kolmentasoisilla toimenpiteillä, jotka ovat nopeusrajoituksen alentaminen, sivukaltevuuden parantaminen ja kaarresäteen suurentaminen. Käytettävissä olevaa kitkaa parannetaan liukkaudentorjunnalla ja ajoneuvojen rengastuksella.
- **Ajovakaus.** Raskas ajoneuvoyhdistelmä on sikäli hankala ajettava, että tiessä olevat yksittäiset heitot, painumat ja sivukaltevuusmuutokset aiheuttavat ajolinjavaihteluita sekä ajoneuvon kallistusvaihteluita, jotka pahimmillaan johtavat tieltä tai kaistalta suistumisiin. Yhdistelmäajoneuvoissa vetoauton ajolinjamuutokset kertautuvat perävaunulle suurempina eikä kuljettaja aina pysty arvioimaan tai tuntemaan miten perävaunu kyseisissä tilanteissa käyttäytyy. Raskaiden ajoneuvojen kaatumisia tai siihen verrattavia onnettomuustilanteita tapahtuu Suomessa lähes päivittäin. Yksittäiset sivukaltevuusvaihtelut voidaan parantaa joko päällystämällä tai rakennetta parantamalla. Liikenneturvallisuutta voidaan parantaa nopeusrajoitus- ja muilla liikennemerkeillä, mutta samalla heikennetään sujuvuutta.
- **Kuivatus.** Kuivatus on pääasiassa tienpidollinen ongelma, joka korostuu silloin kun sivukaltevuutta ei ole tarpeeksi tai se on jopa väärään suuntainen. Kuivatusongelmat pitävät tien ja sen rakenteet märkänä ja nopeuttavat tien

rappeutumista, mikä entisestään pahentaa tien muodon oikeana pysymistä. Sivukaltevuudesta johtuvat kuivatusongelmat ovat yleensä suorilla osuuksilla, missä routa nostaa ja laskee ajoradan keskiosaa aiheuttaen alkuperäisen sivukaltevuuden muuttumisen. Kuivatukseen liittyvien sivukaltevuusongelmien määrä on kasvanut johtuen mm. päällystystoiminnan toimenpiteiden kevenemisestä (vähenevä tasauksen käyttö, yhä pienemmät massamäärät ja rem-tekniikat). Kuivatuspuutteen arvioimista on haitannut tien vaakageometrian suodatuksen puuttuminen. Sivukaltevuus on tunnuslukuna puuttunut päällysteen huonokuntoisuuden määritelmästä, millä on myös oma vaikutuksensa. Kuivatukseen liittyviä sivukaltevuusongelmia parannetaan joko päällystämällä tai rakennetta parantamalla.

Yhteenvedon voidaan todeta, että sivukaltevuuden tulee tukea ajoneuvon turvallista käyttäytymistä ja tien kuivana pysymistä. Sivukaltevuustunnuksien ja sille asetettavien raja-arvojen tulee palvella näitä tavoitteita.

1.2.2 Mittausongelma

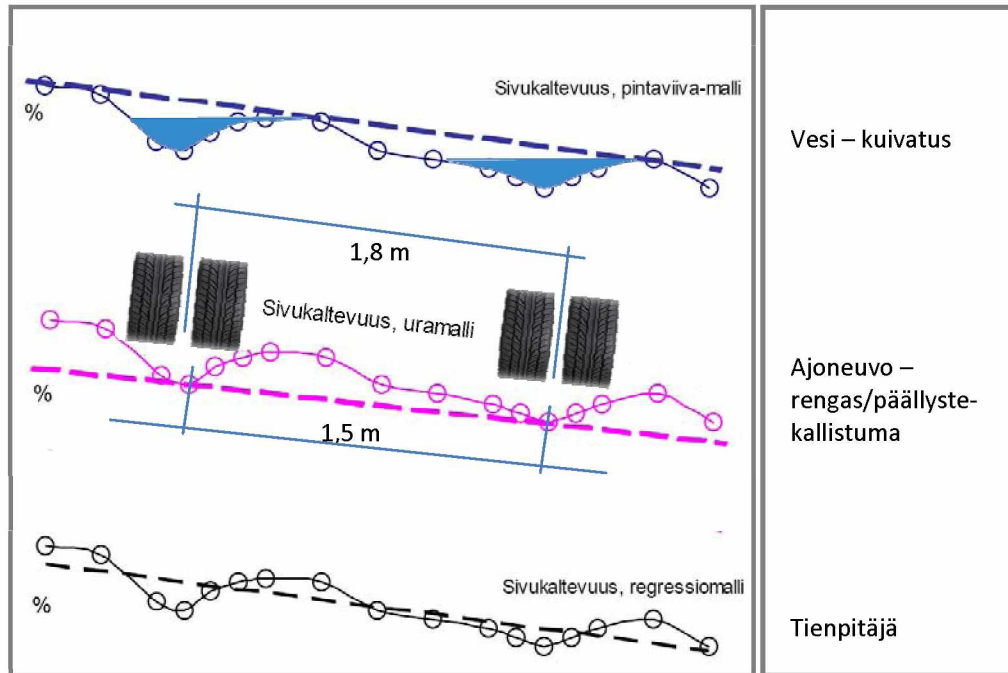
1.2.2.1 Sivukaltevuus

Sivukaltevuus on sen käytön kannalta määritettävä sekä sivu- että pituussuunnassa. Määrittelyyn vaikuttavat mittaustekniset rajoitukset. Tien profiilia mitataan pituussuunnassa 17 eri anturilla, joiden muodostama kokonaismittausleveys on 3,2. Mittausauton mittauspalkki on rakennettu siten, että ajourien kohdalla on muuta mittausaluetta tiheämpi anturikeskittymä. Ajourien etäisyys toisistaan on suunnilleen henkilöauton raidelevyden suuruinen. Ajourien kohdalla on kummassakin ajourassa viisi anturia, jotka kattavat noin 50 cm levyisen alueen. Muualla kaistan poikkileikkauksessa antureita on harvemmassa. Henkilöauton rengas on 16–25 cm leveä ja kulkee kahden tai kolmen anturin muodostamalla uralla. Raskaan ajoneuvon yksittäisrengas noin 30–35 cm ja paripyörä noin 75–85 cm ja ne kulkevat vastaavasti 4 ja 5–7 anturin kattamalla uralla.

Käytetyin sivukaltevuuden laskentatapa on nykyisin ns. regressiokaltevuus, jossa muodostetaan sivukaltevuutta kuvaava suora sovittamalla se mittaustietoihin pienimmän neliösumman menetelmällä.

Vesi kulkeutuu tieltä viettokaltevuutta pitkin ja se määrätty sivu- ja pituuskaltevuuksien avulla. Veden kulkeutumisen kannalta sivukaltevuuden pintaviivamalli saattaa olla paras, mutta muutkin mallit, lähinnä regressiomalli, sopivat sen arviointiin.

Ajoneuvon ja päällysteen kontaktipinnan kaltevuutta kuvaa parhaiten uranpohjamalli. Se sopii paremmin henkilöautolle kuin raskaalle ajoneuvolle, koska raidelevydet ovat erisuuruiset. Jos raskaan ajoneuvon toisen puolen pyörät ovat urassa, niin toisen puolen pyörien täytyy olla uran ulkopuolella. Kaarteissa henkilöautojen ajolinjat ja siten urat yleensä oikaisevat. Raskaan ajoneuvon ajolinjat noudattavat paremmin tien linjausta.



Kuva 3. *Palvelutasomittausten perusteella tuotettavissa olevat sivukaltevuusmallit. Vuosina 2003–2007 tuotettiin kaikki eri tunnusluvut. Vuosina 2008–2013 tuotetaan vain regressiomallin mukaista sivukaltevuutta.*

Ajouraa kuvataan sekä kevyille että raskaille ajoneuvoille kaikkien ajourien antureiden avulla ns. monilinjamittauksena. Monilinjamittaus tuo informaatiota ajouran koko leveydeltä ja vähentää mittausvirhettä. Sivukaltevuuteen tarvittavaa informaatiota tuotetaan mittauksessa uralaskennan yhteydessä samoille tulostusväleille kuin uraakin. Raakadatatiheydellä (42 mm tai 100 mm) tuotetuista arvoista lasketaan keskiarvoja halutuille laskentajaksoille. Lyhin käytössä oleva laskentajakso on 10 m. Verkko-tason palvelutasomittauksissa geometriatunnusluvut (sivukaltevuus, pituuskaltevuus, kaarteisuus) tuotetaan 50 m jaksoille.

1.2.2.2 Vaakageometria

Tien vaakageometrian pääelementit ovat suora, ympyränkaari ja niiden väliin sijoitettava siirtymäkaari eli klotoidi. Tien suorat osuudet ovat sivukaltevuuden kannalta helpoimmat rakentaa ja hallita, koska sivukaltevuudet ovat reunoille päin viettäviä ja pysyvät vakiona. Myös kuivatus toimii suorilla parhaiten. Suorien enimmäispituudeksi on suositeltu 2–3 km.

Tiet suunnitellaan sopimaan maastoon siten, että mäet, notkot ja muut esteet kiertään sopivilla ympyränkaarilla. Ympyränkaarien mitoituksessa on ratkaisevinta säteen suuruuden valinta, jota tehdessä otetaan huomioon ajodynamiikka ja turvallisuusvaatimukset. Kaarteissa ajodynamiikkaa ja turvallisuutta tuetaan yksipuolisilla sivukaltevuuksilla.

Suorien ja kaarien välinen osuus suunnitellaan jatkuvasti muuttuvilla välielementeillä, joiden toisen pään kaarevuus sopii yhteen suoran kanssa ja toisen pään kaarevuus ympyrän kaaren kanssa. Samalla sivukaltevuus muutetaan kaksipuolisesta sivukaltevuudesta yksipuoliseksi sivukaltevuudeksi. Tällöin sivukaltevuuden suunta vaihtuu suorien reunoille päin kaltevasta vasemmalle kaartavien kaarteiden keskelle päin kal-

tevaksi. Tämä vaihtuminen tapahtuu siirtymäkaaripituuksilla. Klotoidia voidaan käyttää myös silloin, kun tielinjalla siirrytään ympyrän kaarelta toiselle erisuurelle ympyränkaarelle.

Jos teiden suunniteltu ja rakennettu vaak- ja pystygeometria (geometriset elementit) olisivat talletettuina yleistietona rekisteritiedoiksi, niin ne olisivat käytettävissä sivukalveuustarkasteluissa tavoitesivukalveuksina, joihin mitattua kalveuutta voitaisiin verrata. Tällöin nähtäisiin helposti, miten suuria sivukalveuuspuutteet kulloinkin olisivat. Koska näin ei tilanne ole, on tien vaakageometriset ominaisuudet mitattava ja tulkittava erikseen. Tien vaakageometria pysyy yleensä pitkään ennallaan, ainoastaan sivukalveuksissa ja jossain määrin myös tasauksissa tapahtuu ajan kuluessa muutoksia (routanousut, painuminen, tiivistyminen, deformaatiot, jyrsiminen, päällystäminen).

Palvelutasomittareiden kaarteisuuden mittaus perustuu inertialaitteeseen ja kiihtyvyyksiin, joihin vaikuttavat mittausajoneuvon liikkeet. Mittauksen yhteydessä syntyy joskus ei-toivottuja liikkeitä, jotka vääristävät kaarteisuustuloksia. Esimerkiksi hitaan ajoneuvon ohitustilanne aiheuttaa kaarteisuustiedon muuttumisen. Mitattu kaarteisuus vaihtelee siten melko paljon ja sitä on tavalla tai toisella suodatettava, ennen kuin siitä pystytään päättämään, minkälainen vaakageometrinen elementti tiellä on. Seuraavassa kuvassa on esitetty erään tien kaarteisuusarvoja kahdella eri keskiarvoistuspituudella. Noin 4 km:n pituisella tiellä on kolme täyttä ympyränkaarta (tieosan alku- ja loppupäät pois lukien). Tie on suunniteltu käyttäen kaarresädettä 2000 m, joka vastaa kaarevuutta 5 (10000/2000). Jotta tieosan sivukalveuusvaatimukset pystyttäisiin päättämään, olisi ensin löydettävä vaakageometrian elementtien vaihtumispisteet. Mustat pystyviivat kuvaavat silmämääräisesti asetettuja vaihtumispisteitä, jotka tulisi pystyä asettamaan matemaattisesti.

Kuvan 50 m kaarteisuusarvo vaihtelee samalla ympyränkaarella välillä 2–7, mikä on kaarresäteeksi muutettuna noin 1400–5000 m. Vastaava vaihtelu on 10 m datalla kaarteisuuden arvoina 0–10 ja kaarresäteen arvoina 1000 m ja siitä ylöspäin määrittämättömään arvoon saakka. Kumpaakaan kaarresäteen arvoa ei voida käyttää sivukalveuuden tarkasteluihin vaan ne on ensin suodatettava. Suodatuksella tulisi pystyä paljastamaan se, että taustalla oleva suunniteltu kaarresäde oli 2000 m.

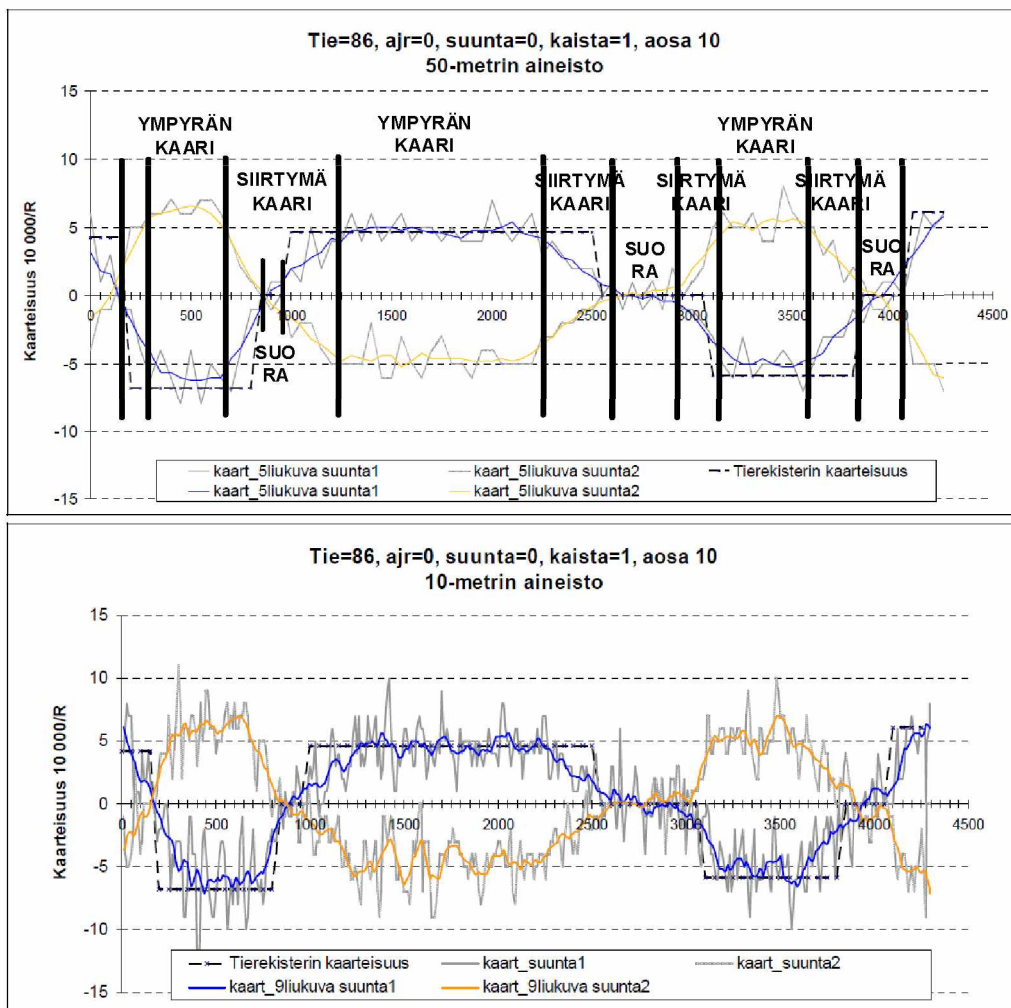
Mitatun kaarresäteen loogisuudesta on tavalla tai toisella myös varmistuttava, ennen kuin sen perusteella voidaan arvioida, mikä sivukalveuustavoite tien missäkin kohdassa on. Loogisuustarkastus voidaan tehdä kahdella yksinkertaisella säännöllä:

- Eri suuntiin mitatut kaarresäteet ovat loogisia, jos niillä on eri etumerkki ja niiden itseisarvojen erot ovat enintään 10 %.
- Suorilla kumpaankin suuntaan mitatun kaarteisuusarvon tulisi antaa saman-suuntainen informaatio eli nollakaarevuus.

Selvityksessä (40/2005) tehdyn vertailun mukaan 50 m datalla 250 metrin liukuvan keskiarvon avulla suoritettujen loogisuustarkastusten läpäisi noin 97 % aineistosta (300 km) ja 10 m datalla 90 m liukuvan keskiarvon avulla suoritettujen loogisuustarkastusten läpäisi noin 93 % aineistosta. Eli viiden havainnon keskiarvo verkkotason datalla tuotti loogisuustarkastuksissa paremman lopputuloksen kuin yhdeksän havainnon keskiarvo hanketason datalla.

Vaakageometrinen elementtien tunnistamisessa on käytävissä myös sellaista informaatiota, jota tien vaakageometrian suunnittelusta tiedetään:

- Kaarresäde pysyy tai sen on tarkoitettu pysyvän yleensä vakiona koko kaarteiden ajan (pl. siirtymäkaaret).
- Siirtymäkaari tuo kaarevuuden ympyrän kaarelta nolnaan tietyllä sille ominaisella nopeudella, jonka määrää yhtälö $RL=A^2$. Kun R ja L tiedetään, niin periaatteessa tiedetään jo kaavan perusteella, miten nopeasti kaarresäteen tulisi muuttua. Kun suunnitellaan kaarre säteelle 2000 m, niin se tuodaan suoralle esimerkiksi kuvassa L=300 m matkalla.



Kuva 4. Esimerkki kaarteisuudesta kahdella eri laskentapituudella. Yhdellä tieosalla on useita vaakageometriaelementtejä, jotka tulee pystyä huomioimaan kun arvioidaan sivukaltevuuden tarvetta. Kaarevuuksia ja kaarresäteitä tulee suodattaa, jotta elementtien vaihtumiskohdat saadaan selville. Ylemmässä kuvassa on käytetty verkkotason dataa ja alemmassa hanketason dataa [1].

Loogisuustarkistuksen edellytyksenä on, että on käytävissä mittaustieto tien molemmista suunnista. Yksiajorataisilla teillä kuitenkin pääsääntöisesti vain toinen suunta on mitattu, joten loogisuustarkistus ei toimi yhtä hyvin kuin kuvan esimerkissä. Kaksiajorataisilla teillä molemmat suunnat on yleensä mitattu, mutta ne saattavat sopia huonosti yhteen, koska ajoratojen linjaukset saattavat poiketa toisistaan. Toi-

saalta sitten samaan suuntaan olevien kaistojen mittaustulokset taas tukevat loogisuustarkistusta.

1.2.2.3 Pystygeometria

Tien pystygeometrian elementtejä ovat pyöristyskaaret ja niiden väliset suorat. Palvelutasomittauksissa pystygeometriaa mitataan pituuskaltevuutena, jonka avulla edellä mainitut elementit ovat ainakin periaatteessa tuotettavissa. Pituuskaltevuustieto on laskentavälin keskimääräinen kaltevuus prosentteina. Pituuskaltevuustieto kertoo, minkä verran laskentavälin alku- ja loppupisteen välinen korkeusero on metriä kohden (m). Pituuskaltevuustietoa käytetään mäktivastuksen määrittämisessä sekä vietokaltevuuden laskemisessa.

Pituuskaltevuus vaikuttaa sivukaltevuustarkasteluihin myös ajoneuvojen kannalta siten, että se vaikuttaa nopeuden ylläpitämiseen tai jarrutuksissa nopeuden alentamiseen tarvittavan kitkavoiman lisääntymisenä ja ottaa siten osan tarjolla olevasta kitkasta ennen kuin se on käytettävissä sivusuunnan tarpeisiin.

2 Tavoite ja rajaus

Tämän työn tavoitteena on tarkastella diplomityössä (Hurtig, 2010) kehitetyn raskaan ajoneuvon heilahtelua kuvaavan tunnusluvun ”todenmukaisuutta” ja tarpeen vaaties- sa kehittää sitä edelleen. Lisäksi tunnusluvulle määritetään raja-arvot, joita tiestöllä ei mielellään saisi esiintyä. Nykyinen laskentamenetelmä ei huomioi tien kaarteisuu- den aiheuttamaa vaikutusta. Työssä tarkastellaan kaarteisuuden vaikutusta sivukal- tevuustunnusluvun yhteydessä sekä tarpeen mukaan lisätään se tarkasteluun. Lisäksi laskentamenetelmää kehitetään siten, että se on mahdollista suorittaa suurillakin ai- neistoilla.

Työ jakaantuu kolmeen osaan, jotka ovat:

- sivuttaisheilahtelun tunnusluvun valinta ja validointi
- tunnuslukujen laskennan kehittäminen
- tunnuslukujen raja-arvojen määrittäminen

Tunnuslukujen käyttökelpoisuutta tarkastellaan vertaamalla niiden avulla löydettyjä kohtia muulla tavalla saatuun informaatioon ja analysoidaan, miten hyvin ongelmakohtat ovat niillä löydettävissä.

Tunnuslukujen avulla haetaan rajatulta alueelta sellaisia kohtia, joilla sivukaltevuus saa suuria vaihteluita. Osalle saaduista kohdista tehdään maastokatselmus ja verrataan maastossa tehtyjä havaintoja tunnuslukuihin.

3 Aikaisempia tutkimuksia

3.1 Sivukaltevuus

3.1.1 Sivukaltevuustunnusluvun määrittäminen kuntovastuu-urakkaan

Sivukaltevuuden ja tiegeometrian välistä yhteyttä on tutkittu Tiehallinnon vuonna 2005 teettämässä selvityksessä ”Ura- ja sivukaltevuustunnusluvun määrittäminen kuntovastuu-urakkaan. Tiehallinnon selvityksiä 40/2005.” Selvityksessä oli lähtökohdista vuonna 2003 kertyneet palvelutasomittaukset, jolloin oli ensimmäistä kertaa saatu tien geometriatietoja palvelutasomittausten yhteydessä.

Selvityksen lopputuloksena annettiin mm. seuraavia suosituksia:

- Algoritmin toimivuuden ja luotettavuuden kannalta suurimmat epävarmuustekijät kohdistuvat algoritmissa hyödynnetyn, palvelutasomittausten yhteydessä tuotetun vaakageometrian tarkkuuteen. Tiedon hyödyntäminen onnistuu, mutta edellyttää sopivan suodatuksen käyttämistä, koska geometriatieto vaihtelee melko paljon jopa tien vaakageometrian elementtien sisällä.
- Verkkotason (100 metrin) tulostustarkkuudella ja tässä työssä käytetyillä suodatuksilla päästään melko hyvään tarkkuuteen. Hanketasoa palvelevissa ja edellistä pienemmällä tulostusväleillä (10 m) tehtävissä tarkasteluissa epätarkkuutta aiheuttaa vaakageometrian suurehko ”sahaaminen” ja tavoitealgoritmin turhan tarkka luokittelu.
- Suorien ja kaarien erottelemiseen oli käytetty suodattimena raja-arvoa 1,5 eli kaarresäteen arvoa 7500 m ($10000/R=1.5$). (Suoriksi on kuitenkin määritelty sellaiset tienkohdat, joilla kaarresäde on vähintään 10 000 m.)
- Mittausta tulisi kehittää siten, että erityisesti vaakageometrian muutoskohdat saataisiin selville.
- Työssä on paneuduttu sivukaltevuusproblematiikkaan ensisijaisesti mittausaineistojen lähtökohdista. Sivukaltevuutta tulisi kuitenkin tarkastella enemmänkin teknisistä ja ajoneuvodynaamisista lähtökohdista.
- Sivukaltevuustunnusluvun laskemiseen kehitettävää algoritmia muodostettaessa olisi keskityttävä mm. seuraaviin asioihin:
 - Mikä on sivukaltevuuspuute ja miten se määritetään?
 - Milloin sivukaltevuusvaatimus on voimassa ja milloin ei?
 - Mitkä ovat määrittelyn osatekijät (esim. pituuskaltevuus, nopeusrajoitus, vaakageometria yms.)
 - Mitkä ovat sivukaltevuuden muutosnopeuden sallitut rajat? Vaakageometrian muutoksista aiheutuu muutoksia sivukaltevuuteen, miten peräkkäisten tarkastelujaksojen sivukaltevuuserot tulisi ottaa huomioon?

Selvityksessä päästiin melko hyvin sivukaltevuusproblematiikan jäljille, tosin rajoituen vain mittaustietoihin. Suosituksissa kuitenkin mainittiin lähtökohtien monipuolistaminen ajoneuvodynaamiikkaan ja muihin teknisiin seikkoihin. Sivukaltevuuspuutteiden ongelmaa selvitettiin tiegeometriatietojen suodatuksen kautta, mikä onkin ensimmäinen askel sivukaltevuuden hallinnassa. Selvitys rajoittui kuitenkin vain vaakageometriaan eikä siinä otettu huomioon ajoneuvodynaamiikkaa. Vaakageometri-an käsittelytapa on kuitenkin käyttökelpoinen lähtökohta tälle työlle.

3.1.2 Sivukaltevuustunnusluku

Sivukaltevuustunnusluvun määrittämistä ja käyttöä on selvitetty myös ”Sivukaltevuustunnusluku. Sivukaltevuuden parantaminen päätieverkon ylläpidon hankkeissa, Tiehallinnon selvityksiä 34/2009”-selvityksessä [3].

Työn tuloksena annettiin mm. seuraavia suosituksia:

- Sivukaltevuuden hanketason tarkasteluihin suositellaan käytettäväksi 20 m tulostusvälille laskettua *regressiokaltevuutta*. Kaarresäde suositellaan mitattavaksi samassa yhteydessä, mutta sen käytössä on otettava huomioon siihen liittyvä epätarkkuus.
- Sivukaltevuustunnuslukua suositellaan käytettäväksi vain päätietason tarkasteluissa.
- Verkkotason sivukaltevuuspuutteita ei voida määrittää vertaamalla mitattua sivukaltevuutta tavoitearvoihin. Sivukaltevuustunnusluvun hyödyntäminen edellyttää aina kohteen tuntemista.

Työssä käsiteltiin sivukaltevuuden hallinnan ongelmia ja annettiin joitakin suosituksia. Selvitys oli melko pintapuolinen, mikä näkyy suositusten vähäisyytenä ja yleisluontoisuutena.

3.2 Talviliikenteen ja kitka

3.2.1 Talviliikenteen ongelmakohteet ja tiegeometria

Talviliikenteen ongelmakohtia käsitelleessä tutkimuksessa (Tiehallinto, 2009) pyrittiin selvittämään miten tien kunto- ja geometriatietoja voitaisiin hyödyntää talviliikenteen turvallisuuden ja sujuvuuden parantamiseksi. Ongelmakohtia haettiin tiemestareita haastatteleamalla ja urakoiden työkohtaisista tarkennuksista. Esille nousseet ongelmakohdat erottuivat yhden tai useamman kunto- tai geometria muuttujan mukaan muusta tieverkosta. Yleisesti ottaen keskimääräistä suuremmat kaarteisuuden arvot selvästi kasvattivat onnettomuusriskiä sekä ongelmakohdilla että koko tieverkolla.

Tutkimuksessa todettiin, että ainakin kaikkein selvimmät ongelmakohdat voidaan tunnistaa PTM-tietojen pohjalta varsin yksinkertaisten mallien ja analyysien avulla. Mikäli halutaan tunnistaa myös vähemmän poikkeavia kohteita, tällöin tarkasteltavia muuttujia voisivat olla KVL, raskaan liikenteen KVL, nopeusrajoitus, hoitoluokka, tien leveys ja kaistojen lukumäärä.

Päähuomio kiinnittyi liikenteen sujuvuuteen, ja liikenneturvallisuus jäi vähemmälle huomiolle. Aiheen jatkotutkimuksissa huomiota suositeltiin kiinnitettävän mm. seuraaviin asioihin:

Ongelmakohtien analysointi ajoneuvosimuloinnein (ajoneuvodynamiikan huomiointi). Huomio on kiinnitettävä seuraaviin: nopeus, kitka kaarresäde, pituuskaarevuus (pyöristyssäde, kaltevuus) ja poikkikaltevuus.

Onnettomuuksien ja nykyisten kuntomuuttujien välisen yhteyden analysointi (Heitot, karkeusmuuttujat, RMS, vesiura, harjanteen korkeus).

Raportin perusteella ongelmallisia ovat myös kohteet, joissa on pitkiä ja/tai jyrkkiä mäkiä, sekä kohteet, joissa tien kaarteisuus poikkeaa tien yleisestä. Eli yllättäen tulevat jyrkät mutkat aiheuttavat vaaratilanteita. Lisäksi kohteet, joissa tien sivukaltevuus on liian pieni tai se on vääräsuuntainen.

Tärkeimmät ongelmakohteita kuvaavat muuttujat olivat:

- pituuskaltevuus ja ylämäkien pituuskaltevuuden maksimi mäen pituus (pituuskaltevuudesta johdettu muuttuja)
- kaarteisuus
- sivukaltevuus (10 m data)
- viettokaltevuus (10 m data)

Ongelmakohtien ja tärkeimpien kuntomuuttujien IRI, URA, heitot jne. välillä ei havaittu selkeää eroa muuhun tieverkkoon nähden [2].

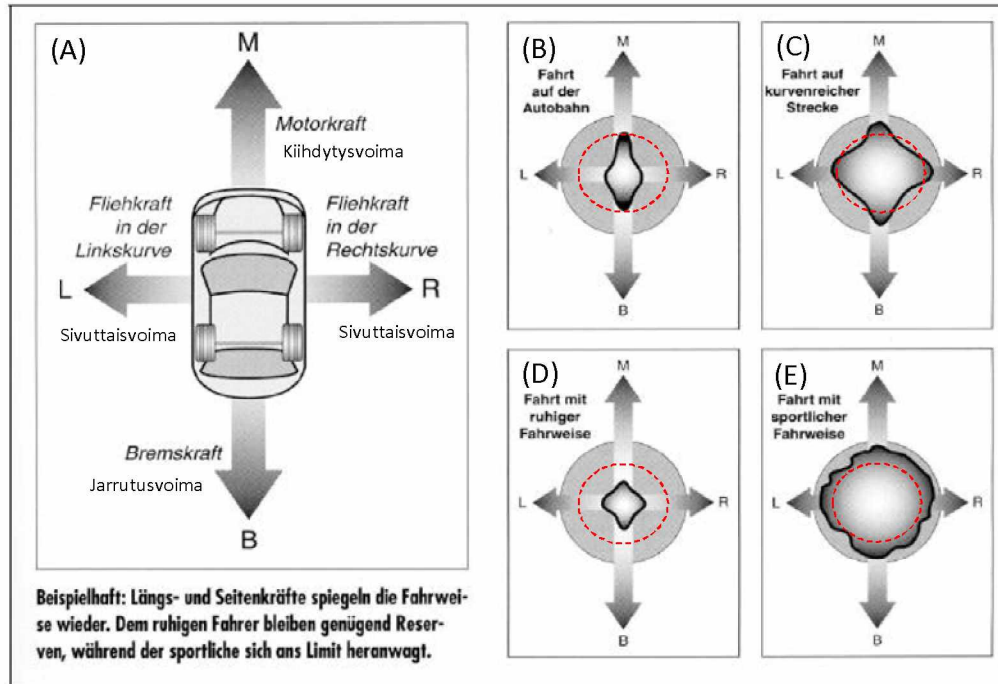
Tässä työssä on nostettu esiin perusongelma, missä talviliikenteen turvallisuuden kannalta tulisi selvittää tien sivukaltevuuksien, geometrian, kitkaolosuhteiden ja ajoneuvojen käyttäytymisen välinen yhteys. Kuvattu ongelmakokonaisuus on täsmälleen sitä, mihin tässä työssä halutaan pureutua. Selvitys antoi myös sen tuloksen, että ongelma-kohtien kautta tapahtuva syy-seuraussuhteiden selvittäminen ei yleensä onnistu. Esimerkiksi liikenneonnettomuuksien tapahtumapaikkojen ja tien yksittäisten kuntosuhteiden välille ei ole helppoa löytää selkeää yhteyttä, koska liikenneonnettomuudet syntyvät usein monen asian yhteisvaikutusten seurauksena. Yksittäisten tekijöiden merkitys yksittäisissä onnettomuuksissa vaihtelee.

3.2.2 Poimintoja kitkaan liittyvästä aihepiiristä

Ajoneuvon renkaan ja tien pinnan välisestä kitkasta on useita selvityksiä, joita on tehty lähinnä ajoneuvotekniikan ja erityisesti rengasteollisuuden alueella. Niitä ei ole käsitelty kuitenkaan kovin yksityiskohtaisesti väylänpitoon liittyvissä selvityksissä johtuen lähinnä siitä, että se aihepiiri on vierasta perinteiselle asiantuntemukselle. Ohessa on listattu joitakin hyödyllisiä ajoneuvotekniikan selvityksistä ja asiantuntijoilta saatuja poimintoja:

- Kitkatermit
 - Saatavilla oleva kitka tarkoittaa suurinta kitkavoimaa, joka kulloisissakin olosuhteissa on saatavissa renkaan ja tien pinnan välissä. Tähän vaikuttavat renkaiden ja tien pinnan ominaisuudet sekä keli ja sää.
 - Käytettävä kitka tarkoittaa sitä kitkavoimaa, jonka kuljettaja käyttää. Kuvassa 5 on esitetty erilaisia käytettävän kitkan pintoja.
 - Kitkamarginaali on se turvamarginaali, joka jää edellisten erotuksena jäljelle.
 - Saatavilla olevan kitkan tulisi olla aina niin suuri, että ajoneuvo on pysäytettävissä pysähtymisnäkemän suuruisella matkalla ja samalla pidettävissä kaistalla.
 - Kitkaympyrä. Kitkaympyrä tarkoittaa sitä, että kitkaa on käytettävissä suunnilleen sama määrä kaikkiin suuntiin. Jos kitkaa käytetään johonkin suuntaan, niin sitä on vähemmän käytettävissä muihin suuntiin. Ajosuunnassa luistavalla renkaalla ei ole enää sivuttaispitoa (jarrutus, kiihdytys). Kitkamarginaalista käytetään ensin ajosuunnassa tarvittava kitka ja sivusuuntaiselle kitkantarpeelle jää loput.

- Kaarteissa ajo. Ajoneuvoa ajetaan kaarteissa eri tavalla kuin suorilla. Kaarteeseen ajologiikka on yleensä sellainen, että kaarteeseen ajetaan hiukan jarruttaen ja siitä poistutaan hiukan kaasuttaen. Pituussuuntainen kitkantarve on siten suurin kaarteiden alku- ja loppukohdissa, suunnilleen klotoidin ja ympyränkaaren vaihtumiskohdassa.
- Kuormitusten dynaamisuus. Pyöräpainot ovat ajotilanteessa alituisesti muuttuvia, dynaamisia. Ajoneuvon liikkeet aiheuttavat painon siirtymistä sekä pituus- että sivusuunnassa mikä tekee renkaiden ja tien pinnan välisen kosketuksen syklisteksi. Akselikohtaiset erot pyörien kuormituksessa voivat olla suuria ja sitä on käytännössä hankala arvioida.
- Pyöräpainosiirtymä tarkoittaa kiihdytysten ja jarrutusten tai sivukallistusten aiheuttamaa pyöräpainon tilapäistä siirtymistä pyörältä tai akselilta toiselle. Painon siirtymä pyörältä toiselle vaikuttaa kokonaiskitkavoimaa heikentävästi, sillä asfaltin ja kumin välinen kitkakerroin heikkenee kuorman kasvaessa.
- Sivutuulen aiheuttama voima voi ulosmitata hyvänkin kitkamarginaalin.
- Raskaan ajoneuvon renkaiden lämpötila vaikuttaa kitkaan jäisellä tiellä heikentäen sitä. Jäisellä kelillä ajoneuvolla tulisi olla myös miniminopeus, jota vähintään tulee käyttää, jotta rengas ei luisuisi sivukaltevuuden takia sivusuunnassa.
- Akseliston vaikutus. Teliakselistojen kohdalla luistotilanne ei ole niin dramaattinen kuin yksittäisakseleilla. Vaikka pito häviää yhdeltä akselilta, niin toinen akseli jää vielä tuottamaan sivuvoimaa.



Kuva 5. Ajoneuvo tarvitsee kitkavoimaa joka suuntaan (A). Eriluonteisten kuljettajien tapa käyttää kitkaa erityyppisillä teillä (B-E). Suurilla nopeuksilla kitkapotentiaali tarvitaan enimmäkseen pituussuuntaiseen tarpeeseen (B), jolloin sivuttaistarkoituksiin jää vain vähän kitkaa. Mutkaisella ja mäkisellä tiellä kaikkien suuntien kitkaa tarvitaan runsaasti (C). Rauhallisessa ajossa (D) kitkamarginaalia on runsaasti joka suuntaan kun taas "sporttimaaisessa" ajossa (E) kitkantarve on suurempi kuin tarjolla oleva kitka ja tiellä pysymiseen tarvitaan ajolinjojen, jarrutusten ja kaasutusten tarkkaa hallintaa.

3.3 Ajoneuvodynamiikka

3.3.1 Raskaan ajoneuvon heilahtelun arvioiminen tien pinnan profiilista

Vuonna 2010 valmistuneessa diplomityössä [4] kehitettyä raskaan kaluston heilahtelun voimakkuutta arvioivaa menetelmää on verrattu kahteen aiemmin kehitettyyn menetelmään, jotka arvioivat heilahtelun voimakkuutta mitatun tienpinnan profiilin perusteella. Toisen vertailussa mukana olleen menetelmän (TRI, Truck Ride Index) ei todettu kuvaavan raskaan kaluston käyttäytymistä vaan lähinnä löytävän tien kaartet niiden kallistuksen perusteella. Ruotsissa kehitetyllä, urien kohdalta laskettavalla, sivukaltevuusvaihtelumetelmällä (RBCSV, Rut Bottom Cross Slope Variance, Granlund 2006) "vaaranpaikat" löytyivät samoin kuin nyt kehitetyllä menetelmälläkin. RBCSV:n ja uuden menetelmän suurin ero on, ettei RBCSV huomioi peräkkäisten kallistusten vaihteluiden aiheuttamaa lisävaikutusta.

Diplomityössä kehitettyä menetelmää ja muita menetelmiä verrattiin noin 30 tieosala. Vertailuun valittiin tieosia, joissa on palvelutasomittausten perusteella laskettavien nykyisten tunnuslukujen; sivuttaisheitto-riski (SH-riski) epätasaisuus (IRI) tai eri aallonpituusalueille suodatettu pintaprofiili (RMS₁, RMS₃, ja RMS₁₀), mukaan vaaranpaikkoja ja sellaisia tieosia, joissa uuden menetelmän mukaan vaaranpaikkoja ei

ole, mutta kokemusten perusteella saattaisi olla. Vertailun perusteella todettiin mm. seuraavia seikkoja:

- Siellä missä nykyisen sivuttaisheittoriski (SH-riski) tunnusluvun mukaan on vaaranpaikkoja, niitä on myös uuden menetelmän mukaan. SH-riskitarkastelulla ei kuitenkaan löydetä kaikkia uuden menetelmän tai muiden menetelmien mukaan löydettäviä vaaranpaikkoja. SH-riskin laskentatavasta johtuen on lisäksi epävarmaa, voidaanko sen perusteella sanoa, mitkä kohdat olisi syytä korjata ensiksi. SH-riskin tuloksena on kymmenen metrin laskentavälillä yksi (riski) tai nolla (ei riskiä) ja sadan metrin laskentavälillä 10 metrin tulosten summa. SH-riskin laskenta tukeutuu henkilöauton jousitusominaisuuksiin ja sitä sovelletaan 10 m väleille, vaikka se on määritelmänsä mukaan (IRI) noin 30–50 metrin aallonpituuksiin yltävä indeksi.
- Truck Ride Indeksi (TRI) reagoi voimakkaasti myös rauhallisiin sivukaltevuuden muuttumisiin, mitä tapahtuu kun siirrytään tien geometrian komponentilta toiselle. Se on ainakin sellaisenaan siten liian herkkä suomalaisiin olosuhteisiin.
- Dynaaminen stabiiliusindeksi (DSI) ja pyöräpainon siirtymä (LTR) edellyttävät monimutkaisen ajoneuvomallin käyttöä eikä niitä sen takia suositella käyttöönotettaviksi Suomessa. Toisaalta pyöräpainon siirtymä olisi siinä mielessä käyttökelpoinen, että se vaikuttaa kitkavoimaan, joka puolestaan on kiinteä osa kaarrekäyttäytymisen hallintaa.
- Uranpohjien kallistusindeksi (RBCSV) reagoi tien sivukaltevuusmuutoksiin, mutta ei huomioi ajoneuvon kallistusherkkyyttä eikä sivukaltevuusmuutosten toistuvuutta.
- Raskaan ajoneuvon vakavuusindeksi, KVAKA, perustuu tien profiiliin ja ajoneuvomalliin ja huomioi ajonopeuden. Siinä ajoneuvo asetetaan kulkemaan tielle ja tunnistetaan sen sivusuuntaista käyttäytymistä. Se on kuitenkin ajoneuvomallina yksinkertainen ja suhteellisen helposti tuotettava. Sitä testattiin diplomityössä vain rajallisesti, mutta sen uskotaan olevan potentiaalinen tunnusluku. Se täyttäisi sen aukon, joka sivukaltevuustunnuslukuun liittyvissä selvityksissä tyypillisesti on, eli ottaa huomioon ikääntyneillä teillä esiintyvän sivukaltevuuden vaihtelun liikkuvaan ajoneuvoon. Se ei kuitenkaan ota huomioon ajoneuvojen kaarrekäyttäytymistä.

Diplomityössä tehty vertailu oli sen verran suppea, että sitä tulisi täydentää laajemmalla aineistolla. Lisäksi olisi osoitettava, että menetelmän ilmoittamat vaaranpaikat aiheuttavat todellista vaaraa.

3.3.2 Kuormauksen vaikutus moduuliyhdistelmän ajostabiliteettiin

Liikenne- ja viestintäministeriön teettämässä selvityksessä ”*Kuormauksen vaikutus moduuliyhdistelmän ajostabiliteettiin*” tutkittiin vetoautosta, dollystä ja puoliperävau-nusta muodostuvan moduuliyhdistelmän sivuttaisdynamiikkaa sekä ajostabiilisuutta. Työn päätavoite oli tutkia erilaisten kuormaustapojen (4 kpl) vaikutuksia erilaisten perävauunjärjestelyjen sivuttaisdynamiikkaan [11]. Tämän työn kannalta merkittävimpiä tuloksia ovat seuraavat:

- Sivuttaisdynamiikkaan liittyvissä tarkasteluissa tutkittiin kiertiheilahtelun vaimennusta, sivuttaiskiikhtyvyyden arvoja ja sivusuuntaista painonsiirtymää.
- Ajoneuvoyhdistelmän stabiiliutta mitattiin kiertiheilahtelun vaimennusker-toimen ja sivuttaiskiikhtyvyyden RA-arvon avulla.

- Kiertoheilahtelun vaimennuskerroin (Yaw Damping Coefficient) kuvaa sitä, kuinka ajoneuvoyksiköt (vetoauto ja perävaunu) liikkuvat suhteessa toisiinsa, ja kuinka nopeasti syntynyt kiertoheilahtelu vaimenee. Vaimennusta laskeetaan nivelkulman vaihtelusta. *(Tämän vasteen laskeminen edellyttää monimutkaista simulointimallia eikä ole mahdollista tässä vaiheessa).*
- Sivuttaiskiihtyvyyden vahvistuskerroin (RA-arvo, Rearward Amplification) kuvaa sitä, kuinka paljon perävaunun liike vahvistuu vetoauton liikkeeseen verrattuna tietyn ohjausherätteen seurauksena. RA-arvo voidaan määrittää sivuttaiskiihtyvyyksien tai pystykiertymien kulmanopeuksien perusteella. Selvityksessä vahvistuskerroin sai eri kuormaustavoilla arvoja väliltä 2.5–5.4.
- Ajoneuvoyhdistelmän kallistumisstabiilisuutta mitataan sivuttaisen painon siirtymäkertoimen LTR (Load Transfer Ratio) avulla. Ajoneuvo on kaatumisrajalla LTR-arvolla 1. Simuloinnissa saadut LTR-arvot vaihtelivat välillä 0.27–1.00.
- Käytännön ajotilanteissa esiintyvällä ohjausherätteellä 0.2-0.4 Hz, *(jollainen voi esiintyä esim. väistettäessä tiellä olevaa sivuttaisheilahduskohtaa)*, on suhteellisen merkittävä vaikutus sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvoon varsinkin kuormaustilanteiden vaihdellessa.
- Ajoneuvoyhdistelmän hallittavuuden kannalta oleellista on ajoneuvon kallistumisstabiilius.

3.3.3 Raskaiden ajoneuvojen ajovakaus ja turvallisuus

Raskaiden ajoneuvojen ajovakaustarkasteluissa käytetään tiettyjä vakiintuneita käsitteitä, jotka liittyvät ajoneuvon käyttäytymiseen tiellä. Ajoneuvon käyttäytyminen on linkki tieolosuhteiden ja liikenneturvallisuustarkastelujen välillä ja sen takia siihen liittyviä käsitteitä kannattaa käyttää myös tienpidon tarkasteluissa. Lähteessä (Gerdes, 2002, [17]) on lueteltu niistä tärkeimmät, jotka ovat seuraavat:

- Aliohjauskerroin (Understeer Coefficient) kuvaa sitä miten aggressiivisesti ajoneuvo reagoi kuljettajan ohjausliikkeeseen kaarteessa.
- Pystykiertymän vaimennussuhde (Yaw Damping Ratio) kuvaa ohjausliikkeen perävaunuun aiheuttaman heilahtelun vaimennusta.
- Staattinen kierähdyskynnys (Static Rollover Threshold) kuvaa sitä sivukihtyvyyttä, jolla ajoneuvo kaatuu kaarteessa ajettaessa.
- Sivuttaiskiihtyvyyden vahvistuskerroin (RA-arvo, Rearward Amplification) kuvaa sitä, kuinka paljon perävaunun liike vahvistuu vetoauton liikkeeseen verrattuna tietyn ohjausherätteen seurauksena.
- Kitkantarve kuvaa sitä kitkaa, joka tarvitaan siihen, ettei yhdistelmäajoneuvo mene linkkuun (Jack-knifing).
- Sivuttainen painon siirtymä (Load Transfer Ratio) kuvaa sitä miten suuri osuus pyöräpainosta siirtyy puolelta toiselle.
- Jarrutustehokkuus kuvaa sitä, miten suuri osuus tien ja renkaan välisestä kitkasta voidaan käyttää pyörän lukkiintumatta.
- Jarrutusstabiilius kuvaa sitä, miten ajoneuvo käyttäytyy jarrutettaessa kaarteessa.

Selvityksessä tuotiin hyvin esille keskeisimmät raskaan ajoneuvon käyttäytymiseen liittyvät parametrit. Pyöräpainon siirtymän (LTR) hallinta on helpoimmin toteutettavissa, koska siihen riittää pystysuuntaisen ajodynamiikan ja sivuttaisheilahtelun yhteistarkastelu. Kaikki muut ovat tunnuslukuina sellaisia, jotka edellyttävät monimutkaisemman ajoneuvomallin käyttämistä. Liikenneturvallisuuteen liittyvien tarkastelu-

jen kannalta olisi hyödyllistä päästä tuottamaan tuloksia erityisesti pystykiertymän vaimennussuhteesta (YDR), sivuttaiskiihtyvyyden vahvistuskertoimesta (RA) sekä kitkantarpeesta yhdistelmäajoneuvon linkkuun menon estämiseksi (JK). Näiden huomioon ottaminen edellyttää kuitenkin tiegeometriian ja kuljettajan ohjausliikkeiden, tien ja renkaan välisen kontaktin dynamiikan sekä tien ja ajoneuvon välisen sivuttaisdynamiikan mallintamista. Vaikka tarvittava ajoneuvomalli olisikin melko monimutkainen, olisi erittäin hyödyllistä päästä tuottamaan tieverkolta juuri näitä tarkasteluja sovittaen ajoneuvomallit, teiden mitattu geometria ja kunto sekä keliolosuhteet yhteen.

4 Sivukaltevuuden hallinta

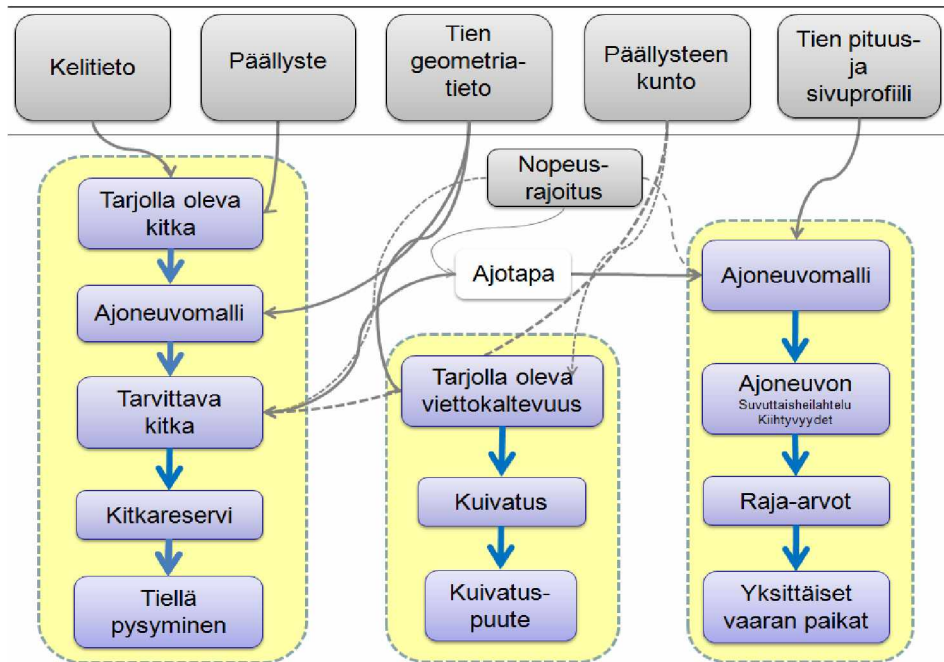
4.1 Sivukaltevuusongelmat

Sivukaltevuuden hallinta on melko monitahoinen ongelma ja siinä kannattaa lähteä liikkeelle vaihe vaiheelta. Tarkastelu suositellaan jaettavaksi aluksi kolmeen eri osaan. Kaksi tarkastelua liittyy ajoneuvon tiellä pysymiseen ja kolmas liittyy kuivatuksen. Ajoneuvon hallintaan liittyvät yksittäisten sivukaltevuusvaihteluiden ajovakausvaikutukset ja tiegeometrian aiheuttama kitkantarve paljastavat ajoneuvon hallintaan liittyviä vaaran paikkoja ja kolmas tarkastelu tunnistaa tien kuivatuspuutteet.

Ajoneuvon tiellä pysymisessä joudutaan käyttämään ajodynamiikan malleja ja yhdistämään tien sivu- ja pituusprofiilitieto ja geometriatieto mallien kautta yhteen. Sivukaltevuus ja kaarregeometria liittyvät kiinteästi yhteen. Työssä päähuomio kiinnittyy sivukaltevuuden tasalaatuisuuden tutkimiseen ja vaaran paikkojen määrittämiseen ajoneuvomallin avulla. Lisäksi työssä esitetään laskentaperiaatteet kaarteiden sivukaltevuuspuutteiden ja kuivatuspuutteiden määrittämiseen, mutta ei lasketa eikä testata niitä. Kaksi edellä mainittua osaa jätetään myöhempisiin vaiheisiin. Esitetty laskentatapa sivukaltevuuspuutteiden määrittämiseen on staattinen eikä sisällä ajoneuvodynamiikkaa. Ainoastaan yksittäisten sivukaltevuusheilahtelujen tarkastelu sisältää sen.

Tarkastelut suositellaan toteutettavan siis seuraavasti:

- Yksittäisten vaaran paikkojen määrittäminen sivukaltevuustiedosta ajoneuvomallin avulla.
- Ajoneuvon tiellä pysymiseen ja kitkareserviin liittyvän tarkastelun tekeminen staattisena ilman ajoneuvodynamiikkaa.
- Tien kuivatuspuutteiden määrittäminen sivukaltevuuden ja tien geometrian perusteella.



Kuva 6. Sivukaltevuuden hallinta edellyttää kolmen eri tarkastelun tekemistä. Nämä ovat kaarteissa tarvittava sivukaltevuus, kuivatuksen tarvitsema kaltevuus ja ajovakauden kannalta tarvittava sivukaltevuuden tasalautisuus.

4.2 Tarjolla oleva kitka

4.2.1 Tienpidon tarjoama kitka

Ajoneuvon renkaan ja päällysteen välinen kitka vaihtelee keleistä riippuen välillä 0.05–1.3. Paras kitka saavutetaan kuivilla kesäkeleillä ja huonoin liukkailla talvikeleillä. Tietyissä tilanteissa kitka voi olla jopa yli yhden, johtuen mm. renkaan ja tien pinnan välisestä lämpötilasta ja aerodynaamisista voimista. Kesäkeleillä kitka on yleensä niin suuri (0.6–1.3), ettei se rajoita tiellä pysymistä. Märällä asfaltilla kitka on välillä 0.4–0.9 ja lumella 0.1–0.6. Jäisellä asfaltilla kitka on välillä 0.05–0.5. Kitka on huonoimmillaan lähellä nollan lämpötilaa olevalla jäällä, jolloin sen suuruus on noin 0.1 [10].

Talvihoidon laatuvaatimuksissa kitkalle on asetettu vähimmäisvaatimukset, jotka määräävät sen, missä vaiheessa hoitourakoitsijat lähtevät tekemään liukkaudentorjuntatoimia. Taulukossa 1 on esitetty kitkan ja kelien vastaavuuksia. Sen mukaan tyydyttävä talvikeli on sellainen, missä kitka on vähintään 0.20–0.24. Liukkaudentorjunnan laatuvaatimuksissa pienin sallittu kitka-arvo vaihtelee hoitoluokittain välillä 0.25–0.30. Kitkaltaan alle 0.20 oleva tien pinta on liukas.

Taulukko 1. Kitka-arvoja eri keleillä. (Talvihoidon toimintalinjat, 2008)

Kitka-arvo	0,00 - 0,14	0,15 - 0,19	0,20 - 0,24	0,25 - 0,29	0,30 - 0,44	0,45 - 1,00
Tienpinnan kuvaus	pääkallokeli, märkä jää, erittäin liukas	jäinen, liukas	sileä polanne, tydyttävä talvikeli	pitävä jää- ja lumipolanne, hyvä talvikeli	paljas ja märkä, pitävä keli	paljas ja kuiva, pitävä keli

Taulukko 2. Liukkaudentorjunnan laatuvaatimukset (Talvihoidon toimintalinjat, 2008).

Talvihoitoluokka	Is	I	Ib ja TIb	II	III	K1	K2
Kitkavaatimus	0,30	0,28	0,25	Karhennettu pinta, ongelma-kohteet piste-hiekoitetaan	Karhennettu pinta, ongelma-kohteet piste-hiekoitetaan	Liikenteen tarpeen mukaan	Liikenteen tarpeen mukaan
Huomioon otettavaa	Tienpinta alle -6°C 0,25	Tienpinta alle -4°C 0,25	Piste-hiekoitus 0,25, linjäsittely 0,22			klo 22 jälkeen, klo 06 mennessä	klo 22 jälkeen, klo 07 mennessä
Toimenpideaika alittumisesta	2h, viik-kailla 0 h	2h	suola 3h hieka 4h	Jää-polanteen linjahiekoitus 6h	Jää-polanteen linjahiekoitus 8h	2h	3h

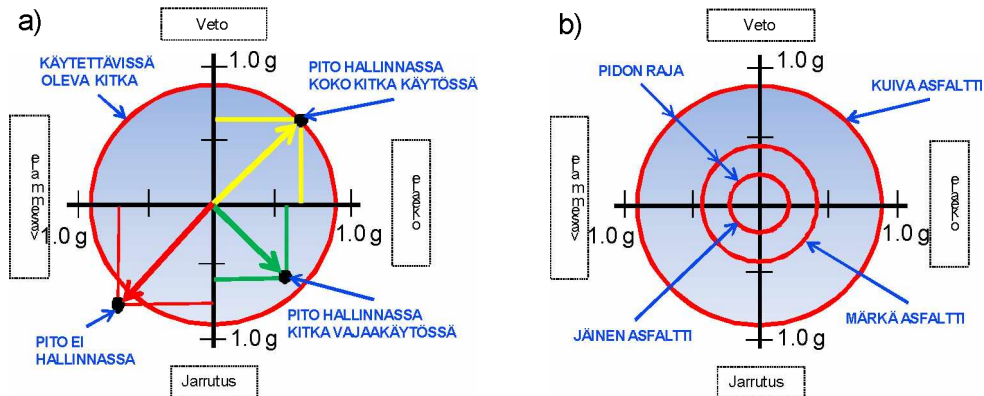
Ajoneuvodynamiikan soveltaminen tien geometrisiin olosuhteisiin on pitkälti kitkan riittävyyden tarkastelua. Kitkan riittävyyden tarkastelussa onkin keskeistä valita, missä olosuhteissa tarkastelu halutaan tehdä. Tässä työssä tarkastellaan talviolosuhteissa vallitsevaa kitkaa siten, että sovitetaan tarjolla oleva kitka tienpidon talvihoidon laatuvaatimuksissa määritettyihin minimikitka-arvoihin, joita väylävirasto edellyttää hoitourakoitsijoiltaan.

Yhteenvedona voidaan todeta, että talvihoidon laatuvaatimuksissa tarjotaan kitkaa, joka on noin 0.25-0.30 ja sitä voidaan pitää sivukaltevuuspuutteiden laskennassa tarjolla olevana kitkana, jolla ajoneuvojen on selvitettävä mäistä ja kaarteista. Valittavana lähtötietona onkin päättää, käytetäänkö kaikille teille samaa kitka-arvoa vai toimintalinjoissa määritettyä hoitoluokittaista kitka-arvoa.

4.2.2 Kitkaympyrä

Kitkaympyrä on yleinen tapa kuvata ajoneuvon ja tien pinnan välistä kitkaa. Teoreettisemmissä tarkasteluissa käytetään myös kitkaellipsiä. Kitkaympyrä kuvaa ajoneuvon pyörän ja tien pinnan välistä kitkaa ja sen avulla kuvataan kitkan käyttöä. Periaatteessa kitkaa on käytettävissä tietty määrä suunnasta riippumatta. Käytettävissä olevaa kitkaa kuvaa koordinaatiston origosta kehälle ulottuva vektori. Jos kitkaa käytetään tietty määrä pituussuunnassa joko kiihdytykseen, vetoon tai jarrutukseen, niin siitä jää sivusuuntaiseen tarpeeseen määrä, joka lasketaan Pythagoran kaavalla ko-

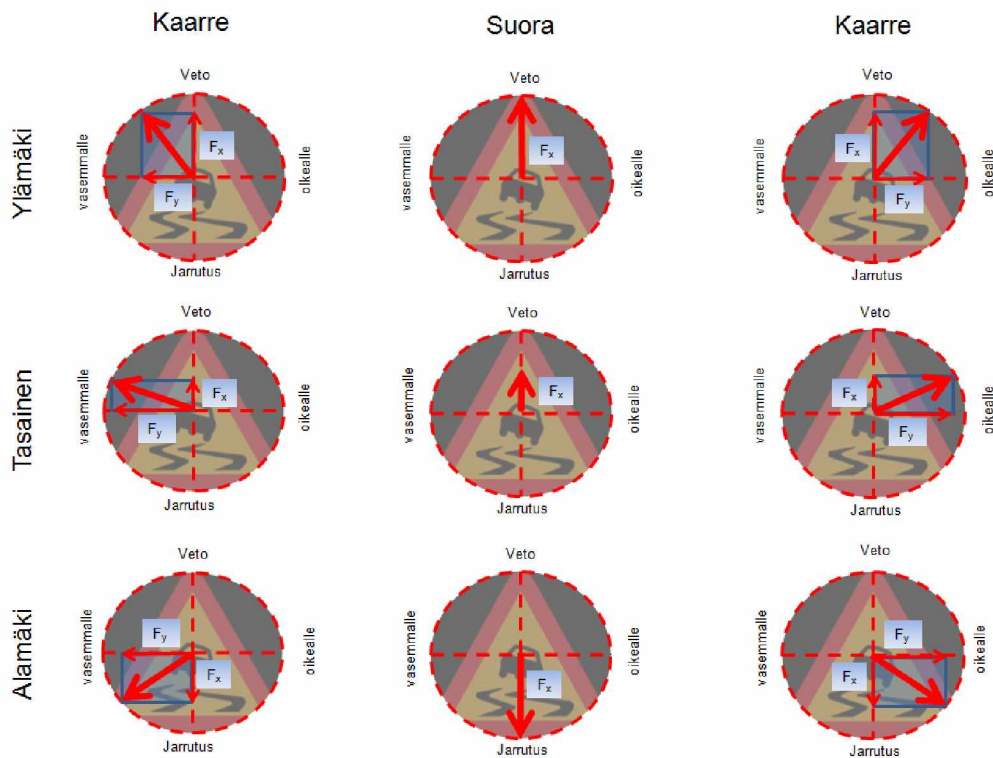
konaiskitkasta. Kun sivuttais- ja pituussuuntaisten kitkantarpeiden mukainen piste on kitkaympyrän sisällä, niin ajoneuvon pito on hallinnassa, ja vastaavasti kitkaympyrän ulkopuolella se ei ole hallinnassa (Kuva 7a). Tien pinnalla vallitseva keli vaikuttaa tarjolla olevan kitkan suuruuteen. Kuiva asfaltti tarjoaa parhaan kitkan ja vesi, jää ja lumi heikentävät sitä. Jäisellä pinnalla kitka on alhaisin. Sivukaltevuuden riittävyteen liittyvissä tarkasteluissa on lähdettävä alhaisimmasta tarjolla olevasta kitkasta eli jäisen asfaltin tarjoamasta kitkasta (Kuva 7b) kuitenkin siten, että otetaan huomioon talvihoidon laatuvaatimukset.



Kuva 7. Kitkaa käytetään vetoon, jarruttamiseen ja sivuttaispitoon. Pito on hallinnassa kitkaympyrän sisällä. Kitkaympyrän ulkopuolella pito ei ole hallinnassa (a). Kitkaympyrä vaihtelee keleittäin (b). Talvihoidon toimilla suurennetaan kitkaympyrää [16].

Kuvassa 8 on esitetty tien vaaka- ja pystygeometrian aiheuttamat kitkan käyttötilanteet. Kitkaa on tarpeeseen nähden parhaiten käytettävissä suorilla tai tasaisilla tieosuuksilla, kun taas ylä- ja alamäissä sijaitsevissa kaarteissa sitä tarvitaan sekä pituus- että sivusuunnassa ja reservi on siten vähäisin. Koska kitkaympyrästä käytetään kitkaa ensisijaisesti pituussuunnan tarpeisiin, jää sivusuunnassa tarvittavalle pidolle se mitä jää. Kriittisimmät tilanteet ovat kitkan käyttötilanteiden nurkissa.

Sivukaltevuustarkasteluissa pitoon tarjolla olevaa kitkaa ovat alla olevan kuvan vaakasuunnan kitkavoimat, jotka ovat siis pienemmät kuin kelin tarjoama kokonaiskitka. Tarjolla olevan sivukitkan määrittämisessä on ensin määritettävä pituussuunnassa tarvittava kitka, jotta sivuttaissuunnassa käytettävissä oleva kitka saadaan selville.



Kuva 8. Tien vaaka- ja pystygeometrian aiheuttamat kitkaympyrän käyttötilanteet. Kitkaympyrästä otetaan kitkaa ensisijaisesti pituussuuntaisia tarpeita varten. Sivusuuntaisiin tarpeisiin jää vähiten kitkaa käyttötilanteiden nurkissa eli ylä- ja alamäissä sijaitsevilla kaarteilla.

4.3 Kitkan tarve kaarteissa

4.3.1 Ajodynamiikka

Liikkuvan ajoneuvon tila on jatkuvassa muutoksessa hetkittäisestä tasapainotilasta toiseen, missä ajoneuvon liikesuunta, nopeus ja kiihtyvyys muuttuvat. Ajodynamiikkatarkastelut jaetaan yleensä kolmeen eri osaan, joita ovat ajoneuvon pitkittäinen, sivuttainen ja pystysuuntainen dynamiikka. Pystysuuntainen dynamiikka liittyy yleensä ajoneuvolla ajamisen mukavuuteen. Pitkittäisdynamiikka liitetään enemmän suorituskykyyn ja sivusuuntainen dynamiikka ajoneuvon käsiteltävyyteen ja turvallisuuteen. Kitkan tarve liittyy sekä pituus- että sivusuuntaiseen ajodynamiikkaan, mutta sen muodostuminen riippuu pystysuuntaisesta ajodynamiikasta, mistä johtuukin, että ajodynamiikan tarkasteluissa joudutaan käyttämään kaikkia kolmea eri ajodynamiikan aluetta [10].

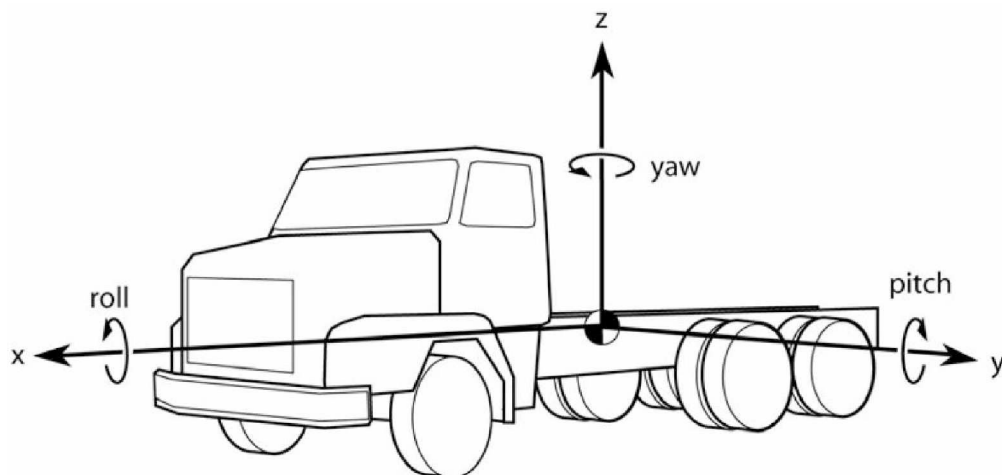
Ajoneuvon pyörien ja tien pinnan välillä tarvitaan kitkaa liikkeelle lähtemistä, liikkeessä pysymistä, ohjausliikkeitä ja jarruttamista varten. Ajoneuvon liikettä vastustavia voimia ovat mäki vastus, vierintä vastus ja ilman vastus. Mäki vastus on ylämäessä positiivinen liikettä vastustava, koska massaa on nostettava korkeussuunnassa ja alamäessä negatiivinen liikettä edistävä. Vierintä vastus, ilman vastus ja mäki vastuksen ylämäkeen liittyvät komponentit on hallittava ajoneuvon vetävien pyörien kitkavoiman kautta. Ennen sivukaltevuuden kitkantarvelaskelmaa on määritettävä, minkä verran kitkaa tarvitaan tien pituuskaltevuuden takia, koska ajoneuvo käyttää kitkaa

ensisijaisesti pituussuunnassa ja vasta toissijaisesti sivusuunnassa. Sivukaltevuuden ja kitkan välisen vuorovaikutuksen hallinta johtaa siten melko syvälle ajoneuvodynaamiikkaan ja sen sovittamiseen vallitseviin tieolosuhteisiin.

Ajodynamiikan tarkastelut ja laskennat tehdään yleensä oikeakätisessä koordinaatistossa, jonka origo on ajoneuvon painopisteessä. x -suunta osoittaa ajoneuvon ajosuunnan, y -suunta osoittaa ajosuuntaan nähden oikealle olevan sivusuunnan ja z -suunta osoittaa painovoiman suunnan (tosin usein z -suunta on kuitenkin käännetty osoittamaan ylöspäin, niin kuin tässäkin selvityksessä, jolloin y -suunta osoittaa kulkuosuunnassa vasemmalle). Ajoneuvon eri suuntiin kohdistuvista liikenopeuksista käytetään joko symboleja u , v ja w tai alaindeksein eroteltuja symboleja v_x , v_y ja v_z . Ajoneuvon korin kulmaliikettä x -akselin ympäri kutsutaan kallistumiseksi, josta käytetään symbolia φ (fi). Kulmaliikettä y -akselin ympäri kutsutaan nyökkimiseksi (pitch) ja siitä käytetään symbolia Θ (theta). Kulmaliikettä z -akselin ympäri kutsutaan pystykiertymäksi (yaw) ja sitä kuvataan symbolilla ψ (ypsilon). Kaikkiin kuuteen liikesuuntaan liittyy kolme eri liiketilaa, jotka ovat sijainti/määrä, muuttumisnopeus ja muuttumiskiihtyvyys. Ajoneuvolla on siten 6×3 eli 18 eri liiketilaa. Yhdistelmäajoneuvoissa liiketilojen lukumäärä luonnollisesti kasvaa.

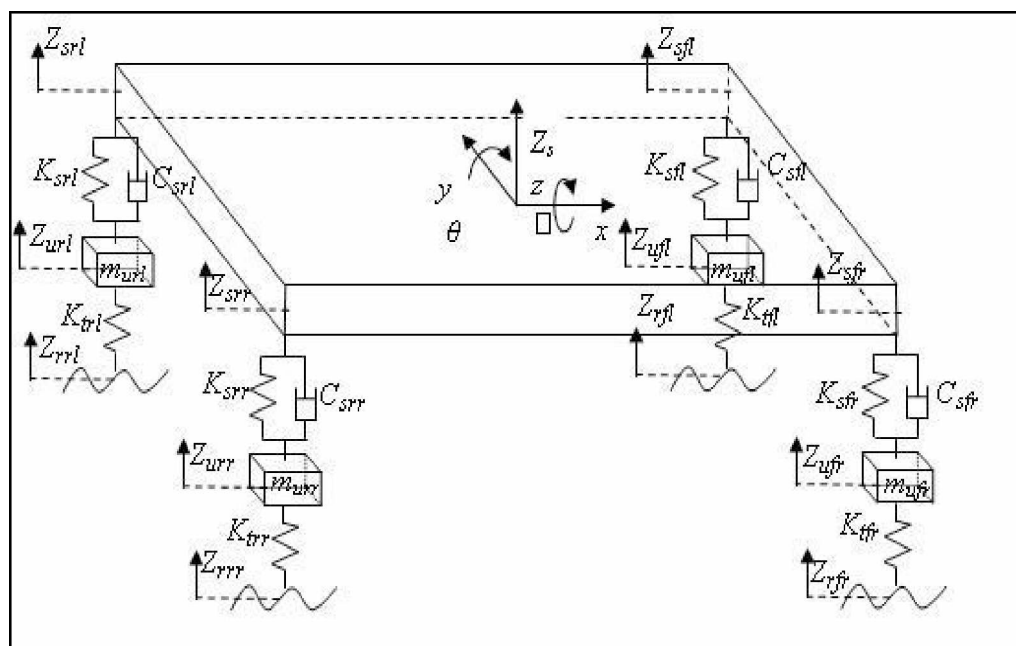
Koska ajodynamiikan laskentakaavoissa käytetään yllä mainittuja symboleja ja ajoneuvojen liikkeitä kuvataan niillä, ne kannattaa vakiinnuttaa myös tietekniikan tarkasteluissa. Tien ajodynamiikkaan liittyvät tunnusluvut tulisi pyrkiä valitsemaan vakiintuneiden liikesymbolien joukosta. Valittavat tunnusluvut tulisi suhteuttaa joko ajettua pituusyksikköä (m) tai ajettua aikayksikköä (s) kohti. Korin liiketilojen tunnistamisen yhteydessä joudutaan hallitsemaan myös akseleiden liikkeitä. Joissakin tilanteissa voi olla hyödyllistä tarkastella akseleiden (pyörien) liiketilajoja.

Edellä mainittujen lisäksi ajodynamiikan tarkasteluissa on hallittava renkaiden käyttäytyminen. Kunkin pyörän kosketuspinnassa on siten oma koordinaatistonsa ja omat liiketilansa. Pitemmälle menevissä ajodynamiikan tarkasteluissa käytetään joskus kuljettaja/matkustajamallia, jossa ihminen on mallinnettu istumaan istuimelle ja simuloinnissa tarkastellaan ihmisen (pää, kädet, selkä) liiketilajoja.



Kuva 9. Ajoneuvon koordinaatisto (kuvassa pystyakseli käännetty ylöspäin, mutta koordinaatiston oikeakätisyys säilyy silti).

Pystysuunnan epätasaisuus vaikuttaa eniten z-suunnan liikkeisiin. Epätasaisuuden vaihtelu pituus suunnassa vaikuttaa kiertymiin y-akselin ympäri. Kaarteet ja sivuttaispito vaikuttavat eniten y-suunnan liikkeisiin ja z-suunnan kiertymiin. Sivukaltevuusvaihtelut vaikuttavat eniten x-suunnan kiertymiin. Edellä esitettyjä vasteita saadaan laskettua ajodynamiikkamalleilla simuloimalla. Ajodynamiikan hallinta tienpidon tarkasteluissa on melko monimutkainen ja haastava tehtävä, jossa on lähdettävä liikkeelle yksinkertaistaen. Perinteinen IRI-malli huomioi kuuden liikeden sijaan vain yhden dimension, neljänhenkilöauton korin z-suunnan liikkeitä. Sivuttaisliikkeiden hallintaan tarvitaan kehittyneempiä malleja. Seitsemän vapausasteen täysajoneuvomalli tuottaa yllämainitut vasteet, mutta usein käytetään myös puolijoneuvomalleja jakamalla ajoneuvo kahtia joko pituus- tai poikkisuunnassa. Ilman ohjauksen ja renkaan ja tienpinnan välisen kontaktin mallintamista nekin ovat yksinkertaistuksia.



Kuva 10. Nelipyöräisen ajoneuvon 7 vapausasteen täysmalli, jolla on mahdollista saada tuotettua sekä pyörien että korin asemat, pystynopeudet ja kiihtyvyydet sekä korin kiertymäliikkeet [20].

4.3.2 Pystysuuntainen ajodynamiikka

4.3.2.1 Pystyvoimat

Ajoneuvon normaalivoima on painon perusteella $G=mg$. Normaalivoima jakaantuu akselleille (R =taka ja F =etu) painopisteen paikan perusteella seuraavasti:

$$N_R=L_1/Lmg \quad (1)$$

$$N_F=L_2/Lmg \quad (2)$$

Ajoneuvot ovat painonsa suhteen sivusuunnassa yleensä symmetrisiä. Paino jakaantuu siten oikean (R) ja vasemman (L) puolen suhteen tasaisesti.

$$N_{RL} = N_R/2 \quad (3)$$

$$N_{RR} = N_R/2 \quad (4)$$

$$N_{FL} = N_F/2 \quad (5)$$

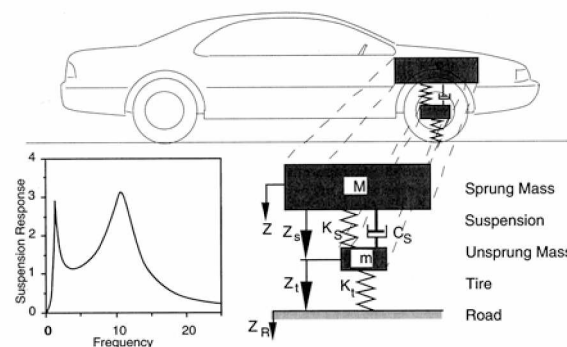
$$N_{FR} = N_F/2 \quad (6)$$

Raskaissa ajoneuvoissa on erilaisia rengastus- ja akselistoratkaisuja, jotka vaikuttavat painonjakautumiseen. Paripyörä rengastuksille ja teliakselistoille sallitaan enemmän painoa. Tässä työssä pitäydytään kahden akselin tarkasteluissa.

Sivukaltevuus vaikuttaa painon jakaantumiseen hiukan. Painoa siirtyy sille puolelle, joka on alempana. Suorilla osuuksilla tien sivukaltevuus on yleensä oikealle viettävä eli ajoneuvot kallistuvat vastaavasti oikealle. Ajotilanteissa pyöräpainot vaihtelevat erittäin paljon sekä sivu- että pituussuunnassa. Pystyvoimien hallinta on dynaamisissa tilanteissa huomattavasti monimutkaisempaa. Normaalivoimat vaihtelevat tien pysty- ja vaakageometriasta riippuen ja niistä saatavat kitkavoimat vaihtelevat vastaavasti.

4.3.2.2 IRI-malli

Pystysuuntaisen dynamiikan käytetyin sovellus on perinteinen IRI-malli, missä ajoneuvon neljännes saa tien pinnan profiilin (z_R) herätteenä ja vasteena saadaan korin (M) pystyliikkeitä ja nopeuksia (mm. $z-z_R$). Vasteet lasketaan käyttäen vakionopeutta 80 km/h. IRI-mallissa ei oteta kantaa akseleiden erilaisuuteen eikä painojakaumia akseleiden suhteen huomioida.



Kuva 11. IRI-mallin laskennan periaate. Tien pinta annetaan syötteenä neljännes-automallille, joka suodattaa pintaprofiilin muutokset mallille ominaisella suodatuksella korille. Tunnusluku kuvaa korin pystysuuntaista liikettä kuljettua pituusyksikköä kohti [18].

IRI:n laskennassa keskeisimmät periaatteet ovat seuraavat [18]:

- IRI lasketaan yhdestä ajourasta
- Profiili suodatetaan 250 mm pitkän liukuvan keskiarvon avulla, ellei mittaus-tiheys ole muuten pienempi kuin 167 mm.
- Profiili suodatetaan neljännesautomallin suodattimen läpi käyttäen 80 km/h nopeutta.
- Neljännesautomallin massa-, jousivakio- ja iskunvaimennusparametrit on määritetty tietyiksi.
- IRI:n yksikkö on kuljettua pituusmatkaa kohti kertyneiden pystyliikkeiden summa (mm/m tai m/km).
- IRI:n laskentakoodi on yleisesti saatavana osoitteesta <http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/rr.html>.

4.3.2.3 Nelipyörämalli

Nelipyörämallissa vastaavat pystyliikkeet hallitaan sekä korin painopisteessä että kunkin pyörän kohdalla. Nelipyörämallissa herätteenä ovat molempien ajourien pituussuuntainen informaatio. Sekä pituussuuntaiset akseleille tulevat vaihtelut että poikkisuuntaiset profiilivaihtelut tulevat syötteenä ja vasteet riippuvat ajoneuvotyypistä. Eri ajoneuvotyypit käyttäytyvät samalla tieprofiililla eri tavalla, koska ajoneuvoparametrit ja akseli- ja raidevälit vaihtelevat.

Tien pinnasta syötteenä annettava informaatio on nelipyörämallissa monipuolisempaa kuin IRI-mallissa. Ajoneuvo kokee tien pystysuuntaisten vaihtelujen lisäksi sivuttaiset vaihtelut raidevälin määräämällä tavalla ja pituussuuntaiset vaihtelut akselivälin määräämällä tavalla. Kokoajoneuvossa tarkastellaan yleensä korin painopisteen liikkeitä, ja sen avulla mahdollistuu myös kuljettajaan tai lastiin kohdistuvien liikkeiden tarkastelu.

4.3.3 Pituussuuntainen ajodynamiikka

4.3.3.1 Mäktivastus

Ajoneuvon ylläpitämiseen tarvitaan vetovoimaa ja sen välittäminen pyörästä tien tapahtuu kitkan avulla. Ylämäissä vetovoimaa tarvitaan enemmän jolloin kitkaakin tarvitaan enemmän. Alamäissä taas saatetaan tarvita jarrutusvoimaa joko nopeuden pitämiseen ennallaan tai tarvittaessa jopa pysähtymiseen. Pituussuuntainen kitkan-tarve on tiedettävä, jotta voidaan arvioida sivuttaisvoimille jäävä kitkareservi. Kitkan-tarvelaskelma riippuu ajoneuvon vetävien pyörien lukumäärästä.

Kun ajoneuvon paino on mg , niin mäktivastus saadaan laskettua pituuskaltevuuden, $\beta = \arctan(\text{pituuskaltevuus}/100)$, avulla $F = mg \sin(\beta)$. Mäktivastus jakaantuu kaikille akseleille niiden akselien ja painopisteen etäisyyksien (L_1/L_2) perusteella.

Taka-akselille tulevan mäktivastusvoima lasketaan kaavalla:

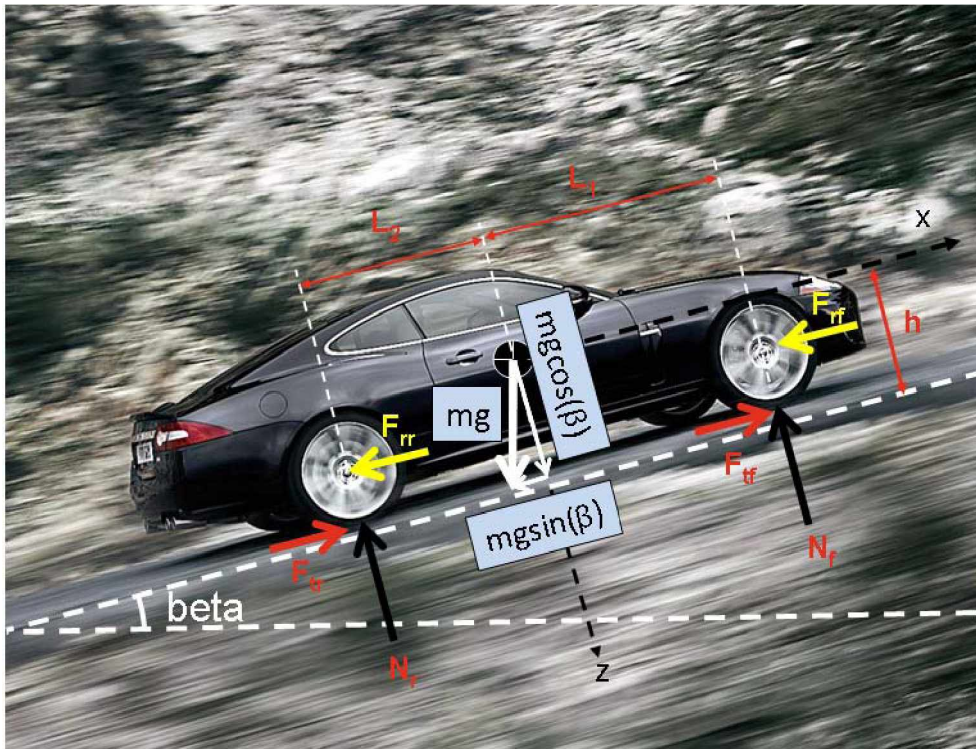
$$F_R = \frac{L_1}{L} mg \sin(\beta) \quad (3)$$

ja etuakselille tulevan mäktivastusvoima lasketaan kaavalla:

$$F_F = \frac{L_2}{L} mg \sin(\beta) \quad (4)$$

Kun on kyseessä alamäki, niin voiman etumerkki muuttuu pituuskaltevuuden etumerkin mukaan ja kuvaa siten jarrutusvoiman tarvetta. Jarrutusvoimalla tarkoitetaan tässä yhteydessä nopeuden ennallaan pitämiseen tarvittavaa jarrutusta. Kaavoilla ei oteta huomioon akselipainon siirtymiä. Ylämäessä painoa siirtyy taka-akselille ja alamäessä etuakselille.

Pituuskaltevuus vaikuttaa käytettävissä olevan kitkavoiman suuruuteen, koska se pienentää pyörän ja tien pinnan välistä normaalivoimaa termillä $\cos(\beta)$ verran. Tasaisella tiellä $\cos(\beta)=1$ ja normaalivoima on maksimissaan (staattisessa tilanteessa). Pituuskaltevalla tiellä ko. termi on alle yhden.



Kuva 12. Henkilöauton liikettä ylläpitävät voimat ja liikettä vastustavat tievoimat sekä voimatasapainon laskemiseen tarvittavia mittoja. Vetävät voimat punaisella, vierintävastusvoimat keltaisella ja mäktivastusvoima valkoisella nuolella.

Mäktivastuksen voittamiseen tarvittava vetovoima muodostetaan ajoneuvon vetävien pyörien ja tien pinnan välisen kitkan avulla. Ajoneuvoilla tulee pystyä ohittamaan hitaampia ajoneuvoja ja toisaalta ne tulee pystyä pysäyttämään myös alamäessä. Ohittamisen kaistanvaihtotilanteet ja kiihdytys- ja jarrutustilanteet edellyttävät täydellisempien ajoneuvomallien käyttöä.

4.3.3.2 Vierintävastus

Vierintävastus on vastus, joka vaikuttaa ajosuuntaa vastaan jatkuvasti. Vierintävastusta käsitellään joko vierintävastusvoimana tai vierintävastuskertoimena, joka on vierintävastusvoima jaettuna ajoneuvon painolla. Vierintävastus vaikuttaa aina kun ajoneuvo on liikkeessä. Vierintävastus on yleensä vakio.

Vierintävastukseen liittyy useita eri mekanismeja, joista tunnetuimmat ovat seuraavat [6]:

- renkaan sivujen muodonmuutoksista aiheutuva energiahäviö
- renkaan pinnan kuvioiden muodonmuutoksista aiheutuva energiahäviö
- raapaisuvoima kontaktipinnassa
- renkaan luistaminen päällysteeseen nähden
- tien pinnan taipuma
- renkaan ilmanvastus
- epätasaisuuksien aiheuttama energiahäviö

Vierintävastukseen vaikuttavat mm. seuraavat asiat [6]:

- tien pinnan epätasaisuus ja karkeus
- nopeus
- renkaan rakenne ja materiaali
- renkaan kuluneisuus
- renkaan lämpötila ja paine
- renkaan koko
- renkaan sivuluisukulma
- renkaan camber-kulma
- kiihdytys- tai jarrutusvoimat

Tieverkkotarkasteluissa vierintävastus on käytännössä vakio. Koska eri ajoneuvotyypeissä käytetään erikokoisia ja -tyyppisiä renkaita, henkilöautoille ja raskaille autoille käytetään eri vierintävastuskerrointa. Henkilöautoille ja raskaille ajoneuvoille valitaan tietty edustava ajoneuvo, jonka parametreilla laskenta tehdään. Epätasaisuuden ja pintakarkeuden vaikutus on mahdollista ottaa huomioon, mutta sitä ei suositella tehtäväksi vielä tässä vaiheessa. Näiden mukaan ottaminen laskelmiin riippuu siitä, miten ne vaikuttavat kitkaltaan kriittisissä olosuhteissa eli talvella.

Henkilöauton taka-akselille tuleva vierintävastusvoima lasketaan kaavalla:

$$F_{rr} = f_r \frac{L_1}{L} mg \cos(\beta) \quad (5)$$

Henkilöauton etuakselille tuleva vierintävastusvoima lasketaan kaavalla:

$$F_{rf} = f_r \frac{L_2}{L} mg \cos(\beta) \quad (6)$$

missä f_r =vierintävastuskerroin, joka voi olla myös nopeudesta riippuvainen $f_r(v)$:

$$f_r(v) = 0.005 + 1/p (0.01 + 0.0095(v/100)^2) \quad (7)$$

missä

p = rengaspaine (bar), v = nopeus (km/h)

Raskaalle ajoneuvolle vierintävastus lasketaan samalla tavalla ja yhdistelmäajoneuvoille ne lasketaan yhdistelmän osittain.

Vierintävastuksen voittamiseen tarvittava vetovoima muodostetaan ajoneuvon vetävien pyörien ja tien pinnan välisen kitkan avulla. Vetävien pyörien kautta on voitettava kaikkien muidenkin pyörien kautta aiheutuvat vierintävastusvoimat.

Taulukko 3. Ajoneuvojen tyypillisiä vierintävastuskertoimia (%) [5,7].

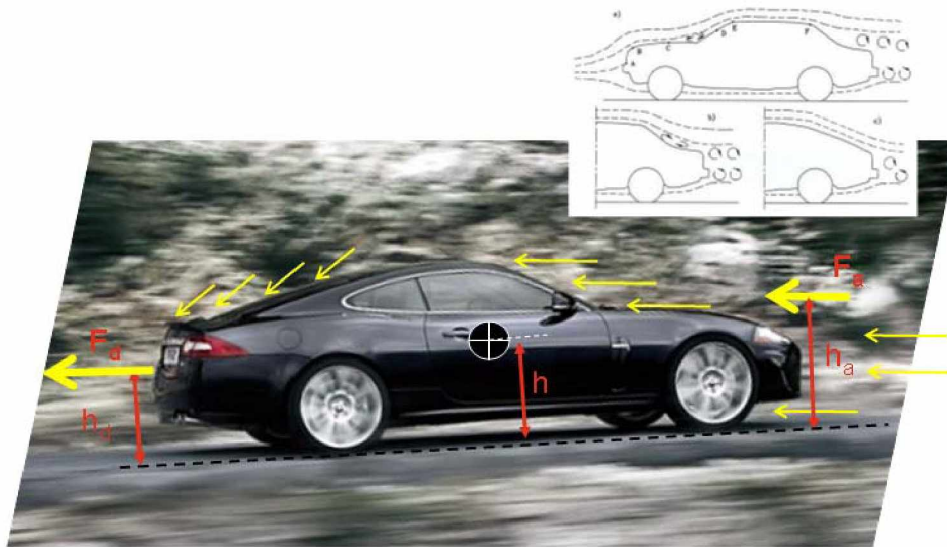
	Henkilöauto	Kuorma-auto tai linja-auto	Yhdistelmäajoneuvo
Pintaamaton maa	8-16		
Kivipäällyste - hyvä - huono	3.3-5.5 8.5		
Sorapäällyste			
PAB-päällyste		0.6-1.0	
AB-päällyste	1.3-1.6		
Betonipäällyste	1-1.5		
Lumi 50 mm	2.5		
Lumi 100 mm	3.7		

4.3.3.3 Ilmanvastus

Ajoneuvon ilmanvastus riippuu ajoneuvon muodosta, otsapinta-alasta ja ajonopeudesta. Lisäksi tuuli vaikuttaa siihen riippuen siitä, mistä suunnasta se tulee. Tuulen suunta voi vaihdella ja olla ihan mistä suunnasta tahansa, joten sen vaikutusta on hankala ottaa huomioon. Mikäli se halutaan ottaa huomioon, niin tulisi valita laskentatilanteen kannalta epäedullisin suunta. Tässä vaiheessa ei kuitenkaan suositella sen huomioon ottamista. Verkkotason tarkasteluissa ilmanvastus voidaan laskea tyyppiajoneuvoille seuraavalla kaavalla:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 \quad (8)$$

missä ρ =ilman tiheys [kg/m³]
 C_D =ajoneuvon ilmanvastuskerroin
 A =ajoneuvon otsapinta-ala [m²]
 v =ajoneuvon nopeus suhteessa ilmaan [m/s]



$$\text{Ilmanvastus} = (1/2) \rho C_d A_f v^2$$

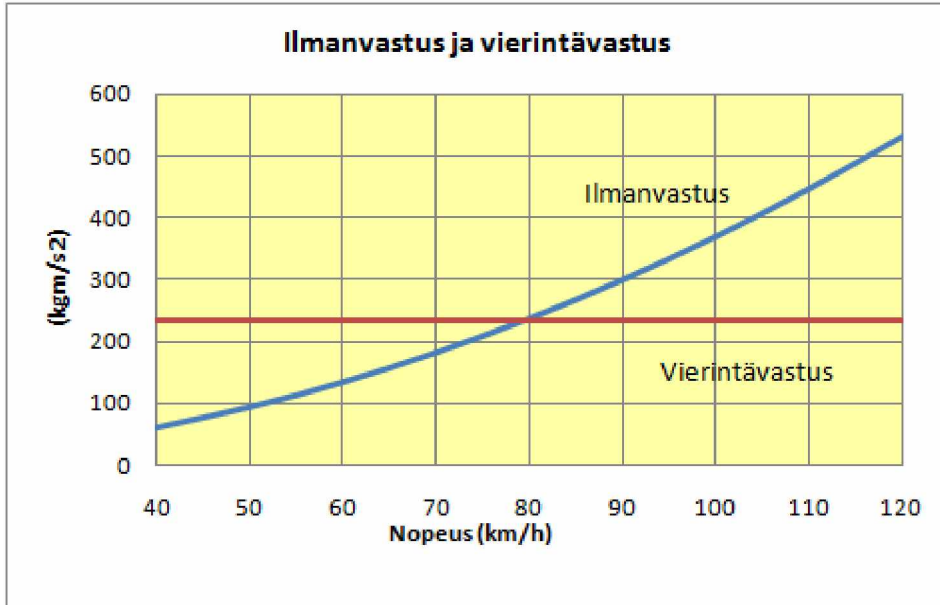
Kuva 13. Ajoneuvoon vaikuttava ilman vastus.

Henkilöautojen ilmanvastuskertoimet vaihtelevat välillä 0.29–0.48 ja otsapinta-alat välillä 1.70–2.07 m² (Taulukko 4). Henkilöautojen ilmanvastuskertoimen ja otsapinta-alan tulo vaihtelee siten välillä 0.60–0.90. Kuorma-autojen vastaavat luvut vaihtelevat välillä 0.8–1.2 ja 7.0–10.0. Laskelmissa valitaan edustava henkilöauto ja edustava raskas ajoneuvo, joille valitaan ilmanvastuskertoimet (tai pikemminkin ilmanvastuskertoimen ja otsapinta-alan tulot).

Taulukko 4. Eräiden eurooppalaisten henkilöautojen ilmanvastuskertoimia [5].

	$C_x S$	C_x	S [m ²]		$C_x S$	C_x	S [m ²]
Lancia Y10	0.57	0.33	1.76	Opel Corsa SR	0.61	0.35	1.73
Fiat Uno	0.62	0.34	1.83	VW Polo	0.65	0.38	1.70
Renault 5	0.67	0.37	1.80	Austin Metro	0.67	0.39	1.73
Peugeot 205	0.68	0.39	1.74	Fiat Panda	0.70	0.41	1.70
Citroen Visa	0.70	0.40	1.75	Ford Fiesta	0.73	0.41	1.76
Renault 4	0.90	0.49	1.83				
Opel Kadett GSi	0.60	0.32	1.88	Peugeot 309	0.64	0.34	1.86
VW Golf GL	0.65	0.34	1.89	Mercedes 190 E	0.65	0.34	1.89
Renault 21	0.66	0.34	1.94	Ford Sierra XR 4i	0.67	0.34	1.98
VW Golf GTI 16V	0.67	0.35	1.91	Citroen BX	0.68	0.36	1.91
VW Jetta CL	0.68	0.36	1.89	VW Passat GL	0.70	0.37	1.90
Fiat Ritmo	0.70	0.37	1.88				
Opel Omega	0.58	0.28	2.06	Mercedes 200	0.60	0.29	2.07
Audi 100	0.62	0.30	2.05	Renault 25	0.62	0.31	2.03
Ford Scorpio	0.70	0.35	2.02	Fiat Croma	0.70	0.34	2.04
Lancia Thema	0.73	0.36	2.06	Honda Prelude 16V	0.76	0.41	1.84
Alfa 90	0.77	0.40	1.92	Citroen CX	0.78	0.40	1.96
Mitsubishi Galant	0.79	0.40	1.98				
Ferrari Testarossa	0.61	0.33	1.85	Mercedes 190 E2.3	0.64	0.33	1.94
Porsche 944 turbo	0.65	0.35	1.89	VW Scirocco 16V	0.68	0.38	1.78
Porsche 911 Carrera	0.68	0.38	1.77	Mitsubishi Starion T	0.69	0.37	1.84
Alfa Romeo GTV	0.71	0.40	1.77	Jaguar XJ-S	0.73	0.40	1.83
Porsche 928 S	0.77	0.39	1.96	Audi Quattro	0.80	0.43	1.86
BMW M 635 CSi	0.80	0.40	2.00				

Henkilöautoilla ilmanvastus ylittää vierintävastuksen noin 80 km/h nopeuden kohdalla ja kasvaa suhteessa nopeuden neliöön. Kuvassa 14 on esitetty 1900 kg painavan henkilöauton vierintä- ja ilmanvastukset nopeuden funktiona. Raskailla ajoneuvoilla ilmanvastuksen suhteellinen osuus on pienempi.



Kuva 14. Henkilöauton (1900 kg) vierintä- ja ilmanvastusvoimat (kgm/s²) eri nopeuksilla. Vierintävastus on lähes nopeudesta riippumaton.

Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty henkilöauton ajovastusvoimat ja niiden voittamiseen tarvittavan vetovoiman muodostamisessa tarvittava vähimmäiskitka nopeuden ja pituuskaltevuuden funktiona. Taulukosta 6 nähdään, että liukkaalla kelillä tarjolla oleva kitka tulee käytetyksi kokonaan vetovoimiin silloin kun pituuskaltevuus saa arvoja 7–9 % (ja tuulen nopeutta oteta huomioon).

Taulukko 5. Henkilöauton ajovastukset [kgm/s²] eri pituuskaltevuuksien ja nopeuden arvoilla (negatiiviset arvot kuvaavat jarrutusvoimia alamäessä kun nopeus pidetään ennallaan).

		Ilmanvastus	59	93	133	182	237	300	371	448	534
		Nopeus (km/h, m/s)									
Pituuskaltevuus (%)	Mäkilvastus	Vierintävastus	11.1	13.9	16.7	19.4	22.2	25.0	27.8	30.6	33.3
	MV (kgm/s ²)	VV (kgm/s ²)	40	50	60	70	80	90	100	110	120
-10	-1850	234	-1556	-1523	-1482	-1434	-1378	-1315	-1245	-1167	-1082
-9	-1666	234	-1373	-1339	-1299	-1251	-1195	-1132	-1062	-984	-899
-8	-1482	234	-1189	-1156	-1115	-1067	-1011	-948	-878	-800	-715
-7	-1298	234	-1005	-971	-930	-882	-827	-764	-693	-616	-530
-6	-1113	234	-820	-787	-746	-698	-642	-579	-509	-431	-346
-5	-928	234	-635	-601	-561	-513	-457	-394	-324	-246	-161
-4	-743	234	-449	-416	-375	-327	-272	-209	-138	-60	25
-3	-557	234	-264	-231	-190	-142	-86	-23	47	125	210
-2	-372	234	-78	-45	-4	44	100	163	233	311	396
-1	-186	234	108	141	182	230	285	348	419	497	582
0	0	234	294	327	368	416	471	534	605	683	768
1	186	234	479	513	554	602	657	720	791	868	954
2	372	234	665	699	739	788	843	906	976	1054	1140
3	557	234	851	884	925	973	1029	1092	1162	1240	1325
4	743	234	1037	1070	1111	1159	1214	1277	1348	1426	1511
5	928	234	1222	1255	1296	1344	1400	1463	1533	1611	1696
6	1113	234	1407	1440	1481	1529	1585	1648	1718	1796	1881
7	1298	234	1592	1625	1666	1714	1769	1832	1903	1981	2066
8	1482	234	1776	1809	1850	1898	1954	2017	2087	2165	2250
9	1666	234	1960	1993	2034	2082	2138	2201	2271	2349	2434
10	1850	234	2143	2177	2217	2266	2321	2384	2455	2532	2618

Taulukko 6. Henkilöauton ajovastusten voittamiseen tarvitsema kitka eri pituuskaltevuuksien ja nopeuksien arvoilla (negatiiviset arvot kuvaavat jarrutus-tilannetta alamäessä kun nopeus pidetään ennallaan).

Pituus- kaltevuus (%)	Nopeus (km/h, m/s)								
	11.1	13.9	16.7	19.4	22.2	25.0	27.8	30.6	33.3
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
-10	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07	-0.07	-0.07	-0.06	-0.06
-9	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.05
-8	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.05	-0.05	-0.04	-0.04
-7	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03
-6	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02
-5	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01
-4	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00
-3	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.01	0.02
-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04
-1	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06
0	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08
1	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10
2	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12
3	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.13	0.14
4	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.16
5	0.13	0.14	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17	0.18
6	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.19	0.19	0.20
7	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21	0.22
8	0.19	0.20	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23	0.23	0.24
9	0.21	0.22	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25	0.25	0.26
10	0.23	0.24	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.27	0.28

Ilmanvastusten voittamiseen tarvittava vetovoima muodostetaan ajoneuvon vetävien pyörien ja tien pinnan välisen kitkan avulla. Tarjolla olevasta kitkasta käytetään ensin ajoneuvon eteenpäin liikuttamiseen tarvittavien voimien (mäkivastus+ vierintävastus+ilmanvastus) muodostamisessa tarvittava kitka. Loppu kitka jää sivuttaispitoon tarvittaville voimille. Oikean suuruinen sivukaltevuus tukee sivuttaispittoa kaarteissa ja vähentää tarvittavaa sivuttaiskitkan tarvetta.

4.3.3.4 Kiihdytys ja jarrutus

Kiihdytys ja jarrutus vaikuttavat akseleiden välisiin voimiin. Kiihdytyksissä painoa siirtyy taka-akselille ja jarrutuksissa etuakselille. Siirtyvä osuus painosta lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$dF = \frac{hma_x}{L} \quad (9)$$

missä a_x =kiihtyvyyys kulkusuunnassa [m/s²]
ja L=akseliväli [m]
h=ajoneuvon painopisteen korkeus maasta [m]

Kiihdytyksessä voiman siirtymä on positiivinen ja jarrutuksissa negatiivinen. Kiihdytysten ja jarrutusten vaikutusta ei oteta sivukaltevuustarkasteluissa huomioon. Niitä kuitenkin esiintyy todellisissa ajotilanteissa.

4.3.4 Sivusuuntainen ajodynamiikka

4.3.4.1 Keskihakuvoima kaarteessa

Liikkeessä olevalla ajoneuvolla on liikkeensuuntainen liike-energia, joka pyrkii pitämään ajoneuvon suunnan vakiona. Kaarteessa ajoneuvoa kuitenkin ohjataan tien suuntaisesti, jolloin ajoneuvon suuntaa halutaan muuttaa kohti kaarresäteen keskipistettä. Ajoneuvoon halutaan kohdistaa sivuttaisvoima, jotta sen suunta muuttuisi. Tätä voimaa kutsutaan keskihakuvoimaksi (yleisesti puhutaan keskipakovoimasta, joka on väärä ilmaisu). Tarvittavan sivuttaisvoiman (keskihakuvoiman) suuruus riippuu ajoneuvon nopeudesta, massasta sekä tien kaarresäteestä kaavan (10) mukaan:

$$F_{\text{sivuttais}} = \frac{mv^2}{R} \quad [\text{kg m/s}^2], \quad (10)$$

jossa

m on ajoneuvon massa	[kg]
v on ajoneuvon nopeus	[m/s]
R on tien kaarresäde	[m]

Tien kaarteisuus voidaan laskea PTM-auton mittaamien kiihtyvyyksien perusteella. Se lasketaan kaavalla (11) ja talletetaan yhtenä palvelutasomuuttujana kuntotietojen yhteydessä. Kaarresäde on laskettavissa siitä seuraavasti.

$$\text{Kaarteisuus} = \frac{10000}{R} \quad [1/\text{m}] \quad (11)$$

On huomioitava, että R on (PT-mittauksissa) oikealle kaartuvilla osuuksilla negatiivinen ja vasemmalle kaartuvilla osuuksilla positiivinen. Suorilla osuuksilla se saa sekä negatiivisia että positiivisia suuria arvoja.

Keskihakuvoiman synnyttämiseksi ajoneuvon renkaiden ja tien pinnan välissä tarvitaan kitkaa. Ajoneuvon pyörän ja tien pinnan välinen kitkavoima lasketaan kaavalla (3):

$$F_{\text{sivuttais}} = \mu mg \quad [\text{kg m/s}^2] \quad (12)$$

jossa

on kitkakerroin	
g maanvetovoiman kiihtyvyys	[m/s ²]

Keskihakuvoiman synnyttämiseksi tarvittava kitkakerroin kallistamattomassa kaarteessa voidaan laskea kaavalla, joka saadaan kun edelliset voimалаusekkeet (1) ja (3) merkitään yhtä suuriksi ja ratkaistaan kitkantarve:

$$\mu \geq \frac{v^2}{Rg} \quad [\text{ei yksikköä}] \quad (13)$$

Kaavasta nähdään, että ideaalilanteessa ajoneuvon massa ei vaikuta kitkantarpeeseen, vaan se on riippuvainen ainoastaan ajoneuvon nopeudesta ja kaarteeseen kaarresäteestä. Taulukossa 7 on laskelma, jossa kitkantarve on laskettu eri nopeuksilla ja kaarresäteen arvoilla. Kitkantarve on huomattavan suuri kun kaarresäde on pieni ja se kasvaa nopeuden kasvaessa. Negatiivinen merkki tarvittavassa kitkassa osoittaa täs-

sä tilanteessa tarvittavan kitkavoiman suunnan siten, että oikealle kaartuvissa kaarteissa kitkavoima on negatiivinen (oikealle) ja vasemmalle kaartuvissa kaarteissa vastaavasti positiivinen (vasemmalle). Sivukaltevuuden ollessa nolla kitkantarvelaskelmaa tarvitaan käytännössä vain kaarresädettä 600 m pienemmille kaarteille.

Taulukko 7. Kaarteissa tarvittavan sivukitkan tarve (v^2/Rg) eri kaarresäteen ja ajonopeuden arvoilla kun sivukaltevuus = 0 eikä kaarteissa ole yksittäisheittoja.

Sivukaltevuus=0			Nopeus (m/s tai km/h)						
Kaarteisuus	R(m)								
		13,9 50	16,7 60	19,4 70	22,2 80	25,0 90	27,8 100	33,3 120	
Kaarre vasemmalle	100,0	100	0,20	0,28	0,39	0,50	0,64	0,79	1,13
	50,0	200	0,10	0,14	0,19	0,25	0,32	0,39	0,57
	33,3	300	0,07	0,09	0,13	0,17	0,21	0,26	0,38
	25,0	400	0,05	0,07	0,10	0,13	0,16	0,20	0,28
	20,0	500	0,04	0,06	0,08	0,10	0,13	0,16	0,23
	16,7	600	0,03	0,05	0,06	0,08	0,11	0,13	0,19
	14,3	700	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,11	0,16
	12,5	800	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,14
	11,1	900	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,13
10,0	1000	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,11	
Suora									
Kaarre oikealle (*)	-10,0	-1000	-0,02	-0,03	-0,04	-0,05	-0,06	-0,08	-0,11
	-11,1	-900	-0,02	-0,03	-0,04	-0,06	-0,07	-0,09	-0,13
	-12,5	-800	-0,02	-0,04	-0,05	-0,06	-0,08	-0,10	-0,14
	-14,3	-700	-0,03	-0,04	-0,06	-0,07	-0,09	-0,11	-0,16
	-16,7	-600	-0,03	-0,05	-0,06	-0,08	-0,11	-0,13	-0,19
	-20,0	-500	-0,04	-0,06	-0,08	-0,10	-0,13	-0,16	-0,23
	-25,0	-400	-0,05	-0,07	-0,10	-0,13	-0,16	-0,20	-0,28
	-33,3	-300	-0,07	-0,09	-0,13	-0,17	-0,21	-0,26	-0,38
	-50,0	-200	-0,10	-0,14	-0,19	-0,25	-0,32	-0,39	-0,57
-100,0	-100	-0,20	-0,28	-0,39	-0,50	-0,64	-0,79	-1,13	

4.3.4.2 Sivukaltevuuden vaikutus kitkantarpeeseen

Tien sivukaltevuus ei ole varsinkaan kaarteissa nolla vaan joko oikealle tai vasemmalle viettävä ja sillä on merkitystä käytettävissä olevaan kitkaan. Sivukaltevuusarvo on yleensä suoralla ja oikealle kaartuvissa kaarteissa negatiivinen ja vasemmalle kaartuvissa kaarteissa positiivinen.

Kun kitkantarvelaskelmassa halutaan ottaa huomioon myös tien sivukaltevuus, niin kaava (13) muuttuu seuraavan kaavan mukaiseksi. Jos pyöräpainojen dynaamisuutta ja siirtymiä ei huomioida, niin massat supistuvat kaikista termeistä pois. Koska vasemmalle kaartuvien kaarteiden kaarresäde on mittauksissa negatiivinen, tulee kaavan niihin termeihin, joissa on kaarresäde, vaihtaa merkkiä negatiiviseksi eli:

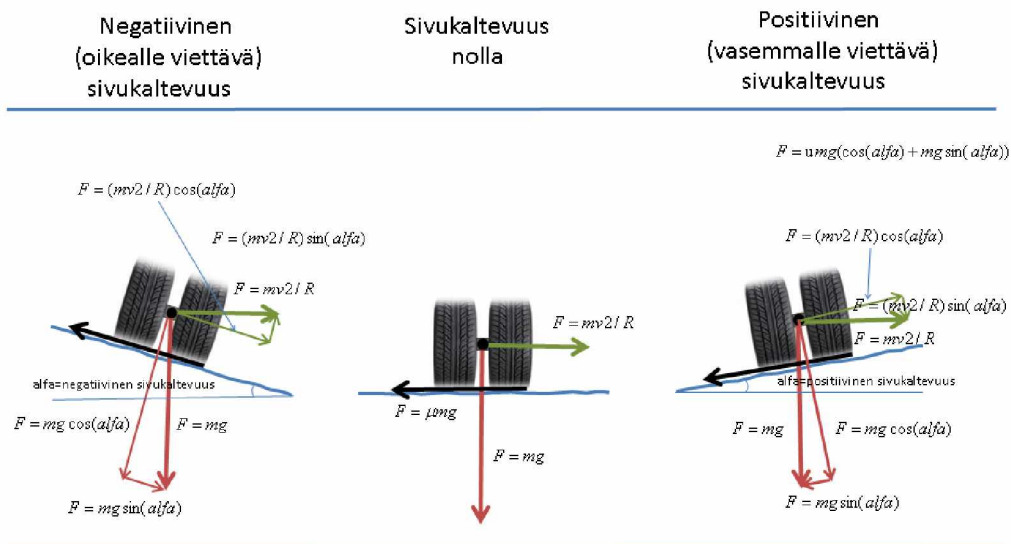
$$(14) \quad \mu \geq \frac{mv^2 / R \cos(\alpha) - mg \sin(\alpha)}{mg \cos(\alpha) + mv^2 / R \sin(\alpha)}$$

Kallistuskulma, α , lasketaan suoraan sivukaltevuudesta (yksikkönä radiaani) sen merkki huomioiden, joten kaava ottaa automaattisesti huomioon erisuuntaiset kallistukset (s).

$$(15) \quad \alpha = \arctan(s/100)$$

Tietä kaarteissa oikein kallistamalla ajoneuvon ja tien välistä kontaktivoimaa saadaan lisättyä, minkä seurauksena maksimi kitkavoima kasvaa. Termi $mv^2/R \cdot \sin(\alpha)$ huomioi "keskipakovoimasta" saatavan lisänormaalivoiman, joka tuottaa ajodynamiikan kannalta oikein kallistuvalla tiellä lisää kitkavoimaa ja vastaavasti väärään suuntaan kallistuvalla tiellä vähentää sitä. Suorilla suuri kaarresäteen arvo tekee termistä merkityksettömän. Samasta syystä kaarteiden vääränlaisella kallistuksella kitkavoima pienenee. Nämä kaavat toimivat yksittäiselle kappaleelle. Ajoneuvo on todellisuudessa monimutkaisempi systeemi, missä pyörien massat vaihtelevat, mutta samat perusperiaatteet pätevät silti.

Vasemmalle kaartuvat kaarteet



Kuva 15. Sivukaltevuuden vaikutus staattisen tilanteen kitkantarvelaskelmassa vasemmalle kaartuvissa kaarteissa. Dynaamisessa tarkastelussa massa ei supistu pois, koska tarkastelu on tehtävä pyörä kerrallaan ja pyöräpaineen suuruus vaihtelee epätasaisuuden ja painon siirtymien takia.

Taulukossa 8 on esitetty kitkan tarve kun ajonopeus on 100 km/h ja kaarresäde ja sivukaltevuudet vaihtelevat. Mitä pienempi on sivukitkan tarve, sitä parempi tilanne on. Turvallista kitkantarvealuetta edustaa vihertävällä taustavärillä väritetyt tilanteet. Minimikitkakerroin saa suuria arvoja erityisesti jyrkissä ja väärin kallistetuissa mutkissa. Vaadittavan kitkakertoimen arvoa kasvattavat myös väärän suuntainen kallistus ja epätasainen pyöränkuormien jakautuminen. Kitkakerroin kumin ja kuivan asfaltin välillä on tavallisesti noin 0,8–0,9.

Taulukon paksu murtoviiva kuvaa sitä rajaa, jolla ajoneuvo juuri ja juuri selviäisi suistumatta talvisilla 0,20 kitkan keleillä. Sivukaltevuuden vaihdellessa välillä $\pm 5\%$ kaarresäteen tulisi olla vähintään 400-600 m. Tämä tilanne pätee vain silloin kun pituussuuntaista kitkantarvetta ei ole. Kun pituus suunnan kitkantarve otetaan huomioon, niin minimikaarresäteiden tulee olla vastaavasti suuremmat.

Taulukkoa luetaan niin, että kun tiellä on tietty nopeusrajoitus ja kaarresäde, niin niiden perusteella lasketaan, millä sivukaltevuusarvolla saavutetaan kriittisen kitkantarpeen raja ja verrataan sitä sivukaltevuutta todelliseen sivukaltevuuteen. Jos todellinen sivukaltevuus tuottaa kriittistä kitkatasoa pienemmän kitkantarpeen, niin sivukaltevuus on riittävä, muussa tapauksessa kitkantarve on suurempi kuin saatavilla oleva kitka ja sivukaltevuutta tulee parantaa (kaarresäteen kannalta oikeaan suuntaan).

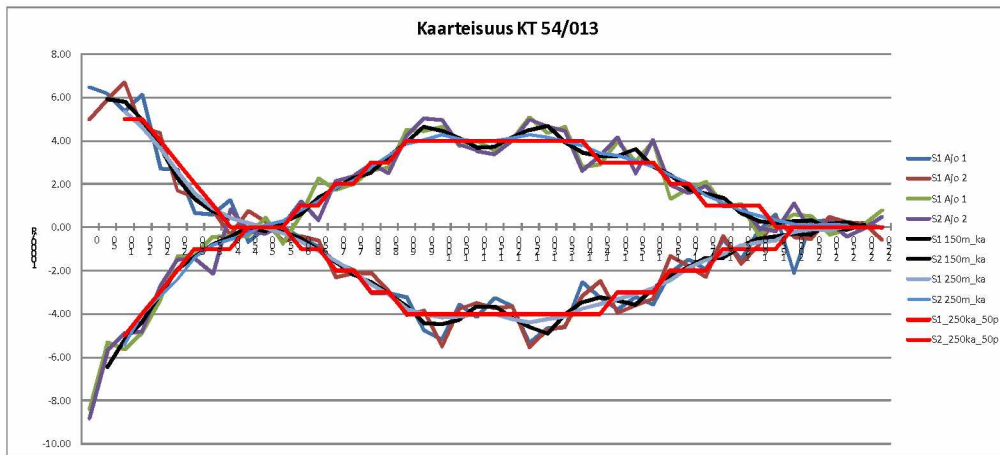
Vasemmalle kaartuvien kaarteiden sivuttaiskitkaa parannetaan muuttamalla kaltevuuksia positiivisiksi. Oikealle kaartuvien kaarteiden sivuttaiskitkaa parannetaan muuttamalla positiivisia kaltevuuksia negatiivisiksi.

Taulukko 8. Keskihakuvoiman synnyttämiseen tarvittava kitkan tarve kaarteissa kun ajoneuvon nopeus on 100 km/h. Mitä pienempi kitkan tarve on, sitä parempi. Etumerkki kitkan tarpeessa kuvaa tarvittavan kitkavoiman suuntaa.

Nopeus = 100 km/h			Sivukaltevuus(*)										
Kaarteisuus	R(m)	Vasemmalle viettävä sivukaltevuus						Oikealle viettävä sivukaltevuus					
		5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	
Kaarre vasemmalle	100,0	100	0,71	0,72	0,74	0,75	0,77	0,79	0,80	0,82	0,84	0,85	0,87
	50,0	200	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,42	0,43	0,44	0,45
	33,3	300	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,31	0,32
	25,0	400	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25
	20,0	500	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21
	16,7	600	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18
	14,3	700	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16
	12,5	800	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
	11,1	900	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
	10,0	1000	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13
Suora													
Kaarre oikealle (*)	-10,0	-1000	-0,13	-0,12	-0,11	-0,10	-0,09	-0,08	-0,07	-0,06	-0,05	-0,04	-0,03
	-11,1	-900	-0,14	-0,13	-0,12	-0,11	-0,10	-0,09	-0,08	-0,07	-0,06	-0,05	-0,04
	-12,5	-800	-0,15	-0,14	-0,13	-0,12	-0,11	-0,10	-0,09	-0,08	-0,07	-0,06	-0,05
	-14,3	-700	-0,16	-0,15	-0,14	-0,13	-0,12	-0,11	-0,10	-0,09	-0,08	-0,07	-0,06
	-16,7	-600	-0,18	-0,17	-0,16	-0,15	-0,14	-0,13	-0,12	-0,11	-0,10	-0,09	-0,08
	-20,0	-500	-0,21	-0,20	-0,19	-0,18	-0,17	-0,16	-0,15	-0,14	-0,13	-0,12	-0,11
	-25,0	-400	-0,25	-0,24	-0,23	-0,22	-0,21	-0,20	-0,19	-0,18	-0,17	-0,16	-0,15
	-33,3	-300	-0,32	-0,31	-0,29	-0,28	-0,27	-0,26	-0,25	-0,24	-0,23	-0,22	-0,21
	-50,0	-200	-0,45	-0,44	-0,43	-0,42	-0,40	-0,39	-0,38	-0,37	-0,36	-0,35	-0,34
	-100,0	-100	-0,87	-0,85	-0,84	-0,82	-0,80	-0,79	-0,77	-0,75	-0,74	-0,72	-0,71
(*) Kaarresäde oikealle tai sivukaltevuus oikealle ovat negatiivisia													

4.3.4.3 Kaarresäteen suodatus

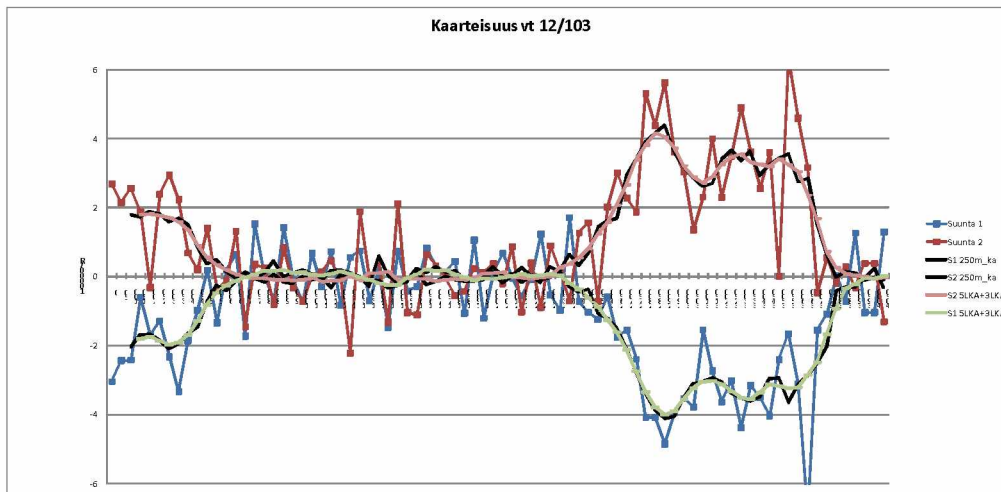
Kaarteissa tarvittavan sivukaltevuuden laskennassa tarvitaan kaarresädettä, jonka arvo pysyy suhteellisen stabiilina koko kaartein ajan. Palvelutasomittauksissa tuotettu kaarresäteen arvo ei pysy stabiilina, vaan siihen vaikuttaa mittaamisen yhteydessä tapahtuva ajolinjavaihtelu. Kaarresäteen ja kaarevuuden mitattuja arvoja tulee suodattaa siten, että saadaan selville minkä suuruinen kaarresäde kulloinkin on. Kaarevuustiedon suodatukseen tarvitaan algoritmia, jolla ensiksikin saadaan sen vaihtelu stabiilimmaksi ja toiseksi, jonka avulla vaakageometrian elementtien alku- ja loppukohtat saadaan tunnistettua.



Kuva 16. Kaarteisuus (10000/R) vaihtelee peräkkäisillä 50 metrin jaksoilla sekä mittauskerroilla. Sen vaihtelua tulee pienentää suodattamalla.

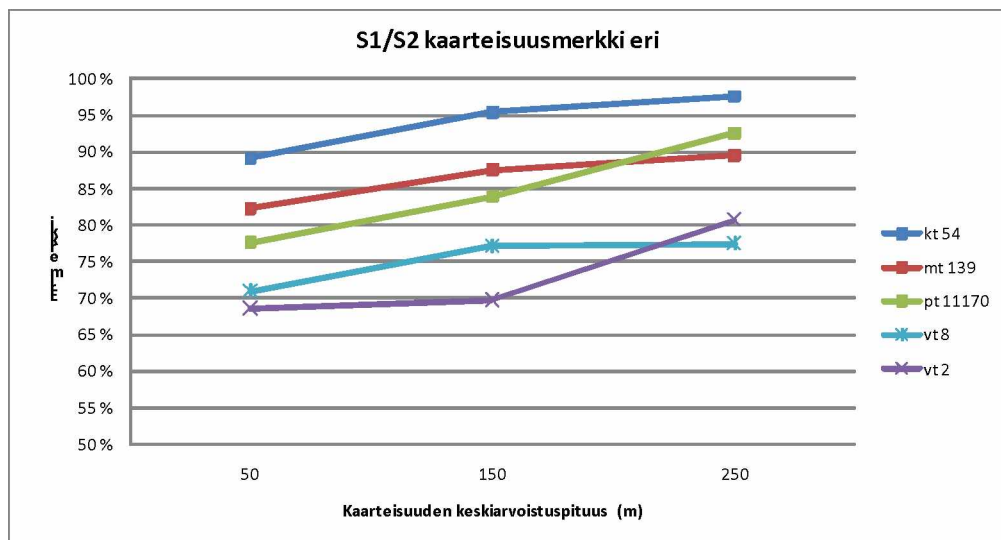
Suoran tunnistus

Suorien tunnistamista varten tehtiin suodatustesti, missä valittiin 13 kohdetta, joiden kaarteisuus oli mitattu molempiin suuntiin ja osin kahteen kertaan. Kaarteisuustietoa suodatettiin kahdella eri suodatuksella, jotka olivat kolmen (150 m) ja viiden (250 m) havainnon liukuva keskiarvo. Suorien alku- ja loppupisteet katsottiin mittausten yhteydessä saaduista STILL-kuvista. Suoraa kuvaava 50 m jakso sai arvon 1 jos se oli suoralla ja arvon 0, jos kaarre oli jo alkanut.



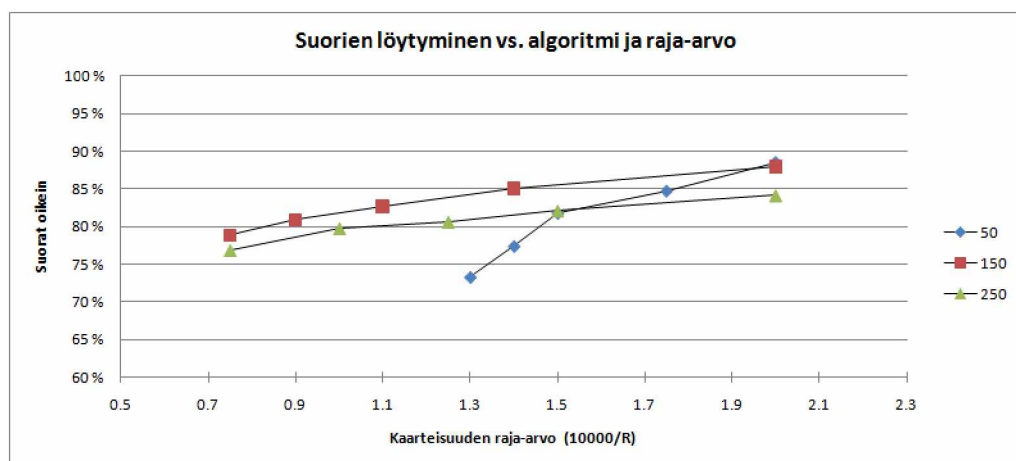
Kuva 17. Kolmen havainnon liukuva keskiarvo suodattaa kaarteisuustiedon vaihtelua huomattavasti.

Ensiksi tehtiin eri suuntiin mitattujen kaarteisuustietojen merkkitesti. Koska eri suuntiin mitattujen kaarteiden tulisi olla erimerkkiset, tehtiin testi, jolla testattiin, miten suuressa osuudessa merkkitesti onnistuu. Testi tehtiin teittäin, ts. eri tiet sisälsivät eri määrän tieosia. Merkkitestissä oikeiden tulosten osuus vaihteli välillä 70–97 %. KT 54:lla testin tulos oli paras ja VT 2:lla heikoin. Tulokseen vaikutti suorien ja kaarteiden osuus siten, että mitä enemmän suoraa, sitä heikompi tulos, mikä olikin loogista. Merkkitestin tulos on sitä parempi mitä pidemmälle jaksolle liukuvaa keskiarvoa lasketaan. Kolmen havainnon keskiarvo tuotti selvästi paremman tuloksen kuin yksittäiset 50 m mittaushavainnot. Viiden havainnon keskiarvo tuotti joissakin tapauksissa paremman tuloksen.



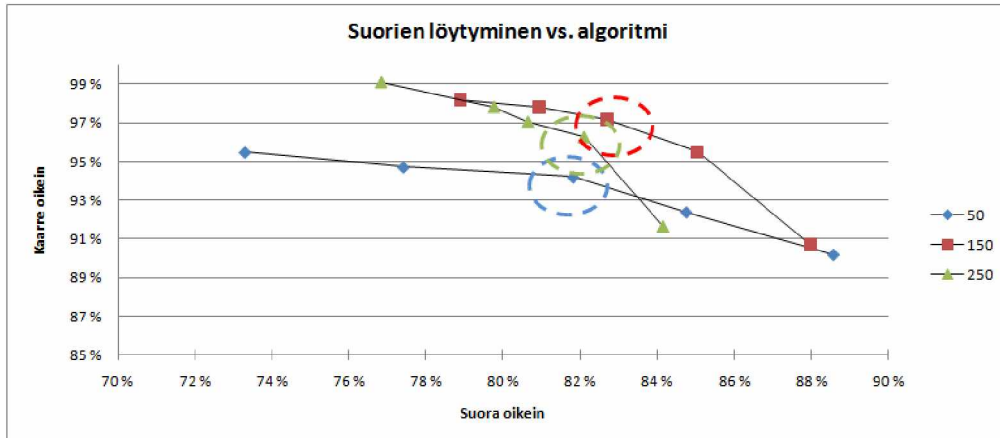
Kuva 18. Kaarteisuustiedon merkkitesti.

Suorientunnistusalgoritmeja testattiin siten, että asetettiin kullekin algoritmille useita raja-arvoja ja laskettiin oikein tunnistuvien suorien osuus. Tunnistuskyky kasvaa kun raja-arvoa kasvatetaan. Raja-arvon maksimiarvona voidaan pitää arvoa 2, jota vastaa kaarresäde 5000 m. Koska nopeusrajoituksen 100 km/h teillä käytetään 6000–7000 m kaarresäteitä, jotka tämä algoritmi tunnistaisi suoriksi, on 2 raja-arvona jo liian suuri.



Kuva 19. Suorantunnistusalgoritmien paremmuus.

Kun tunnistustarkkuuteen lisätään kriteeriksi myös kaarteiden oikein tunnistus, nähdään, että kolmen havainnon (150 m) liukuva keskiarvo tuottaa kokonaisuutena parhaan tunnistustuloksen. Suorat tunnistuvat oikein 83 %:ssa ja kaarteet 97 %:ssa tilanteista. Paras raja-arvo kaarteisuudelle on 1,1, joka vastaa kaarresädettä 9100 m. Tätä raja-arvoa vastaava kaarresäde on jo niin suuri, että sen yli meneviä säteitä voidaan pitää käytännössä suorina. Suorien tunnistus onnistuu siten hyvin.



Kuva 20. Suorat oikein vs. kaarteet oikein eri algoritmeilla.

Suorien tunnistusalgoritmiksi suositellaan kaarteisuuden kolmen 50 m havainnon liukuvaa keskiarvoa, jonka raja-arvoa 1.1 pienemmät arvot kuuluvat suoralle ja sitä suuremmat arvot siirtymäkaarelle tai kaarteeseen. Näin tunnistetuilla suorilla tietosuukilla tulee olla kaksipuolinen sivukaltevuus eli sivukaltevuuden tulee olla negatiivinen. Tunnistusalgoritmi toimii paremmin jos kaarteisuus on mitattu molempiin suuntiin tai 2-ajorataisella tiellä kahdelta eri kaistalta. Suorien tunnistusta voidaan käyttää suorien erottelemisessä kaarteista ja kuivatuspuutteiden laskennassa.

Kaarteen tunnistus

Ympyränkaarien tunnistusalgoritmeja on saatavilla useita, mutta niihin ei tässä työssä paneuduta. Ympyrän kaaret on kuitenkin pystyttävä erottelemaan siirtymäkaarista, jotta kaarregeometrian vaikutus sivukitkan ja sitä kautta sivukaltevuuden tarpeeseen pystytään määrittämään. Tunnistusalgoritmin määrittäminen ja testaus suositellaan tehtäväksi muissa projekteissa.

Siirtymäkaaren hallinta

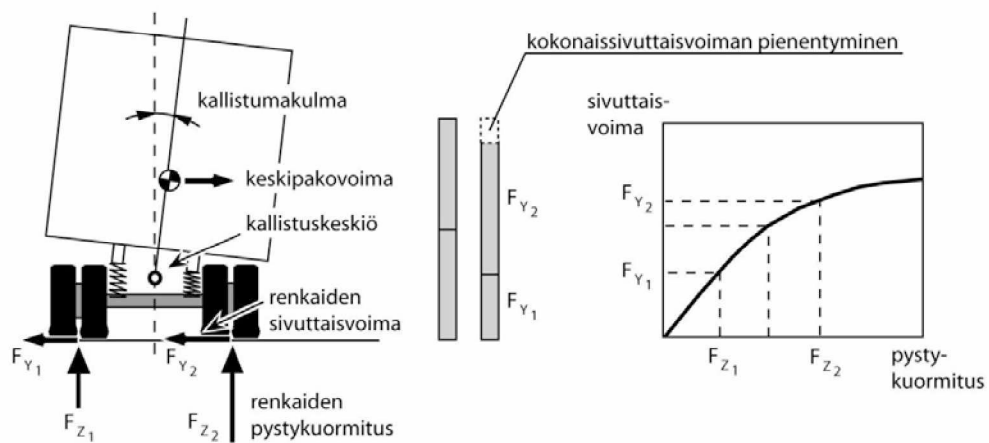
Siirtymäkaarien hallinta jätetään viimeiseksi, koska se on vaakageometrian elementistä käsiteltävyydeltään hankalin. Siirtymäkaarten sijoittuminen tunnistetaan hyvin, koska ne ovat niitä, jotka jäävät suorien ja ympyränkaarien tunnistamisen jälkeen jäljelle. Siirtymäkaarten sivukaltevuuden hallinta on kuitenkin hankalaa niissä tilanteissa, joissa se muuttuu suoran kaksipuolisesta kaltevuudesta yksipuoliseksi tai päinvastoin. Ajodynamiikan kannalta nämä osuudet sijoittuvat haastavasti kaarteiden alku- ja loppuosiin, joihin myös jarrutukset ja kiihdytykset usein osuvat. Alhaisen kitkan olosuhteissa siirtymäkaarilla voi olla hyvinkin tärkeä merkitys sivuttaispitoon jäävän kitkan muodostumisessa. Tällaiset tilanteet osuvat kohtiin, joissa suoraa seuraa ensin kaarre vasemmalle ja sitten jälleen suora. Ajettaessa tällaista tien kohtaa tierekisterin

kasvusuuntaan, ei tunnisteta ongelmaa, koska sivukaltevuustieto pysyy oikealle kallistuvana sekä suorilla että oikealle kaartuvassa kaarteessa. Sen sijaan kun ajetaan samaa tien kohtaa tierekisterin kasvusuuntaa vastaan, ollaan tilanteessa, missä sivukaltevuus muuttuu ennen kaarta suorien negatiivisesta sivukaltevuudesta kaarteeseen positiiviseksi sivukaltevuudeksi muuttuakseen sen jälkeen taas suoran negatiiviseksi sivukaltevuudeksi.

4.3.5 Pyöräpainon siirtymän vaikutus kitkantarpeeseen

Samalla akselilla olevien pyörien pyöräpainot ovat staattisessa tilanteessa kallistamattomassa poikkileikkauksessa samat. Dynaamisessa tilanteessa, joka tiellä tyypillisesti on, pyöräpainot vaihtelevat staattisen pyöräpainon ympärillä. Pyöräpainojen dynamiikkaa voidaan hallita pituusprofiilin avulla simuloimalla.

Ajourien pituusprofiilien epätasaisuudesta johtuu, että ajoneuvo kallistelee puolelta toiselle, jolloin massaa siirtyy akselin toiselta pyörältä toiselle pyörälle. Massojen avulla tuotettava kitkavoima ei kuitenkaan muodostu lineaarisesti vaan epätasaisissa kuormitustilanteissa kokonaiskitkavoimien summa on pienempi kuin tasaisen kuormitusten tilanteessa. Pyöräpainon kasvaminen heikentää kumin ja asfaltin välistä kitkaa, koska kumi käyttäytyy epälineaarisesti. Pyörän ja tien pinnan välinen kosketuspinnan ala ei kasva lineaarisesti eikä kitkavoimaakaan siten synny lineaarisesti pyöräpainon lisääntyessä. Käytettävissä oleva kitkakerroin on epätasaisissa kuormitustilanteissa siten heikompi kuin tasaisissa kuormitustilanteissa.



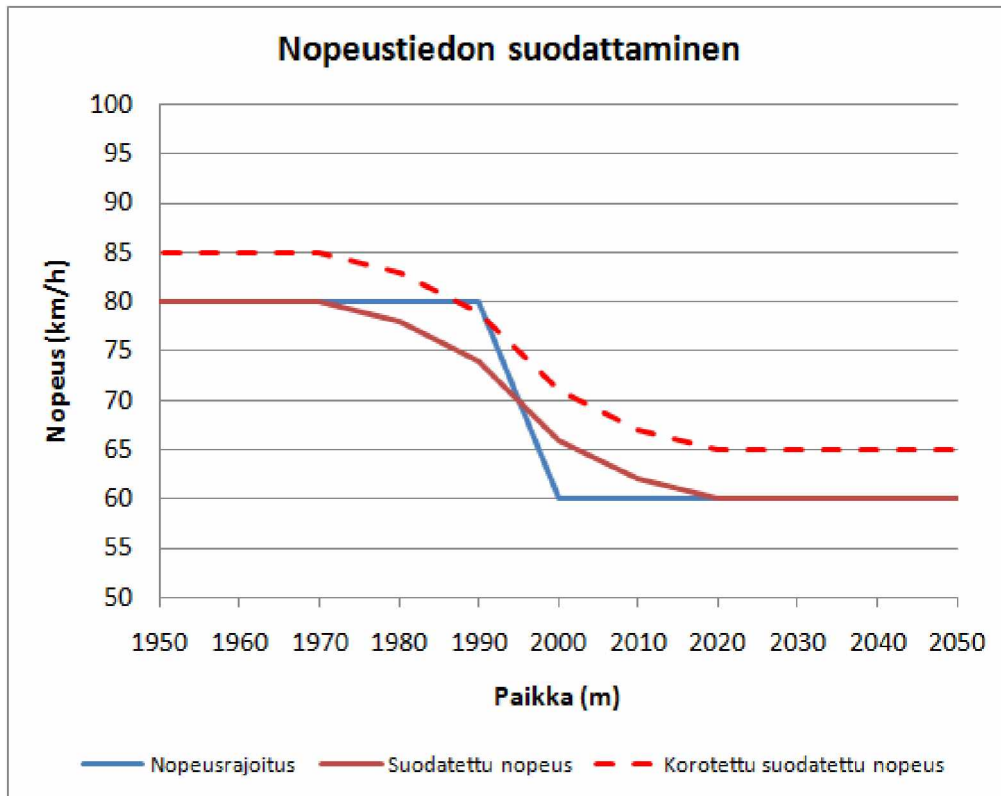
Kuva 21. Saavutettava kitkakerroin suhteessa renkaiden pystykuormituksen ja kaantumiseen.

Pyöräpainon siirtymä on mahdollista ottaa huomioon sekä sivuttaisheilahduksessa että kaarreajossa. Koska kaarrelaskennassa ei toistaiseksi ole käytettävissä dynaamista ajoneuvomallia, rajoittuu pyöräpainon siirtymän huomioon ottaminen vain sivuttaisheilahdusten laskentaan.

4.3.6 Kitkantarvelaskelma ja sivukaltevuuspuute

Kitkantarvelaskelmassa on huomioitava sekä pituussuunnassa että sivusuunnassa tarvittava kitka. Laskelmassa lähdetään liikkeelle tarjolla olevasta kitkasta, joka asetetaan talvihoidon laatuvaatimusten mukaan joko vakioksi 0.25 tai hoitoluokasta riippuvaksi 0.25–0.30.

Tämän jälkeen valitaan nopeusrajoituksen perusteella ajoneuvojen nopeus, missä huomioidaan raskaiden ajoneuvojen ajoneuvokohtaiset rajoitukset. Nopeus voidaan valita joko suoraan nopeusrajoituksen suuruiseksi tai joksikin muuksi todellisuutta vastaavaksi arvoksi. Simulointitarkasteluissa nopeuden vaihtumiset on muunnettava nopeusrajoitusmerkkien määrittämästä yhdessä pisteessä tapahtuvasta vaihtumisesta juohevaksi todellisuutta vastaavaksi vaihtumiseksi. Kuvassa on esitetty eräs malli, jolla nopeus vaihtuu juohevasti noin 50 m matkalla. Tarkastelu voidaan helposti tehdä muilla nopeuksilla lisäämällä siihen tasosiirtymiä.

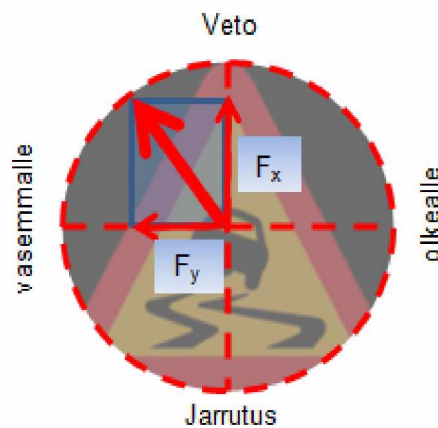


Kuva 22. Nopeusrajoitustiedon suodattaminen ajoneuvosimulointia varten.

Pituussuunnassa tarvittava kitka lasketaan kaikille ajoneuvotyypeille ottaen huomioon tien pystygeometria (pituuskaltevuus) ja ajoneuvon vetävien akselien lukumäärä.

Sivuttaispitoon jäävän kitkareservin suuruus lasketaan tarjolla olevan kitkan ja pituussuunnassa vaadittavan kitkan avulla seuraavasti:

$$\mu_{siv} = \sqrt{0.25^2 - \mu_{pit}^2} \quad (16)$$



Kuva 23. Käytettävissä olevasta kitkasta vähennetään ensin pituussuunnan tarpeisiin tarvittava kitka (F_x) ja jäljelle jäävä osuus (F_y) on sivusuunnan pitotarpeita varten.

Lopuksi lasketaan, minkä verran tarvitaan sivukaltevuutta, jotta jäljelle jäänyt kitka-reservi riittää sivuttaispitoon. Saatua sivukaltevuusarvoa verrataan olemassa olevaan arvoon ja päätellään sivukaltevuuspuutteen määrä. Sivukaltevuuspuutteen määrää se laskentatilanne, joka antaa suurimman puutteen.

Laskentatilanteita ovat ainakin seuraavat eri ajoneuvot:

- etuvetoinen henkilöauto
- takavetoinen henkilöauto
- kuorma-auto ilman perävaunua
- perävaunullinen kuorma-auto

Kitkantarvelaskelmassa on tärkeää hallita tien vaakageometrian määrittäminen suodattamalla kaarteisuustietoa siten, että vaakageometriset elementit tunnistetaan. Vaakageometriset elementit ovat suhteellisen vakiona pysyviä suunnittelulementtejä (poikkeuksena siirtymäkaaret), joiden suhteen olisi osattava vakioita vaihteleva mittaustieto mahdollisimman lähelle suunnittelussa käytettyjä elementtien arvoja.

Pituus- ja sivukaltevuustietojen käytössä on vapautta valita käytettävä laskentapituus laskentatilanteisiin sopivaksi. Laskentatilanteita tulee ensin kokeilla eripituisilla laskentaväleillä lähtien 1 m laskentavälistä 10 m ja jopa 50 m laskentaväliin saakka. 50 m laskentaväliä sivu- ja pituuskaltevuuksille voitaneen pitää maksimina. Ehdotettu koelaskenta jätetään tämän työn ulkopuolelle.

Sivukaltevuuspuute määräytyy kaarteissa sen perusteella, riittääkö tarjolla olevasta kitkasta riittävästi kitkaa sivusuunnan tarpeisiin, kun pituus- ja sivusuunnan kitkantarpeet on ajoneuvodynamiikan ja tiegeometrian avulla määritetty. Määrittelytapa voi olla aluksi staattinen määrittely, mutta se kannattaisi laajentaa dynaamiseksi määrittelyksi.

4.4 Ajoneuvon sivuttaisheilahtelu

4.4.1 Ajoneuvomalli

Dynaamisissa tarkasteluissa käytetään ajoneuvomalleja, joiden skaala vaihtelee yksinkertaisesta neljännesautomallista moniakselisiin yhdistelmäajoneuvojen malleihin. Taulukossa 9 on luokiteltu tavallisin mallien jaottelu. Malli A on neljännesautomalli, jolla pystytään tuottamaan vain pystysuunnan liikkeitä. Koska se tuottaa sekä akselin että korin pystyliikkeet, sitä sanotaan kahden vapausasteen malliksi. Ajoneuvon sivuttaisheilahtelun laskemiseksi tarvitaan vähintään B-malli, joka on 4 vapausasteen malli sisältäen yhden akselin. Tässä työssä valittiin malliksi kuitenkin 7 vapausasteen D-malli, koska se edustaa kokonaista kaksiakselista ajoneuvoa ja sillä voidaan tuottaa kaikki pystysuunnan sekä heilahduksen ja nyökkimisen liikkeet. Lisäksi malli kattaa niin henkilö-, paketti-, linja- kuin perävaunuttomat kaksiakseliset kuorma-autotkin.

Taulukko 9. Erilaisia ajoneuvomalleja ja niiden tuottamia tuloksia.

Ajoneuvomalleja ja niiden tuottamia tuloksia.		Malli							
		A	B	C	D	E	F	G	
		1 pyörä	1 akseli	Puoli- ajoneuvo	Koko ajoneuvo	Koko ajoneuvo	Koko ajoneuvo	Yhdistelmä ajoneuvo	
		2	4	4	7	14	33	100+	
Vasteet	Herätteet								
	Oikea pituusprofiili	x	x	x	x	x	x	x	
	Vasen pituusprofiili	x	x	x	x	x	x	x	
	Vaakageometria	-	-	-	-	x	x	x	
	Pystygeometria	-	-	-	-	x	x	x	
	Pystysuunnan liikkeet	s_z, v_z, a_z	2z	3z	3z	5z	5z	5z	nz
	Vaakas suunnan 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

Tässä työssä käytettiin nelipyöräistä täysautomallia, koska samaan aikaan oli työn alla myös pituussuuntaisen epätasaisuuden aiheuttaman nyökkimiskulman simulointitarkastelut ja sama malli tuotti tulokset molempiin tarkasteluihin [19].

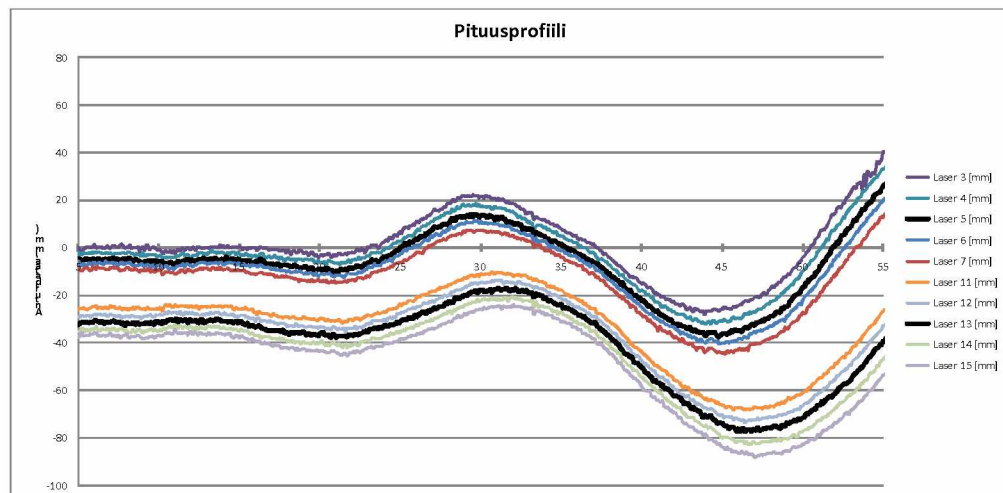
4.4.2 Heräte

Ajoneuvomallin herätteeksi tuotetaan tien pituusprofiili. Pituusprofiili mitataan kummastakin ajourasta viidellä eri kohdalla sijaitsevalla anturilla. Kunkin anturin tuottama pituusprofiili suodatetaan ja viiden anturin tuottamasta informaatiosta lasketaan keskiarvo. Kummankin ajouran keskiarvoprofiili on ajoneuvomallille syötettävä heräte (Kuvat 24 ja 25). Pituusprofiilitiedon muodostamisessa on keskeistä kolme seikkaa:

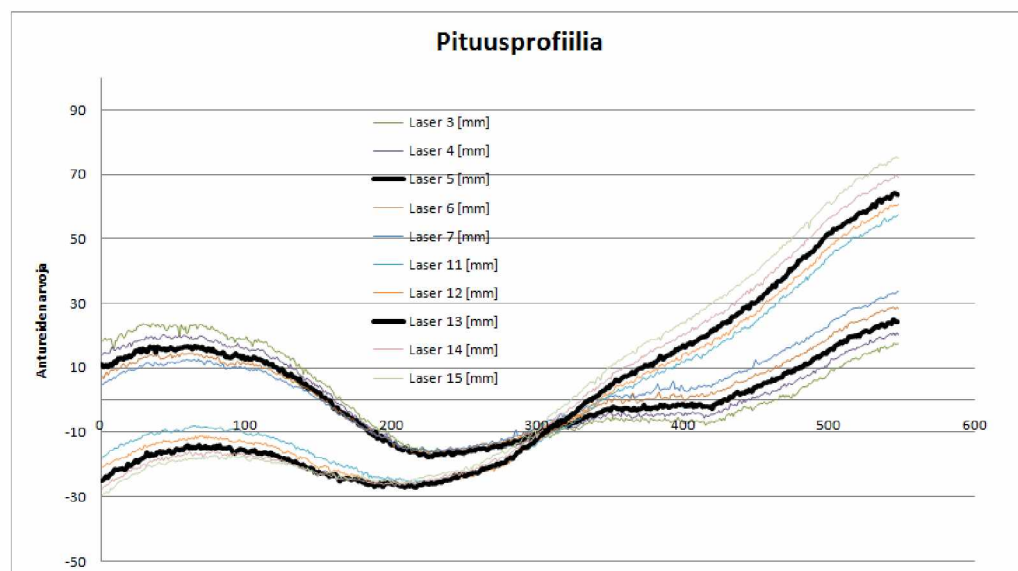
- transienttien suodatus kunkin anturin datasta alipäästösuotimella
- mäkisyydetiedon poistaminen kunkin anturin datasta ylipäästösuotimella
- ajourakeskiarvojen laskenta viidestä ajouran profiilista

Saatu viiden suodatetun profiilin keskiarvo kummallekin ajouralle on sivukaltevuusvaihteluiden laskennan ajoneuvomalliin syötettävä heräte, josta muodostuu sivukaliteluheräte ajoneuvon raidevälin avulla.

Muita herätteitä ovat nopeusrajoitus ja suodatettu kaarteisuus.



Kuva 24. Ajoneuvomalliin syötettävä profiilidata vastaa urien pohjan regressio-dataa.



Kuva 25. Sivukaltevuuden muutoskohta noin 50 m matkalla.

4.4.3 Vasteet

Ajoneuvomallin vasteina saadaan ajoneuvon korin ja akselin sivukallistuskulmat (φ) ja pyöräpainon ero (Load Transfer Ratio, LTR) sekä luonnollisesti korin ja akseleiden pystysuuntaiset liiketilat. Vasteet lasketaan syötteen raakadatan tasolla, josta ne tulee muuntaa halutuille tarkastelupituuksille (10 m tai 100 m). Vasteita lasketaan tarkastelupituuksille joko summina, keskiarvoina, maksimiarvoina tai hajontoina.

4.4.4 Sivuttaisheilahdellun laskeminen

Sivuttaisheilahduksista aiheutuva ajonvakaus laskettiin palvelutasomittausten pituusprofiilien ja ajoneuvomallin avulla. Ajoneuvomalli koodattiin Matlabiin ohjelmaksi ja ajonvakaustunnusluvut laskettiin sillä tieosa kerrallaan. Tunnusluvun laskenta suoritettiin siten, että otettiin nopeustieto tien nykyisestä nopeusrajoituksesta, mutta

samalla laskenta tehtiin myös muille nopeusrajoituksille. Nopeusrajoitusvaihtoehdot olivat 60 km/h, 80 km/h, ja 90 km/h ja 100 km/h. 10 m tuloksiin poimitaan nopeusrajoitusta vastaava arvo.

Ajoneuvon sivuttaisheilahtelua lasketaan ottamalla huomioon tien ajourista laskettu sivukaltevuus, ajoneuvon nopeus ja niiden vaikutus ajoneuvon massan jousituksen kautta tapahtuviin liikkeisiin. Tien sivukaltevuusvaihtelut lasketaan lähtien palvelutasomittausten raakadatasta eli 10 cm:n keskiarvostusvälille lasketusta profiilista. Profiiliin laitetaan kulkemaan laskennallinen ajoneuvo seuraavien laskentavaiheiden avulla:

- Laskenta etenee tien ykkössuunnassa tieosan alusta loppuun, mutta kakkossuunnassa tieosan lopusta alkuun. Kakkossuunnan pituusmitta käännetään tuloksia raportoitaessa toisinpäin.
- Lasketaan ajourien pituussuuntaiset korkeustasot pituuskaltevuuksien avulla
- Huomioidaan pituusprofiilit yhden renkaan leveydeltä keskiarvoistamalla vasemman ajouran profiilit (3-7) ja oikean ajouran profiilit (11-15).
- Tien hetkellinen sivukaltevuus lasketaan saatujen keskiarvoprofiilien avulla jakamalla vasemman ja oikean ajouran välinen korkeusero ajoneuvon raideleveydellä. Raideleveys on ajoneuvotyypikohtainen ja raskaille ajoneuvoille käytetään suurempaa arvoa (etuakseli 2361 mm ja taka-akseli 1826 mm) kuin henkilöautoille (1500 mm).
- Lopulliseksi herätteeksi saadaan ajourien pohjien välisen suoran kulmakerroin. Käytännössä pyörille syötetään niiden korkeusasemaa, joka on saatu ajourien pituusprofiilista. Sivukaltevuus muodostuu raideleveyksien kautta.
- Sivukaltevuus matkan funktiona muunnetaan sivukaltevuudeksi ajan funktiona.
- Tehdään simuloinnit.
- Palautetaan tulokset aikadimensiosta matkadimensioon.
- Tuotetaan erilaisia tunnuslukuja 10m tulostusväleille.
- Arvioidaan tien aiheuttaman kallistelun voimakkuutta heilahdusliikkeen amplitudin ja heilahdusnopeuden arvoja tarkastelemalla. Huomioidaan mahdolliset peräkkäiset aallot.
- Kakkossuunnan tulosten pituusmitta käännetään takaisin ykkössuuntaa vastaavaksi.

4.4.5 Sivuttaisheilahtelun tunnusluvut

Ajoneuvon sivuttaisheilahduksista saadaan useita tunnuslukuja. Keskeisimmät tunnusluvut ovat sekä korin että akselin kiertymäkulmat ja niiden kulmanopeudet (rad). Lisäksi saadaan sivukallistusten aiheuttama pyöräpainon siirtymäsuhde, sivuttaiskiihtyvyys ja sen edellyttämä minimi sivukitkan tarve.

Kulmanopeudet kannattaa muuntaa radiaaneista asteiksi ja ne kannattaa suhteuttaa kuljettuun pituuteen, esim. 10 m matkalle. Sadan metrin jaksoille 10 m jaksojen tunnusluvut tulee laskea joko keskiarvoina, maksimiarvoina tai tietyn rajan ylittävänä prosenttiosuutena.

Pyöräpainon suhteellinen ero kannattaa muuntaa prosenteiksi ja siitäkin kannattaa laskea joko keskiarvot, maksimiarvot tai tietyn rajan ylittävä osuus. Sivuttaiskiihtyvyys ja sen tarvitsema sivuttaiskitka ovat vaihtoehtoisia tunnuslukuja, mutta niiden

laskennassa tarvittaisiin sivuttaisdynamiikan hallintaa. Tällöin 7 vapausasteen malli tulisi laajentaa 14 vapausasteen malliksi.

Vertailun vuoksi taulukossa 11 on esitetty tien pinnasta saatavat sivuttaissuuntaan liittyvät tunnusluvut. Sivukaltevuus tuotetaan regressiokaltevuutena halutulle laskentapituudelle. Sivuttaisheittoriski tuotetaan kymmenmetrisille vertaamalla vasemman ja oikean ajouran IRI-tunnuslukuja keskenään ja tiettyyn raja-arvoon. IRI-suhde voidaan tuottaa myös puhtaasti jakamalla oikean ajouran IRI vasemman ajouran IRI:llä. Laskentapituutena IRI:lle ei ole syytä käyttää 10 m pituutta.

Lisäksi voidaan tuottaa profiilin RMS-tunnuslukujen ajourien tunnusluvut, mutta laskentapituudessa kannattaa ottaa huomioon aallonpituusalue ja varoa laskemasta niitä liian lyhyille pituuksille. RMS-suhteiden lisäksi olisi mahdollista tuottaa niiden keskiarvojen lisäksi suhdelukujen hajonnat halutulla laskentapituudella. Validoinnissa käytetään vertailun vuoksi SH-riskiä. Kun olemassa olevista tietunnusluvuista pystytään tuottamaan selvimmin 10 m laskentapituudelle tuotettavat tunnusluvut, oli parasta tuottaa myös simulointien tunnusluvut samalle laskentapituudelle. Tällöin tunnuslukujen validoinnissa voitiin verrata simulointien ja tietunnuslukujen paremmuutta. Verkkotason tarkasteluihin 10 m tunnusluvut voidaan muuntaa 100 m tasolle samalla tavalla kuin SH-riski.

Taulukko 10. Simuloinnin tuottamat tunnusluvut. Nopeuksia voidaan tarvittaessa varioida, mutta ne voidaan asettaa myös tieosalla olevien rajoitusten mukaisiksi.

Tunnusluku	Tien nopeusrajoitus (km/h)					
	40	50	60	70	80	90
Korin heilahduskulma	Φ_{K40}	Φ_{K50}	Φ_{K60}	Φ_{K70}	Φ_{K80}	Φ_{K90}
Akselin heilahduskulma	Φ_{A40}	Φ_{A50}	Φ_{A60}	Φ_{A70}	Φ_{A80}	Φ_{A90}
Pyöräpainon sivusiirtymäsuhde	LTR_{40}	LTR_{50}	LTR_{60}	LTR_{70}	LTR_{80}	LTR_{90}
Sivuttaiskiihtyvyys	a_{y40}	a_{y50}	a_{y60}	a_{y70}	a_{y80}	a_{y90}
Tarvittava sivuttaiskitka	μ_{y40}	μ_{y50}	μ_{y60}	μ_{y70}	μ_{y80}	μ_{y90}

Taulukko 11. Käytettävissä olevat tien pinnasta mitattavat ja edelleen jalostettavat tunnusluvut.

Tunnusluku	Laskentapituus (m)			
	1	10	50	100
Sivukaltevuus (%)	S_{reg}	S_{reg}	S_{reg}	-
Sivukaltevuuden vaihtelu %/m, %/s ¹)	dsk/ds_1 dsk/dt_1	dsk/ds_{10} dsk/dt_{10}	-	-
SH-riski	-	SH-riski ₁₀	-	SH-riski ₁₀₀
IRI-ero (O/V)	-	S_{IRI}	-	S_{IRI}
RMS1-ero(O/V)	S_{RMS1}	S_{RMS1}	-	S_{RMS1}
RMS3-ero(O/V)	-	S_{RMS3}	-	S_{RMS3}
RMS10-ero(O/V)	-	S_{RMS10}	-	S_{RMS10}
RMS30-ero(O/V)	-	(S_{RMS30})	-	S_{RMS30}
¹⁾ tunnusluvulla useita muodostamisvaihtoehtoja, tienpidossa käyttökelpoisia ovat muutos/pituusyksikkö (%/m, astetta/m) ja simuloinnissa käyttökelpoisia muutos/aikayksikkö (%/s ja rad/s).				

5 Heilahdustunnusluvun validointi

5.1 Pöytätesti

Simuloinnin tuottamia tuloksia tutkittiin aluksi laskennallisten pöytätestien avulla. Testejä suoritettiin sekä henkilöautolla että kuorma-autolla käyttäen eri nopeuksia. Sivukallistustestin lähtötietona oli erilaisia sivukaltevuusprofiileja, jotka sijoitettiin joko toiselle tai molemmille ajourille sekä peräkkäin että vuorotellen. Kaikki profiilit sijoitettiin samalle tieosalle ja ajot suoritettiin läpi testipätkän tietyllä ajoneuvolla ja tietyllä nopeudella.

5.1.1 Testin profiilit

Testin profiileina oli 1-4 kpl 10 cm:n profiilimuutosta siten, että profiili nousi noloprofiilista 10 cm viiden metrin matkalla ja laski takaisin noloprofiilille viiden metrin matkalla. Ensimmäisenä oli yksi profiilinmuutos vasemmalla ajouralla, sitten oli kaksi peräkkäistä muutosta vasemmalla ajouralla, sitten oli kaksi kummallakin ajouralla vuorottelevaa profiilinmuutosta ja lopuksi oli yksi vasemmalla ajouralla, sitten molemmilla ajourilla ja lopuksi vain oikealla ajouralla.

Testissä tarkasteltiin profiilinmuutosten ajoneuvolle simuloinnissa aiheuttamia vasteita.

5.1.2 Testin tulokset

Testi tehtiin kaksiakseliselle kuorma-autolle useilla eri nopeuksilla 60, 80 ja 90 km/h. Esimerkki pöytätestauksesta on esitetty kuvassa 26. Kuvan ykkösosassa on profiilit siten, että vasemman ajouran profiili on punaisella ja oikean ajouran profiili sinisellä värillä. Kuvassa näkyy neljä eri kohtaa, jotka ovat keinotekoisia sivuttaisheilahtelua aiheuttavia kumpareita joko vasemmassa, oikeassa tai molemmissa ajourissa. Pöytätestauksessa tämä keinotekoinen profiili syötettiin ajoneuvomalliin.

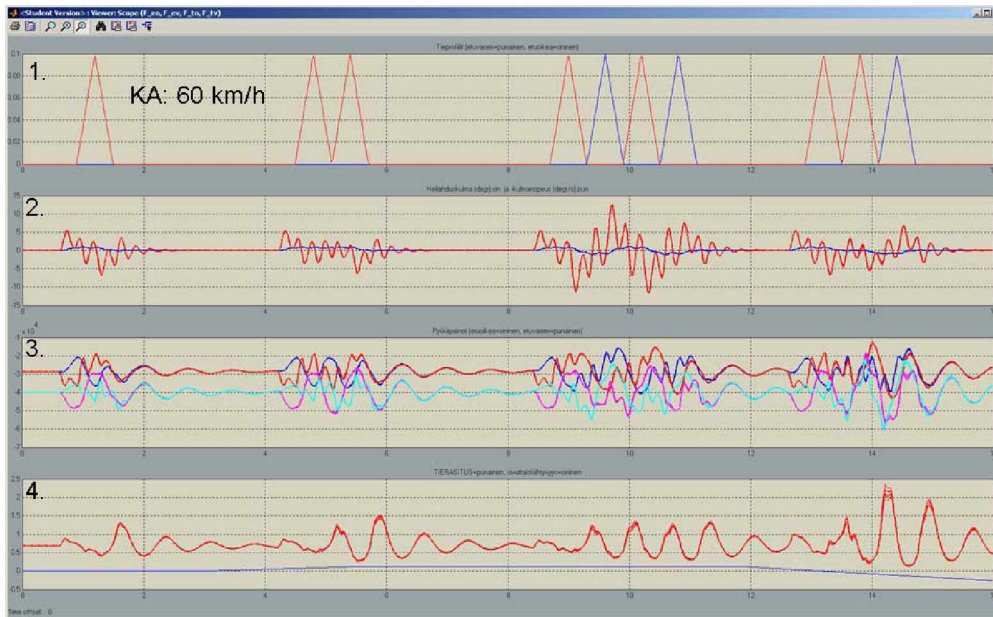
Kuvan osassa 2 on ajoneuvomallin tuottamat korin sivuttaisheilahduksen heilahduskulma (asteina sinisellä) ja heilahduskulmanopeus (astetta/s punaisella). Sivuttaisheilahduskulma saa pieniä arvoja välillä ± 2 astetta. Heilahduskulmanopeus sen sijaan saa suurempia arvoja eli ± 10 astetta/s.

Osassa 3 on esitetty pyöräpainot. Värikoodeina on etuoikealle sininen, etuvasemmalle punainen, takaoikealle violetti ja takavasemmalle magenta. Pyöräpainot ovat etuakselilla noin 3000 kg (30 000 N) ja taka-akselilla noin 4000 kg (40 000 N). Pyöräpainojen vaihtelualueet ovat etuakseleilla 2000–4000 kg ja taka-akselilla 2500–5000 kg. Pyöräpainojen vaihtelu näyttää sijoittuvan loogisesti eli pyöräpaino kasvaa kun pyörä kulkee nousukohdan yli ja laskee kun vierekkäinen pyörä kulkee nousukohdan yli.

Osassa 4 on esitetty ajoneuvon aiheuttama tierasitus eli kuormitusekvivalentti. Lisäksi on esitetty sivuttaiskiivtyvyys kun testiaineistossa oli mukana kaartaisuustieto. Etuakselin kuormitusekvivalentti lasketaan jakamalla akselin yhteen laskettu akselipaino vertailupainolla 8 tonnia ja korottamalla saatu tulos potenssiin 4. Taka-akselin kuormitusekvivalentti lasketaan vastaavasti käyttämällä paripyöräakselille tarkoitett-

tua vertailupainoa 10 t. Saatujen akselien kuormitusekvivalenttien summa osoittaa koko ajoneuvon kuormitusekvivalentin. Kuormitusekvivalentti vaihteli välillä 0.1–2.3 ja sai maksimikohtia hiukan profiilien muutoskohtien jälkeen.

Seitsemän vapausasteen ajoneuvomallien validoinnista on kirjallisuudessa useita esimerkkejä. Validointi suoritetaan yleensä joko mittauksiin tai kehittyneempään malliin verraten. Mallien validoinneissa tarkastellaan yleensä jousitusjärjestelmiin tehtävien parannustoimien vaikutuksia eli passiivista jousitusjärjestelmää kehitetään aktiivisen jousitusjärjestelmän suuntaan.



Kuva 26. Pöytätesti kuorma-autolla ajonopeudella 60 km/h.

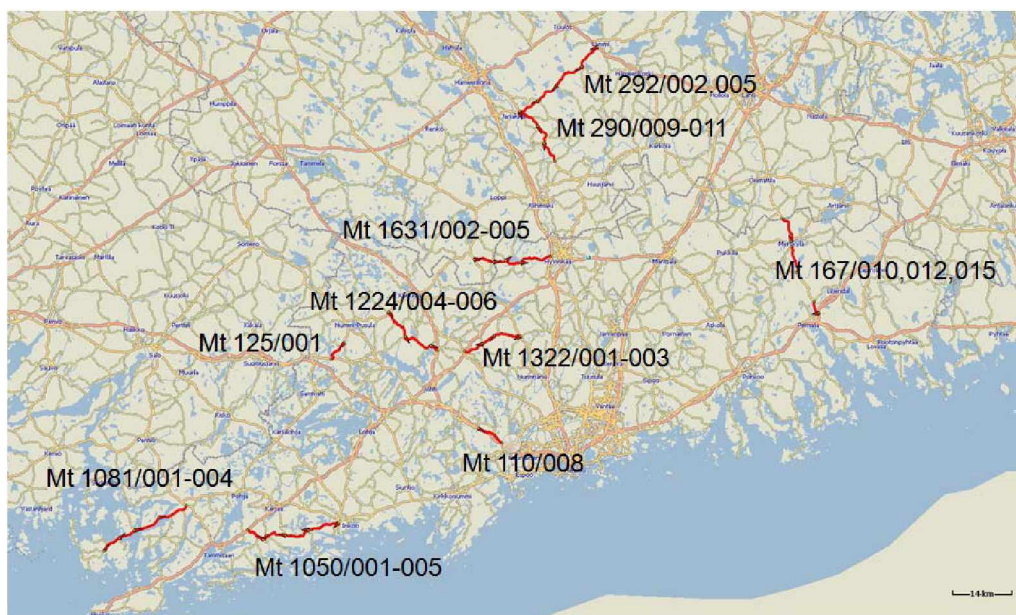
5.2 Maastotarkastelu

Maastotarkastelun tavoitteena oli etsiä tunnusluvun mukaisia vaaranpaikkoja ja käydä arvioimassa niitä silmämääräisesti ja ajotuntumaan perustuen ja verrata tunnuslukujen käyttäytymistä näin saatujen kohtien kohdalla.

Maastokohteiden valinta suoritettiin kahdella tavalla:

- Uudenmaan vuonna 2010 mitatuista kohteista poimittiin jatkotarkasteluun ne kohteet, joilla korin heilahdusarvot olivat suurempia kuin P99 prosenttipiste. Lisäksi mukaan otettiin vain kohteet, joilla nopeusrajoitus on 60 tai enemmän. Näiden suodatusten jälkeen kohteita oli jäljellä 644 kpl. Kartalle sijoitettuna kohteet asettuvat kuvan 27 mukaisesti. Kartalta valittiin sellainen alue, jossa oli vaaranpaikkojen keskittymä ja yhdeksi sellaiseksi osoittautui Janakkalan suunnalta valitut kohteet.
- Toinen maastokohdejoukko valittiin kysymällä Uudenmaan ELY-keskuksesta sellaisia kohteita, joilla oli tiedossa sivukaltevuusvaihtelujen kannalta huonoja kohtia.

Ensimmäiseen reittiin valittiin kuusi sivuttaisheilahtelua sisältävää tieosaa Janakkalan alueelta. Toiseen reittiin kysyttiin kohteita ELY-keskuksesta ja saatiin tarkasteltavaksi viisi tieosaa.



Kuva 27. Maastotarkasteluun valitut kohteet.

5.2.1 Janakkalan ympäristön kohteet

Janakkalan ympäristöstä valittiin reitti, jonka varrella oli suhteellisen tiheä kohdekeskittymä. Reitille osuivat seuraavat tiet (Kuva 28):

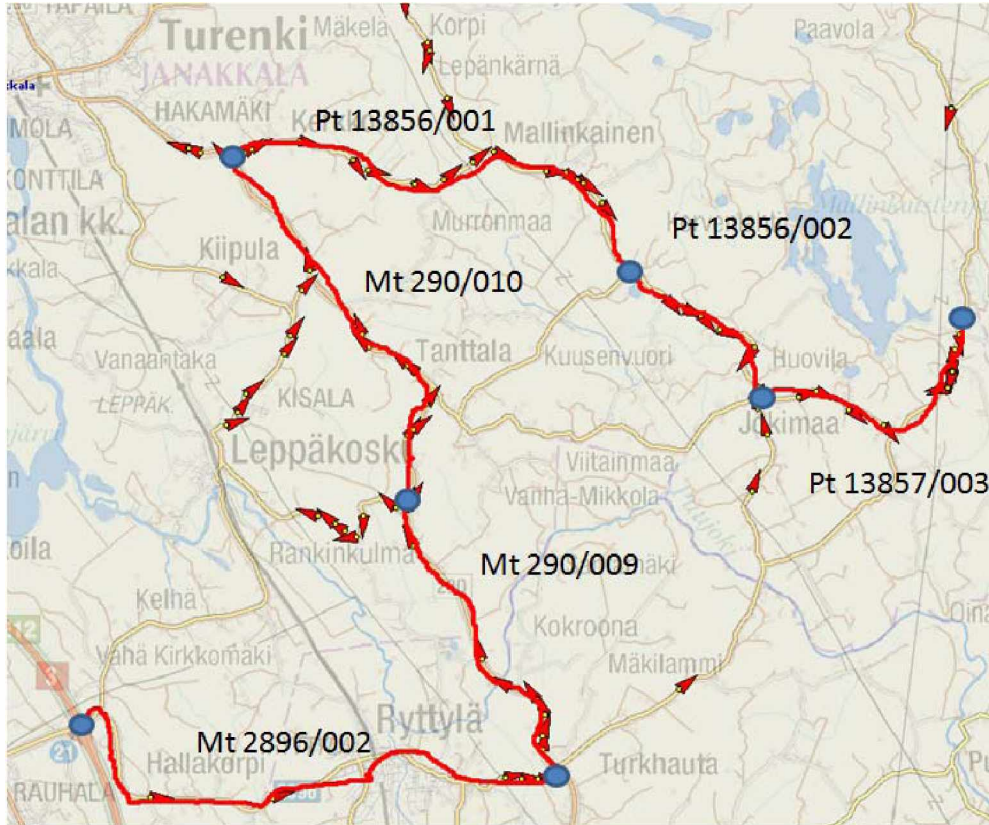
- mt 2896 tieosa 002,
- mt 290 tieosat 009 ja 010,
- pt 13856 tieosat 001 ja 002,
- ja 13857 tieosa 003,

Tälle lenkille tuli yhteensä 64 kpl prosenttipisteen P99 perusteella tunnistuvia kohtia. Ensimmäinen maastotarkastelu suoritettiin 6.3.2011 pienellä kuorma-autolla (Volvo FL6E). Kuorma-autoa käytetään levypainomittauksissa. Auton painopisteen korkeus on matalalla, verrattuna tavanomaisiin raskaisiin ajoneuvoihin. Ajoneuvossa ei käytetty minkäänlaisia mittalaitteita, mittamaan ajoneuvon liikehdintää, vaan sitä arvioitiin ainoastaan ajotuntumanperusteella. Paikannuksessa käytettiin M-tiepiste sovelusta, jolla tieosoitteet paikantuvat ajon aikana muutaman metrin viiveellä.

Paikallistiet olivat lumisia ja tämä haittasi havaintojen tekemistä ja sallitun ajonopeuden ylläpitämistä.

Testilenkin aikana kirjattiin kunkin kohteen haitallisuutta kuvaavia arvioita. Usein haitalliseksi arvioidussa tienkohdassa oli jonkinlainen töyssy tai reunapainauma. Monet haitallisiksi arvioidut kohdat olivat mutkissa. Joissakin kohteissa ei tuntunut minikäänlaisia epätasaisuuksia, mutta ilmeisesti ennen mutkaa ja mutkan jälkeen muuttuva sivukaltevuus on nostanut kohteet esille. Mikään testilenkin kohteista ei aiheuttanut erityisen voimakasta kallistelua tai ainakaan sellaista ei huomattu, ”tavanomais- ta” röykkytystä kyllä riitti.

Testilenkin perusteella näytti siltä, että haitallisiksi arvioidaan sellaisia kohteita, jotka eivät tuntuneet ainakaan kyseisessä ajoneuvossa haitallisilta. Kokeen onnistumisen varmistamiseksi teiden pintojen olisi oltava puhtaat, testiajoneuvo olisi instrumentoitava, kuljettajan tulisi olla kokenut (ajonopeuden ylläpito) ja testiauton tulisi olla kuormattu (korkealla oleva paino-piste nostaa kohteet helpommin havaittaviksi).



Kuva 28. Kuorma-autolla ajettu lenkki on piirretty kartalle punaisella jatkuvalla viivalla. Punaiset nuolet ovat haitallisiksi arvioituja tienkohtia.

Toinen maastokatselmus samoille kohteille tehtiin 10.9.2011 henkilöautolla. Paikannuslaitteena oli edelleen M-tiepiste ja kohteet ajettiin joko yhteen tai kahteen kertaan normaalilla tielle sopivalla nopeudella. Kohteilla otettiin myös valokuvia. Kohteet käsitellään kohde kerrallaan.

Yhteenvetona maastokatselmuksesta voidaan todeta, että tunnusluvun perusteella oli löydetty ennakkoon suunnilleen sama määrä sivuttaisheilahduskohtia kuin mitä maastossa todettiin. Toisen maastokatselmuksen yhteydessä huomattiin, että osia kohteista oli päällystetty, mikä vähensi tarkasteltavien kohteiden määrää. Toisaalta päällystäminen on osoitus siitä, että kohteilla on ollut huonokuntoisuutta.

5.2.1.1 Mt 2896

Maantien 2896 tieosa 2 on 9 km pitkä ja sillä on useita erisuuruisia nopeusrajoituksia; 40, 50, 60 ja 80 km/h. Siitä tuotettiin sekä palvelutasomittausten että heilahdustunnuslukujen 10 m arvot ja verrattiin niitä maastotarkastelussa saatuihin ongelmakohtiin. Kartalla sivuttaisheilahduskohtia oli alustavasti korin heilahdustunnusluvun P99%-raja-arvon perusteella 5 kpl. Maastokatselmuksessa (10.9.2011) todettiin, että tieosan alussa päällystettyä oli uusittu, joten siltä osin havaintoja ei voitu tehdä. Lop-

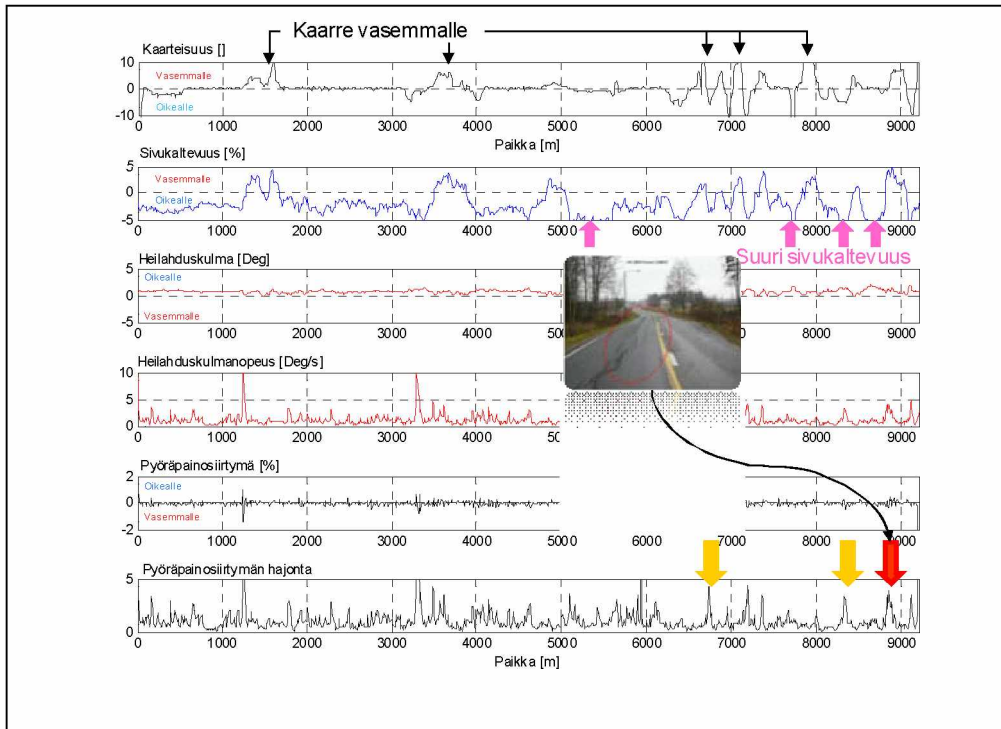
pupäässä oli kolme erittäin helposti havaittavissa olevaa kohtaa, josta yhdessä todettiin, että ajoneuvot heilahtelivat sivuttaissuunnassa selvästi.

Tarkastelusta voidaan tehdä mm. seuraavia johtopäätöksiä:

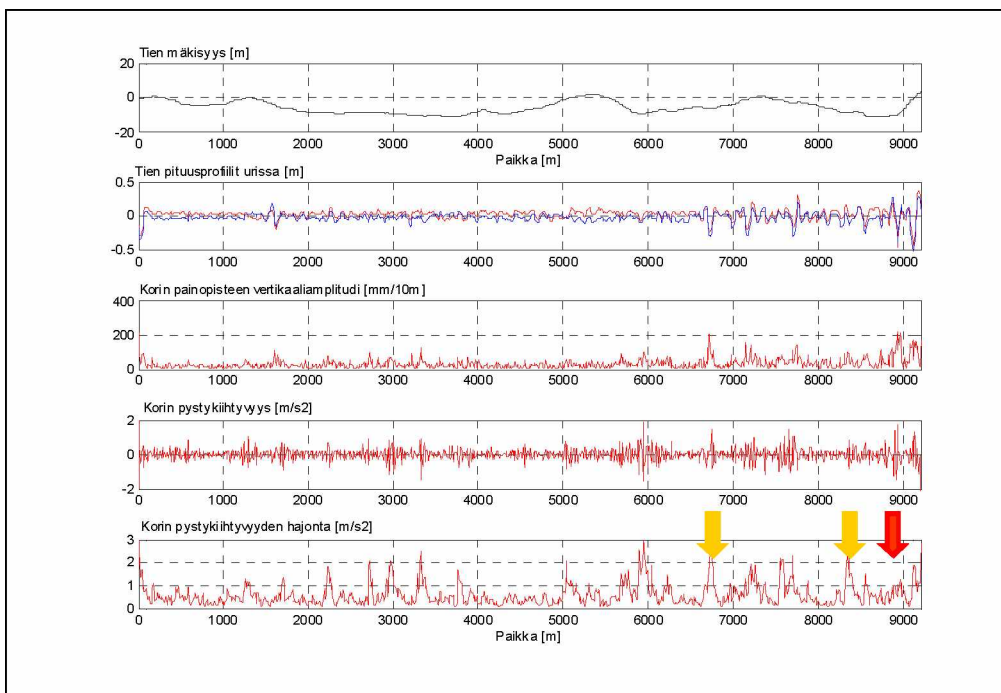
- Maastokatselmuksessa esitetyllä tieosalla oli kolme sivuttaisheilahduksia sisältävää kohtaa, joista viimeinen (8850) oli selvin ja luokiteltavissa haitalliseksi (Kuva 29).
- Mittausten mukaan tieosalla oli useita selviä sivuttaisheilahduskohtia, mutta niitä ei pystytty maastokatselmuksessa toteamaan, koska tieosan alkupää oli päällystetty.
- Selvin havaittu sivuttaisheilahduskohta oli sellainen, että osa raskaista ajoneuvoista teki ohjausliikkeen ja kiersi sen. Kiertämisen aiheuttamia ajoneuvovasteita ei pystytä laskemaan tässä työssä käytetyllä ajoneuvomallilla, mutta sillä voi olla tiellä pysymiseen liittyviä vaikutuksia varsinkin liukkailla keleillä.
- Korin heilahduskulman avulla ei pystytä erottelemaan sivuttaisheilahduskohtia. Heilahduskulmanopeudella (astetta/s) kohdat sen sijaan ovat tunnistettavissa. Pyöräpainoerossa kohdat ovat lievästi havaittavissa, mutta kaikkein parhaiten ne näkyvät sen hajonnassa (Kuva 30).
- Korin pystyliikkeiden amplitudi ja pystykiehtyvyys tunnistavat heilahduskohdat jossain määrin, mutta selvimmin kohdat näkyvät pystykiehtyvyyden hajonnassa (Kuva 31).



Kuva 29. Sivuttaisheilahduskohta maantiellä 2896 tieosalla 2 kohdassa 8850 suunnassa 1. Heilahduskohta oli helposti tunnistettavissa ja raskas ajoneuvo heilahtaa siinä selvästi. Haitallisuutta kuvaa sekin, että ajolinjat siirtyvät keskelle päin. (P.Virtala, 2011).



Kuva 30. Ajoneuvosimuloinnin sivuttaisliikkeisiin liittyviä tunnuslukuja maantien 2896 tieosalta 2 suuntaan 1. Kuva 30 on otettu kohdasta 8850.



Kuva 31. Ajoneuvosimuloinnin pystyliikkeisiin liittyviä tunnuslukuja maantien 2896 tieosalta 2 suuntaan 1.

5.2.1.2 Mt 290

Maantien 290 tieosa 009 on 5.3 km pitkä ja sen nopeusrajoitus on pääosin 80 km/h. Hurtigin diplomityössä kehitetyn koriheilahtelun ominaistajuustunnusluvun $P_{99\%}$ -raja-arvon perusteella tieosalla oli 7 sivuttaisheilahduskohtaa. Maastossa kuitenkin havaittiin, että siitä oli suurin osa päällystetty eikä vuoden 2010 mittauksiin perustu-

via tunnuslukuja voida niiltä osin käyttää. Selvä sivuttaisheilahduskohta ja reunapainuman tyyppistä profiiliongelmaa oli paaluvälillä 900–950 m (Kuva 32), jonka paikalle osuneet raskaat ajoneuvot kiersivät siirtyen keskeemmälle tietä. Kohdissa 660, 1770 ja 4730 oli myös havaittavat heilahduskohdat.

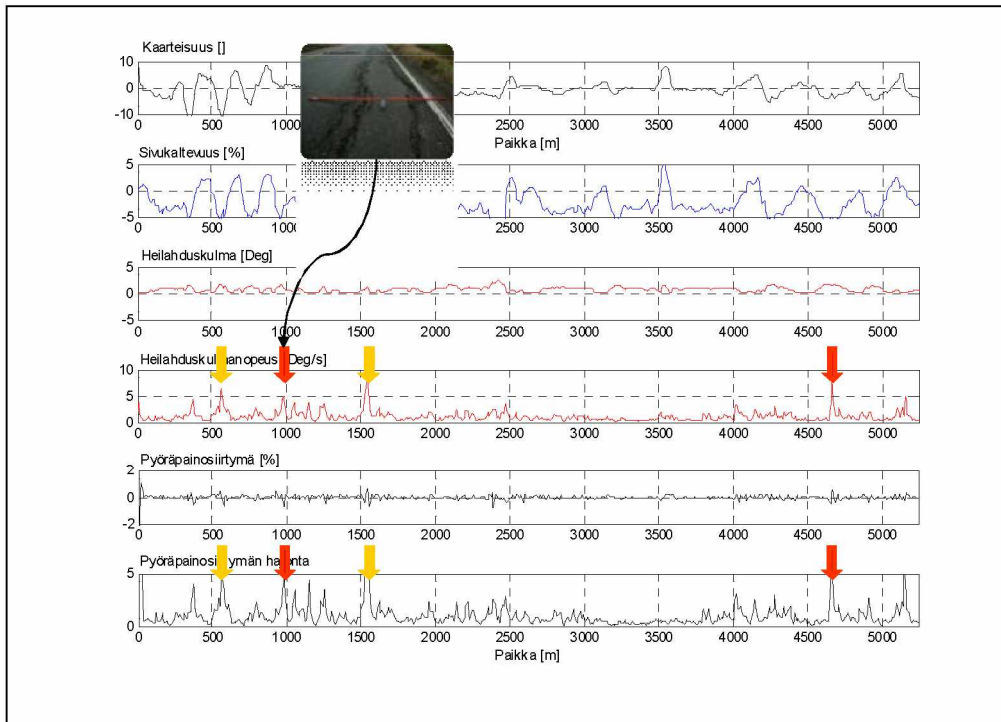


Kuva 32. Sivuttaisheilahduskohta maantiellä 290 tieosalla 9 kohdassa 920m suunnassa 1. Oikea ajoura on painunut melko paljon. Painuma on useita kymmeniä metrejä pitkä ja muistuttaa hiukan reunapainumaa, mutta oikea reuna ei ole painunut yhtä paljon kuin uran kohta. (P. Virtala, 2011).

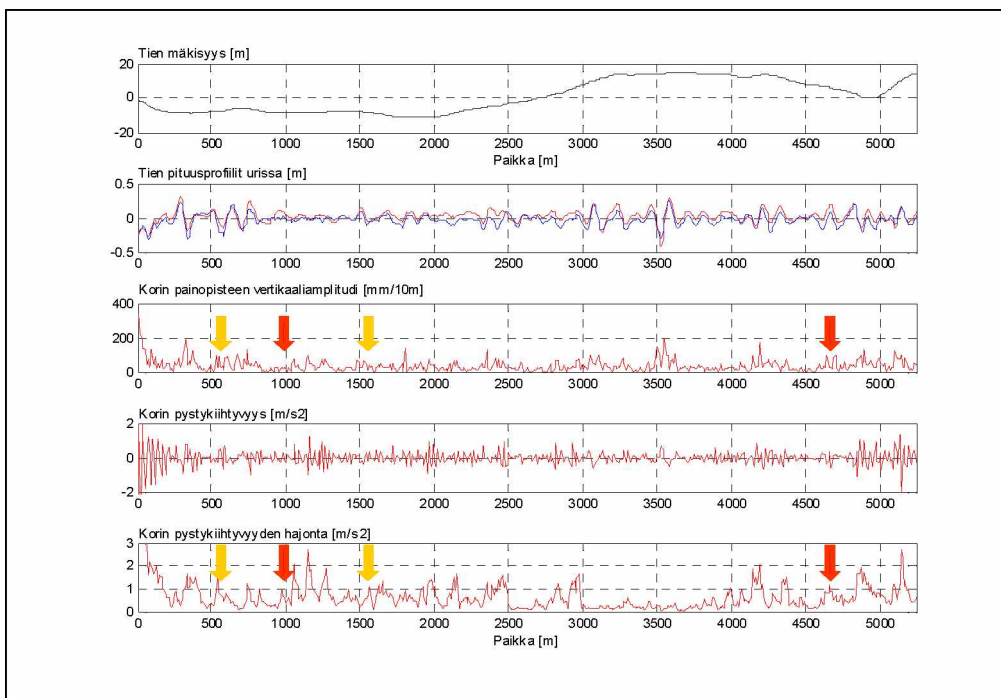
Kuvissa 33 ja 34 on esitetty eräitä ajoneuvosimuloinnissa saatavia tunnuslukuja 10 m havaintoina koko tieosalle. Ensin mainitussa kuvassa esitetään tieosan geometriaan ja sivuttaisheilauteluun liittyviä käyriä. Kuvan ensimmäinen osa kuvaa tieosan kaarteisuutta, missä positiiviset kaarteisuusarvot tarkoittavat vasemmalle kaartuvia kohtia ja negatiiviset kaarteisuusarvot oikealle kaartuvia kohtia. Niistä nähdään, että tieosalla on muutamia kaarteita, mutta enimmäkseen on suorita osuuksia.

Seuraavassa osassa on tulostettuna tieosan sivukaltevuus siten, että positiiviset arvot kuvaavat vasemmalle kallistettua kaltevuutta ja negatiiviset arvot oikealle kallistuvia kohtia. Sivukaltevuuskuva on melko samanmuotoinen kaarteisuuskuvan kanssa siten, että vasemmalle kaartuvat positiivisen kaarteisuuden kohdat omaavat vasemmalle kallistuvan positiivisen sivukaltevuuden ja oikealle kaartuvat negatiiviset kaarteet vastaavasti omaavat oikealle kallistuvan negatiivisen sivukaltevuuden. Suorilla sivukaltevuus on myös oikealle kallistuva eli negatiivinen niin kuin suunnitteluohjeissa on ohjeistettu.

Kuvan kolmannessa osassa on ajoneuvon korin sivuttaisheilahduskulma (asteina). Se on pääosin positiivinen eli oikealle kallistuva johtuen siitä, että tie kallistuu sekä suorilla että oikealle kaartuvilla osuuksilla oikealle. Negatiivisia kallistuskulmia on vähän, koska tien sivukaltevuus on melko vahvasti negatiivinen. Kallistuskulma ei tunnista sivuttaisheilahduskohtia.



Kuva 33. Ajoneuvosimuloinnin sivuttaisliikkeisiin liittyviä tunnuslukuja maantien 290 tieosalta 9 suuntaan 1. Kuva 32 on otettu kohdasta 920 m. Sivuttaisliikkeiden tunnusluvut tunnistavat maastossa havaittuja sivuttaisheilahduskohtia.



Kuva 34. Ajoneuvosimuloinnin pystyliikkeisiin liittyviä tunnuslukuja maantien 290 tieosalta 9 suuntaan 1. Kuva 32 on otettu kohdasta 920 m. Pystysuuntaisten liikkeiden tunnusluvut eivät tunnista maastossa havaittuja sivuttaisheilahduskohtia.

Neljäs osa kuvasta kuvaa heilahduskulmanopeutta (astetta/s), joka tunnistaa sivuttaisheilahduskohtia jo paremmin. Viides kuvan osa kuvaa suhteellista pyöräpainon siirtymää puolelta toiselle (oikea-vasen). Se tunnistaa sivuttaisheilahduskohtia, mutta sitä parempi tunnusluku on pyöräpainon siirtymän hajonta, jolla sivuttaisheilahduskohdat näyttäivät tunnistuvan hyvin.

5.2.1.3 Yhdystiekohteet

Janakkalan kohteissa oli kolme yhdystieluokan kohdetta, jotka olivat melko huonokuntoisia.

- Pt 13856/001: Melko huonokuntoinen yhdystie. Suuntaan 1 ajettuna sivuttaisheilahduksia tunnistettiin yhteensä 12 kpl, jotka olivat kohdissa 1900, 2900, 3100, 3800, 4000, 4200, 4450, 4700, 5700 ja 8100. Kartalla heilahduskohtia oli 14 kpl, joten lukumääräisesti tunnistettiin suunnilleen oikea määrä.
- Pt 13856/002: Tämäkin tieosa oli melko huonokuntoinen. Suuntaan 1 ajettuna siitä tunnistettiin 16 sivuttaisheilahduskohtaa, jotka olivat suunnilleen paalulukujen 600, 800, 1500, 1700, 2100, 2300, 3000, 3100, 3200, 4400, 4500, 5000, 5380, 5550, 5700 ja 5800 jälkeen. Heilahdukset eivät olleet kovin haitallisia. Kartalla heilahduskohtia oli vain 5 kpl.
- Pt 14857/003: Erittäin huonokuntoinen yhdystie. Suuntaan 1 ajettuna sivuttaisheilahduksia tunnistettiin 6 kpl, jotka olivat paalujen 10, 20, 30, 4000, 4260 ja 4460 jälkeen. Suuntaan 2 ajettuna sivuttaisheilahduksia tunnistettiin niin ikään 6 kpl ja ne sijaitivat paalujen 1500, 2500, 2980, 3000, 3400 ja 4200 jälkeen. Kartalla heilahduskohtia oli 9 kpl.

Yhdysteiden sivuttaisheittojen tunnistamiseen simuloimalla liittyy eräitä hankaluuksia. Yhdysteiden geometria on usein niin pienimuotoista, että ajonopeudet ovat 50–60 km/h. Yhdysteiden varsilla on myös taajamien omaisia kohtia, joissa nopeusrajoitus on alhainen. Nopeusrajoitukset kuitenkin vaihtelevat usein 50–80 km/h välillä. Liian suuren nopeusrajoituksen käyttäminen simuloinneissa tuottaa suuria vasteita, mikä ei vastaa käytännön tilannetta. Erityisesti yhdysteiden kohdalla olisi tarpeen kehittää simulointeja siten, että niissä huomioitaisiin muuttuvat nopeusrajoitukset. Toistaiseksi simulointi toimii vakiovälisessä aika-avaruudessa, ts. simulointi etenee vakioaikaväleihin. Tämä ei mahdollista nopeusrajoituksen vaihtamista kesken simuloinnin.

5.2.2 Muut Uudenmaan alueen kohteet

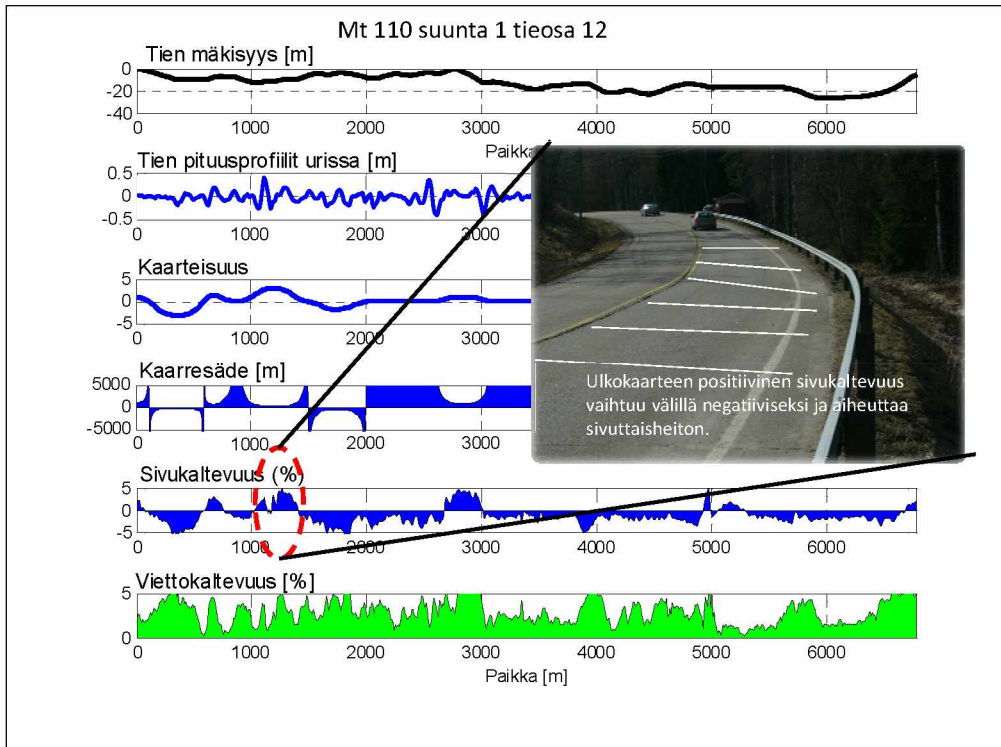
Uudenmaan alueelta valitut seututeihin kuuluvat kohteet olivat mt 125, mt 167, mt 110, mt 112, mt 1050, mt 1081, mt 1244, mt 1322. Osa kohteista oli tämän työn kannalta hyviä kohteita, mutta osa taas ei. Kohteiden käyttökelpoisuutta rajoittivat tien geometrian pienimuotoisuus, taajama-alueet, korjatut tienkohdat tai maastokatselmuksen aikaan luminen pinta ja tällaiset kohteet jätettiin pois jatkotarkastelusta.

Parhaita kohteita olivat maantien 110 tieosa 12 ja maantien 112 tieosa 1.

5.2.2.1 Mt 110

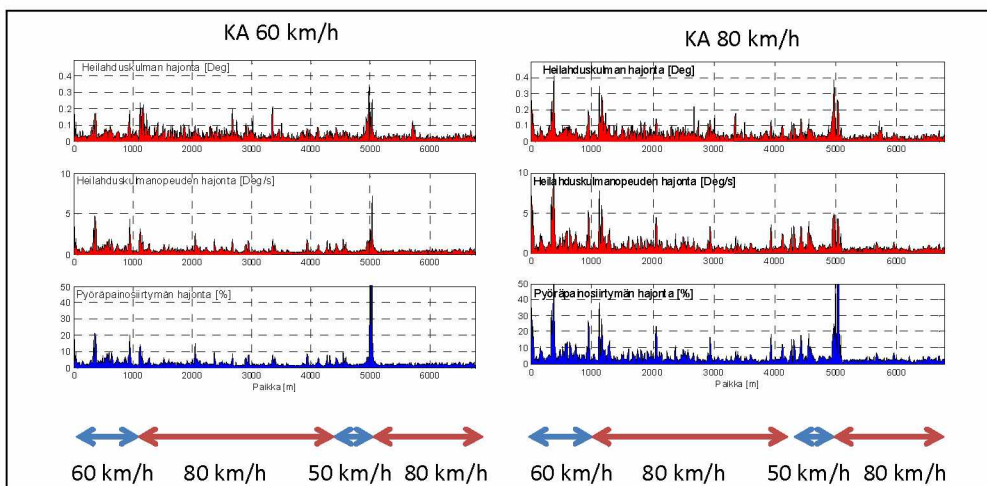
Maantiellä 110 on useita tieosia, joilla sivukaltevuus vaihtelee aiheuttaen sivuttaisheilautelua. Tieosalla 12 on kaksi selvää sivukaltevuuden heilahduskohtaa. Kohdassa 350 m sivukaltevuus on oikealle kaartavassa tien kohdassa paikoin suuri ja aiheuttaa sivuttaisheilautelua. Kohdassa 1150 on kaarre vasemmalle, jossa positiivinen vasem-

malle viettävä sivukaltevuus vaihtuu kesken kaartein noin nollaan ja aiheuttaa melko suuren sivuttaisheilahduksen. Kohdassa on 60 km/h nopeusrajoitus ja kuoppaa osoitava liikennemerkki (Kuva 35). Kohdassa 5000 maantie 110 liittyy vanhaan vt 1:een (T-liittymä), josta on tullut maantien 110 jatke. T-liittymässä on 90 asteen kulma ja se näkyy simuloinneissa suurina vasteina. Todellisuudessa liittymän läpi ei voida ajaa pysähtymättä, joten simuloinnin tulokset ovat sillä kohdalla epärealistisia.



Kuva 35. Maantien 110 tieosan 12 pituusprofiilista mitattuja tietoja.

Heilahduskulman, heilahduskulmanopeuden ja suhteellisen pyöräpainoeron hajonnat tunnistavat kaikki yllä mainituissa kohdissa olleet sivukaltevuusvaihtelut (Kuva 36). Kuvassa 36 nähdään ajonopeuden vaikutus tuloksiin. Suurempi nopeus kasvattaa heilahdeluja ja niiden vaihtelua. Tämä tieosa on hyvä esimerkki siitä, että tieosa tulisi simuloida useilla eri nopeuksilla.



Kuva 36. Maantien 110 tieosan 12 simulointituloksia kahdella eri simulointinopeudella.

5.2.2.2 Mt 112

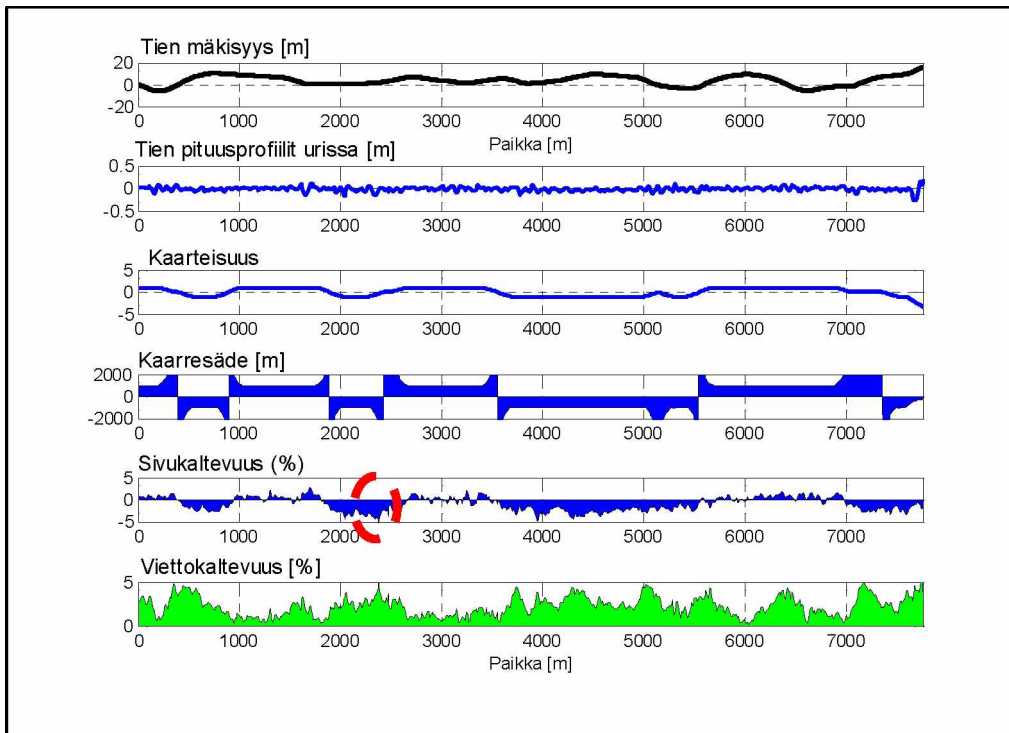
Alustavasti oli tiedossa, että maantiellä 112 on sivukaltevuuden heilahduskohta tieosalla 1. Maastokäynnin perusteella todettiin, että kyseinen sivukaltevuuden vaihtelu-kohta oli kakkossuunnassa kohdassa 5300–5330. Paikallinen maatilan isäntä tiesi kertoa, että sama heilahduskohta on ollut siinä jo noin 30 vuotta. Molemmat tieosat mitattiin molempiin suuntiin ja niille suoritettiin maastokatselmus. Kohteilla oli useita juuri ja juuri havaittavia sivuttaisheilahduskohtia, mutta ainoastaan yksi selvästi havaittava ja haitallinen kohta. Maastokäynnin yhteydessä havaittiin, että useat ajoneuvot väistävät kyseistä kohtaa vastaantulevien kaistalle (Kuva 37). Mm. yksi moottoripyöräilijä ja yksi täysperävaunurekka väistivät kokonaan vastaantulevien kaistalle. Henkilöautot ajoivat yleensä keskiviivan tuntumassa. Kyseistä kohtaa oli korjattu paikkaamalla.



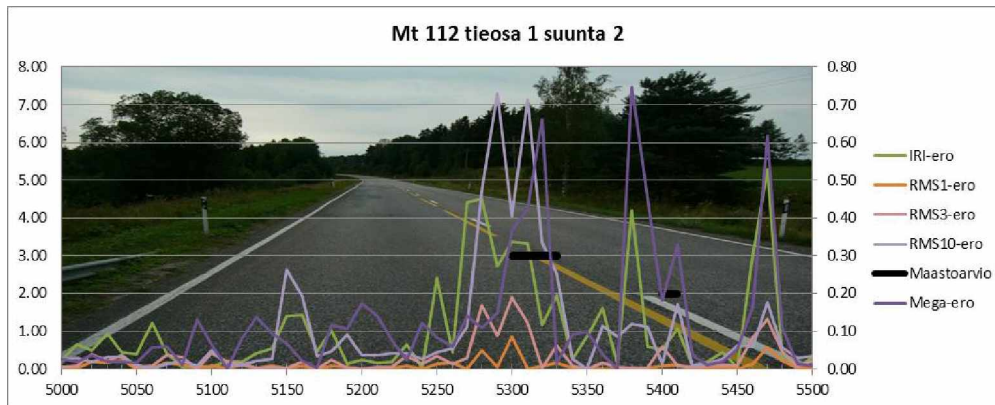
Kuva 37. Sivuttaisheilahtelua aiheuttava kohta maantiellä 112 tieosalla 1 kohdassa 5300–5330. Pinnan korkeusvaihtelut eivät näy valokuvassa kovin hyvin.

Kohteen perustiedot on esitetty profiilikuvina kuvassa 38. Kuvassa sijaintia kuvaava paaluluku on käänteinen eli kuvaa ajosuunnan etenemistä tieosan lopusta lähtien. Kohteen mäkisyys ja geometria ovat suhteellisen normaaleja. Pituusprofiilissa on tyypillistä vaihtelua, josta ei pysty suoraan tulkitsemaan kohteen mahdollisista ongelmista. Sivukaltevuus vaihtelee myös normaalisti eikä siitä pysty päättämään onko sivukaltevuudessa ongelmia. Kuvaan on merkitty maastossa havaittu ongelmakohta paalulle 2300, joka vastaa tierekisterin kasvusuuntaan mentäessä kohtaa 5300.

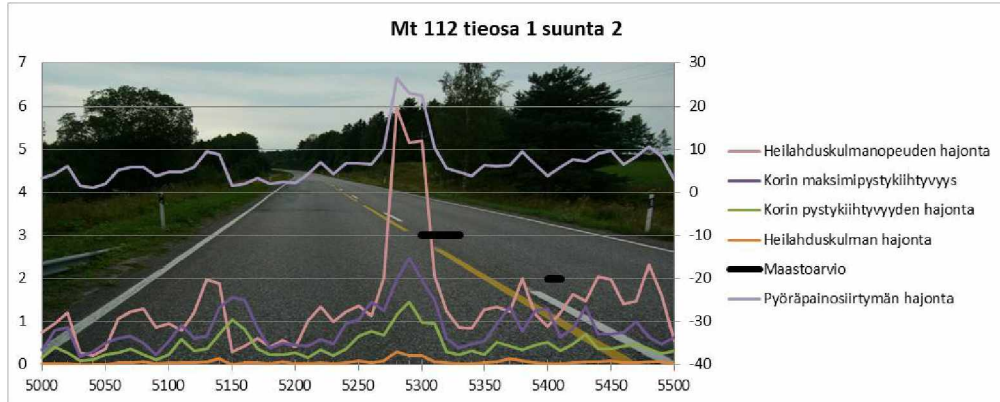
Ongelmakohta on otettu tarkempaan tarkasteluun kuvissa 39 ja 40. Kuntomittauksista on tuotettu uusia muuttujia, joissa Megakarkeuden, IRI:n, RMS1:n, RMS3:n ja RMS10:n ajourien vasemman ja oikean uran informaatiosta on tuotettu eromuuttujia, jonka arvellaan kuvaavan poikkisuunnan epäsäännöllisyyttä. Maastoarvion ongelmakohtat on kuvattu mustalla viivalla.



Kuva 38. Maantien 112 tieosan 1 kakkossuunnan mittaustietoja profiileina. (Huom paikka alkaa tieosan lopusta eli nollapaalu kuvaa loppukohtaa).



Kuva 39. Maantien 112 tieosan 1 kakkossuunnan kuntomittauksista tuotettujen poikkisuuntaisten eromuuttujien profiilit paaluvälillä 5000–5500.



Kuva 40. Maantien 112 tieosan 1 kakkossuunnan simuloinneista tuotettujen ajoneuvovasteiden paaluvälillä hajonnat 10 m jaksoilla 5000–5500.

5.3 Tunnuslukujen tunnistuskyky

5.3.1 Tunnistuskyvyn maksimointi

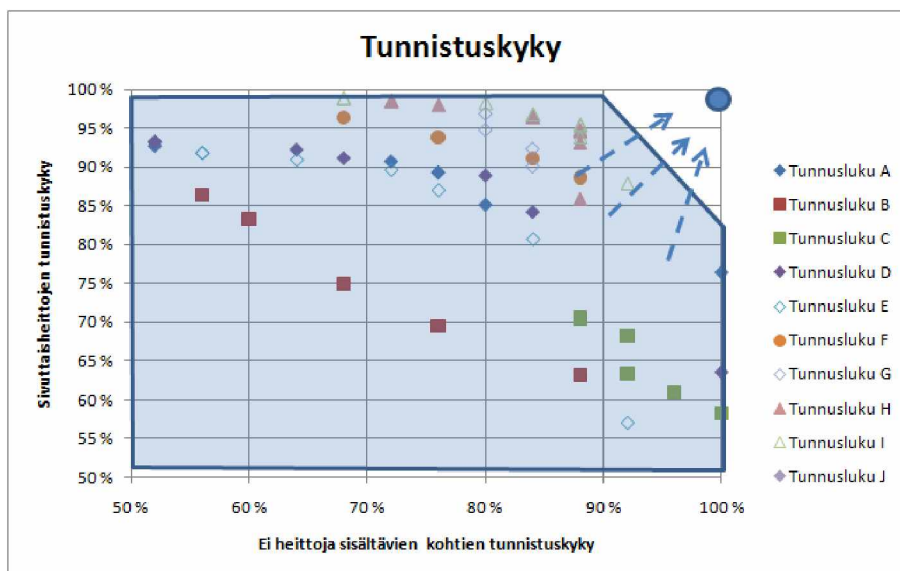
Tunnuslukujen tunnistuskykyä arvioitiin kalibroimalla kunkin tunnusluvun raja-arvo siten, että sen tuottama sivuttaisheiladuskohtien tunnistuskyky maksimoitui. Tunnistuskyvyssä otettiin huomioon sekä tunnistettavia sivuttaisheiladuksia sisältäneiden 10 metristen tunnistuskyky että niitä sisältämättömien kohtien tunnistuskyky. Näin välttyttiin siltä ongelmalta, joka usein tulee eteen tunnuslukuja ja niiden raja-arvoja valittaessa, että tunnusluku tunnistaa pienen raja-arvonsa avulla hyvin ongelmakohdat, mutta tuottaa samalla paljon ns. vääriä positiivisia tuloksia eli tunnistaa ongelmattomia kohtia ongelmallisiksi. Tämä väärin positiivisten kohtien tunnistuminen on ongelmallinen sen takia, koska se johtaa väärin kohteiden ohjelmointiin ja ennen aikaistaa päällystyskohteita, mikä puolestaan aiheuttaa budjettirajoitustilanteissa tarpeellisten päällystyskohteiden viivästymistä.

Kalibroinnin lähtötietoina olivat valittujen maastokohteiden kohteet ja niiltä käytössä olleet maastoarvot sekä kuntodata ja sen avulla suoritettujen ajoneuvosimulointien vastedata. Maastokohteiden lopullinen lukumäärä oli 7 tieosaa, jotka käytiin arvioimassa. Maastoarviona tuotettiin sivuttaisheilahtelulle kolme luokkaa, jotka kuvaavat sivuttaisheilahtelun vakavuutta. Luokka 1 kuvaa sellaista sivuttaisheilahtelukohtaa, joka on juuri ja juuri henkilöautolla ajettaessa havaittavissa, mutta ei ole epämukava eikä haitallinen. Luokka 2 kuvaa sellaista kohtaa, joka on selvästi henkilöautolla ajettaessa havaittavissa, mutta ei ole haitallinen ja luokka 3 kuvaa sellaista kohtaa, joka on paitsi selvästi havaittavissa myös selvästi haitallinen. Näitä luokkia kuvattiin aiemmin esitetyissä kuvissa alaspäin osoittavilla leveillä nuolilla, joilla oli värikoodit vihreä, keltainen ja punainen.

Koska maastokatselmus tehtiin vain yhdellä ajoneuvolla ja vain yhden arvioijan mukaan, se on hyvin subjektiivinen. Luokan 1 tunnistustarkkuus on melko huono, koska arvioijan on melko hankala pysyä niin tarkkaavaisena, että pystyisi joka hetki olemaan valppaana sen suhteen, sisälsikö ajettu kohta havaittavan heilahduksen vai ei. Sitä luokkaa ei käytetty tunnistuskyvyn määrittämiseen. Sillä on kuitenkin se käyttöarvo, että sen avulla nähdään minkä suuruisia heilahduksia ajoneuvon kuljettaja pysyy juuri ja juuri erottelamaan, vaikkakin kovin epäluotettavasti. Maastokatselmuksen

pääasiallinen tulos oli löytää kohteilta sellaiset sivuttaisheilahduskohdat, jotka ovat selvästi havaittavissa eli luokat 2 ja 3. Tunnuslukujen tulee pystyä tunnistamaan nämä kohdat. Ei luonnollisesti haittaisi, jos tunnusluku havaitsisi myös sellaiset kohdat, joilla juuri ja juuri on havaittavissa sivuttaisheilahdus, mutta sitä vastaavaa raja-arvoa ei pystytä asettamaan johtuen maastokatselmuksen epätarkkuudesta.

Tunnistuskyvyn määrittämisperiaatetta on kuvattu kuvassa 41. Kunkin tunnusluvun tunnistuskykyä lasketaan erisuuruksilla raja-arvoilla. Se, raja-arvo ja se tunnusluku, joka tuottaa lähimpänä oikeaa ylänurkkaa olevan pisteen on tunnistustarkkuudeltaan paras.



Kuva 41. Tunnistuskyvyn määrittämisperiaate. Kunkin tunnusluvun raja-arvoa muutetaan hakien sellaista kohtaa, missä tunnistuskyvyn mukainen koordinaatti on lähimpänä oikean yläkulman ideaalipistettä.

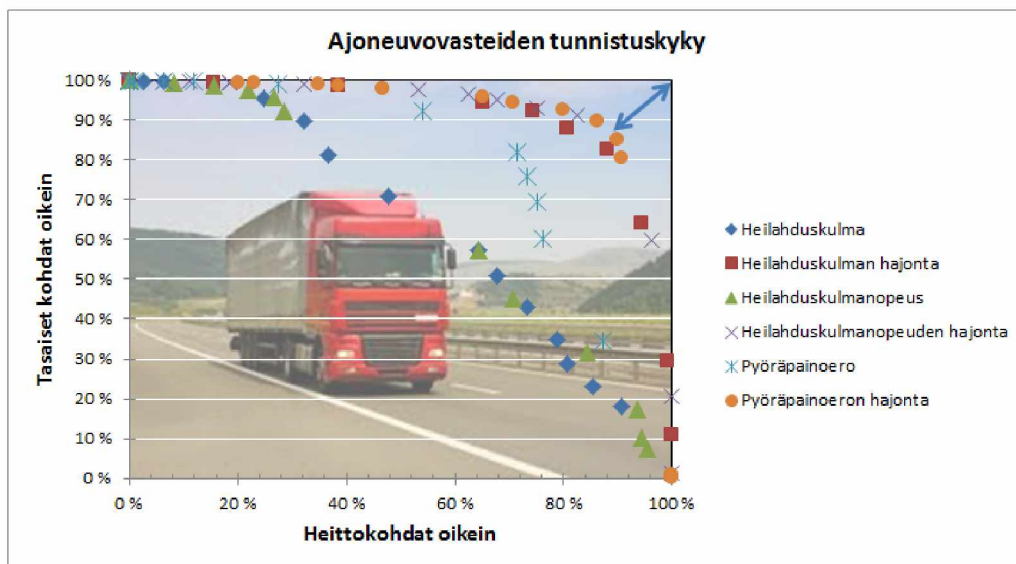
Maastokatselmuksen luokan 3 tietoa voidaan käyttää siihen tarkoitukseen kun arvioidaan millä tunnusluvun raja-arvolla havaittu kohta on tien käyttäjän mukaan selvästi haitallinen. Tämä tilanne tulee eteen vasta sitten kun paras tunnusluku on ensin valittu ja sen käyttöönottoa suunnitellaan.

5.3.2 Tunnuslukujen paremmuus ja raja-arvot

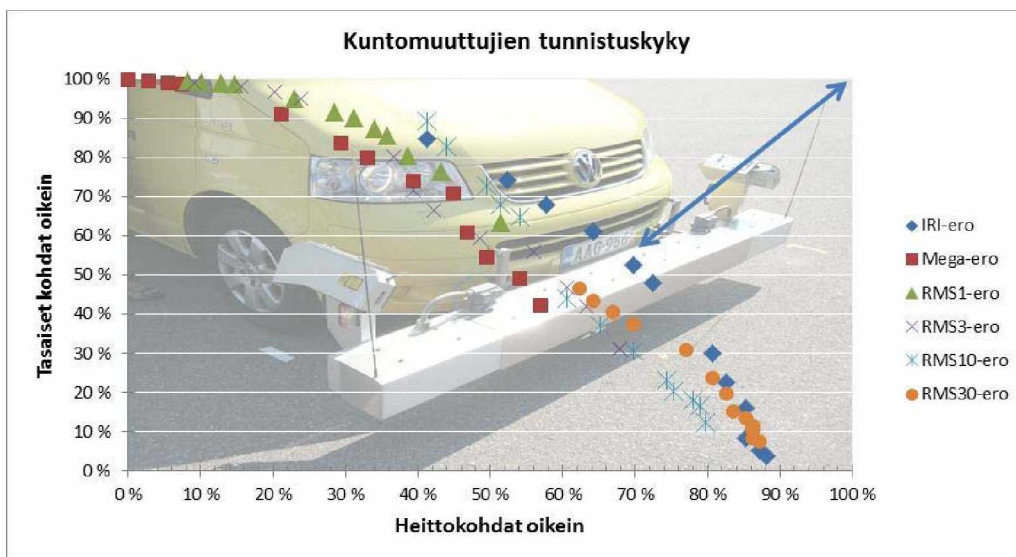
Ajoneuvovasteiden sivuttaisheittojen tunnistuskkyky on esitetty kuvassa 42. Sivuttaisheittoiksi otettiin mukaan kaikki havaitut heitot ts. myös lievät juuri ja juuri havaittavat sivuttaisheitot. Sivuttaisheittoja sisältävien kohtien tunnistuskkyky on kahden osan summa. Toisaalta piti tunnistaa ongelmakohdat ja toisaalta sitten ongelmia sisältämättömät kohdat. Paras tunnistuskkyky oli suhteellisen pyöräpainoeron hajonnalla. Melkein yhtä hyvään tunnistuskkykyyn ylsivät heilahduskulmanopeuden hajonta ja itse heilahduskulman hajonta. Heilahduskulman ja sen nopeuden itseisarvojen tunnistuskkyky oli melko huono.

Kuntomuuttujista laskettujen tunnuslukujen tunnistuskkyky oli melko huono. Parhaimmaksi niistä osoittautui ajourien IRI_{10} -ero.

Pyöräpaineeron hyvä sivuttaisheittojen tunnistamiskyky on sikäli loogista, että pyöräpainot seuraavat ajourissa tien profiilia ja niihin vaikuttaa ajoneuvon korin heilahtelu. Pyöräpaineo itsessään vaihtelee staattisen arvon molemmin puolin ja siitä on hankalaa tunnistaa haettavia kohtia, mutta hajonta puolestaan reagoi pyöräpaineojen vaihteluun ja tuottaa tunnistettavan vasteen.



Kuva 42. Ajoneuvovasteiden tunnistuskyky kun tunnistetaan kaikkia sivuttaisheitlahduksia.

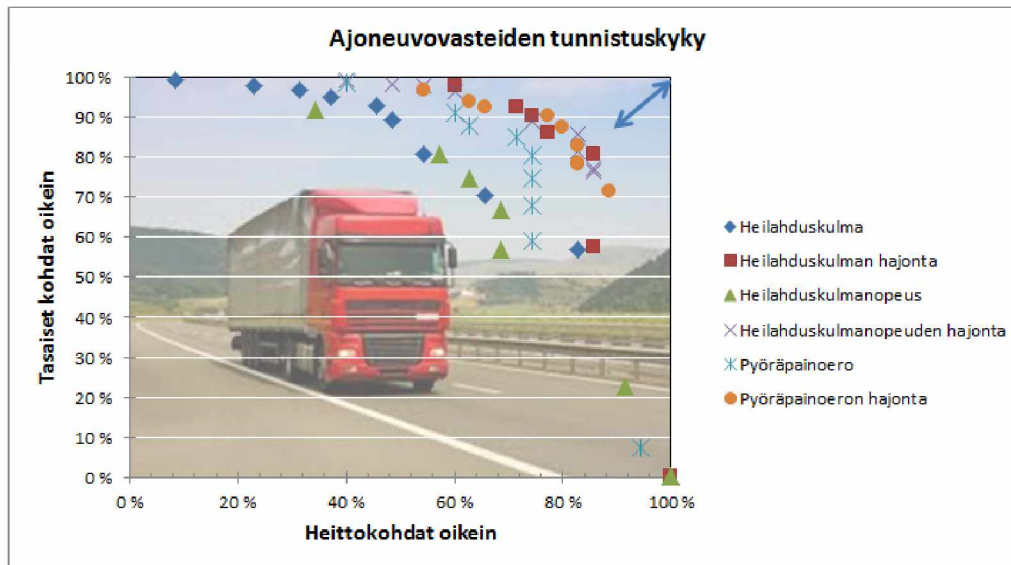


Kuva 43. Kuntomuuttujien tunnistuskyky kun tunnistetaan kaikkia sivuttaisheitlahduksia.

Taulukko 12. Tunnuslukujen tunnistuskyvyn paremmuus.

Järjestys	Tunnusluku	Raja-arvo	Tunnistuspuute
1	Pyöräpainsiirtymän hajonta	9 %	17 %
2	Heilahduskulmanopeuden hajonta	2 astetta/s	20 %
3	Heilahduskulman hajonta	0,07 astetta	21 %
4	Pyöräpainsiirtymä	0,7 %	34 %
5	IRI-O-V-ero	0,6 mm/m	53 %
6	Heilahduskulmanopeus	0,2 astetta/s	56 %
7	Heilahduskulma	0,8 astetta	56 %
8	RMS10-O-V-ero	0,6 mm	57 %
9	RMS1-O-V-ero	0,05 mm	61 %
10	RMS3-O-V-ero	0,1 mm	62 %
11	Mega-ero	0,1 mm	62 %
12	RMS30-O-V-ero	1,3 mm	65 %

Kuvassa 44 on esitetty ajoneuvovasteiden tunnistuskyky kun tunnistetaan vain selvästi havaittavia sivuttaisheilaittoja. Tunnistuskyky on hiukan edellistä kuvaa heikompi. Tunnistuskykykäyrät eivät ole kovin tasaisia, mikä johtuu havaintojen vähäisyydestä.



Kuva 44. Ajoneuvovasteiden tunnistuskyky kun tunnistetaan selvästi havaittavia sivuttaisheilaittoja (maastotarkastelussa luokat 2 ja 3).

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

6.1 Yhteenveto

Tien sivukaltevuuspuutteiden selvittämisessä on kolme eri osaa, jotka liittyvät ajoneuvojen kaarekäyttäytymiseen, tien kuivatukseen ja yksittäisiin kaltevuusvaihteluihin. Sivukaltevuuspuutteiden määrittäminen tapahtuu kunkin erikoistapauksen kohdalla eri menettelyllä. Tiet on suunniteltu maastoon sopiviksi suorien, siirtymäkaarten ja ympyrän kaarten avulla. Teiden sivukaltevuus on suorilla kaksipuolinen ja kaarteissa yksipuolinen tukien ajoneuvojen tiellä pysymistä. Vasemmalle kaartuvilla siirtymäkaarilla sivukaltevuus muuttuu suoran negatiivisesta sivukaltevuudesta kaarteeseen positiiviseksi sivukaltevuudeksi. Tien tavoitteellinen sivukaltevuus on siten sidoksissa sen geometristen elementtien vaihtumiskohtiin. Kuivatuksen kohdalla sivukaltevuutta tulee tarkastella yhdessä pituuskaltevuuden kanssa. Sivukaltevuustarkasteluista tulee siten koko tien geometrian kattavaa.

Tien sivukaltevuustieto mitataan palvelutasomittausten yhteydessä, kun mitataan koko kaistan poikki- ja pituusprofiili. Rekistereihin talletettava sivukaltevuustieto on ns. regressiokaltevuus, joka on poikkisuunnassa saatujen mittaushavaintojen lineaarisen regressiosovituksen kaltevuus. Muita mahdollisia sivukaltevuuden laskentalgoritmeja ovat urien pohjista laskettu sivukaltevuus ja päällysteen pinnasta laskettu sivukaltevuus. Sivukaltevuustieto tuotetaan muiden geometriamuuttujien tapaan 50 m keskiarvoina.

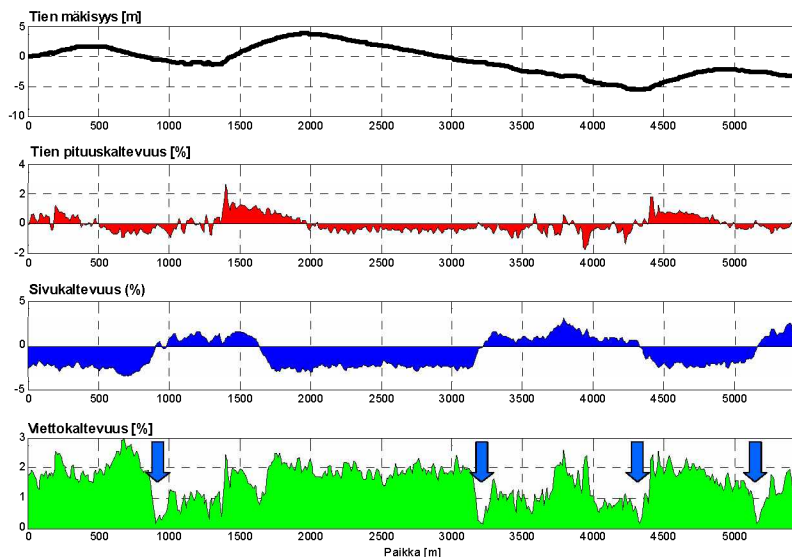
Sivukallistelun laskemiseen tarvitaan vähintään 4 vapausasteen ajoneuvomallia, joka tuottaa pystyliikkeitä ja heilahdusliikkeitä sekä pyöräpainot ja niiden avulla laskettavat tiersitukset. Tässä selvityksessä käytettiin kaksiakselista 7 vapausasteen täysautomallia. Ajoneuvona oli kuorma-auto (ilman perävaunua). Muut ajoneuvovaihtoehdot olisivat voineet olla henkilöauto, pakettiauto tai linja-auto. Simuloinnit pyrittiin tekemään käyttäen sitä nopeutta, joka kullakin tieosalla pääasiassa vallitsi. Ajoneuvon sivukallistelua kuvaavia laskennasta saatavia vasteita ovat sivuttaisheilatelukulma, sen nopeus ja kiihtyvyys sekä suhteellinen pyöräpainoero. Haitallisten sivuttaisheilakohdientunnistaminen ei onnistunut kovin hyvin suorilla vastemuuttujilla. Vasteiden kymmenmetrisille laskettu vaihtelua kuvaava hajonta oli merkittävästi parempi muuttuja. Paras ajoneuvovasteista tuotettu tunnusluku sivuttaisheittojen tunnistamisessa oli suhteellisen pyöräpainoeron hajonta. Tunnistuskkyä arvosteltiin ns. tunnistuspuutteen avulla. Tunnistuspuute oli pienimmillään 17 %, kun suhteellisen pyöräpainoeron hajonnan raja-arvona oli 9 %. Muiden tunnuslukujen tuottama tunnistuspuute oli suurempi.

Sivukaltevuusheittojen tunnistamiseen kokeiltiin myös tietunnuslukuja, jotka oli muodostettu oikean ja vasemman ajouran eroista. Tietunnuslukuja olivat IRI, sekä lyhytaaltoiset RMS-muuttujat RMS1, RMS3 ja RMS10. Tietunnuslukujen sivuttaisheittojen tunnistuskky ei yltänyt ajoneuvosimuloinnista saatujen tunnuslukujen tasolle. Paras tietunnuslukuista oli oikean ja vasemman ajouran IRI-ero, jolla tunnistuspuute oli 53 %.

Ajoneuvojen kaarekäyttäytymistä voidaan laskea myös ajoneuvomallilla dynaamisesti. Tällöin tarvitaan myös kaarteisuustietoa. Mitattua kaarteisuustietoa ei voi käyttää sellaisenaan, vaan sitä tulee ensin suodattaa, jotta siitä saadaan laskettua riittä-

vän vakaana pysyvä kaarresäde. Kaarevuus voidaan suodattaa kolmen havainnon liukuvana keskiarvona, jolloin siitä tasaantuu liian suuri vaihtelu pois. Saatu kaarevuustieto muunnetaan kaarresäteeksi ja sitä käytetään mm. ajoneuvosimuloinneissa sivukiihtyvyyksien laskennassa. Tieosien aluissa saattaa olla joskus suuria kaarevuuksia, koska mittaus on aloitettu edellisen tieosan aikana ja uusi tieosa saattaa alkaa T-liittymästä tai tieosan alkuosassa saattaa olla jyrkkiä ohjausliikkeitä vaativia kohtia. Kaarrekäyttäytymiseen sovellettavan ajoneuvomallin tulee olla monipuolisempi niin, että se ottaa huomioon pystyliikkeiden lisäksi myös sivuttaisliikkeitä. Tällaista ei tässä selvityksessä ollut mahdollista kehittää.

Kuivatuksen toimivuuden tarkasteluun kokeiltiin viettokaltevuu- den laskemista (kuva 45). Viettokaltevuus laskettiin sivukaltevuuden ja pituuskaltevuuden avulla. Tunnusluvuksi laskettiin 10 m matkalle laskettu keskiarvo. Tien pinnan kuivatustarkasteluihin sopii viettokaltevuus, missä etsitään sellaisia tien kohtia, joissa sen arvo on lähellä nollaa. Pituus- ja sivukaltevuustietoina käytettiin ajoneuvon kokemia kaltevuuksia, joiden laskemisessa käytettiin akselivälin pituutta ja raideväliä. Tarkastelun lähtötiedoiksi sopii toki ajoneuvosta riippumaton yhden metrin välein mitattu tieto myös.



Kuva 45. Tien pinnan kuivatuspuutteita voidaan tarkastella viettokaltevuu- den avulla. Pituuskaltevuuden ja sivukaltevuuden avulla muodostetaan ve- den virtaussuuntaa kuvaava viettokaltevuus.

6.2 Johtopäätökset

Tien sivukaltevuuden tarkastelussa joudutaan ottamaan huomioon kolme eri näkökulmaa, jotka edellyttävät erilaisia analyysejä. Sivuttaisheilautelujen aiheuttamia vaaran paikkoja tulee tarkastella simuloimalla ajoneuvon liikkeitä mitatulla tieprofiililla. Kaarteissa tarvittavan sivukaltevuuden riittävyttä tulee tarkastella myös simuloimalla ajoneuvon liikkeitä mitatulla tieprofiililla, mutta tarvittava ajoneuvomalli on monimutkaisempi. Tien pinnan kuivatustarkasteluihin riittää pelkkä viettokaltevuu- den laskeminen.

Toistaiseksi tien sivukaltevuustarkasteluihin on käytettävissä 7 vapausasteen pystyliikemalli (Ride malli), jolla tuotetaan kaksiakselisen, nelipyöräisen ja jäykkäkorisen ajoneuvon pysty-, sivuheilahdus- ja nyökkimisliikkeitä sekä pyöräpainoja. Ajoneuvo voi olla henkilö-, paketti-, linja- tai kuorma-auto. Tarkasteluihin riittää PTM-autoilla 10 cm:n laskentavälille tuotettu tieprofiilitieto. Laskijan on valittava ajoneuvotyyppi ja simulointinopeus. Simuloinnista on tuotettavissa suhteellisen suuri määrä tuloksia, joista kannattaa laskea kaikki, mutta valikoida vain osa toimitettavaksi Liikenneviraston tietorekistereihin. Sivuttaisheilahtelun lisäksi kannattaa tarkastella ajoneuvon kaikkia liikesuuntia ja ajatella sen käyttäytymistä kokonaisuutena. Tällöin 7 vapausasteen malli on minimi.

Tarkastelu kannattaa keskittää pääteille ja seututeille, koska simulointinopeus voidaan pitää vakiona. Yhdysteillä nopeusrajoitukset vaihtuvat ja geometria on niin pienimuotoista, että väärä simulointinopeus tuottaa liian suuria vasteita. Simuloinnit on luontevaa tehdä tieosa kerrallaan.

Ajoneuvosimulointi on suhteellisen vähän käytetty alue tienpidon tarkasteluissa ja siinä on monia kehittämismahdollisuuksia. Tärkeimpiä kehittämiskohtia ovat seuraavat:

- Simuloinnit tulisi kääntää aikadimensiosta matkadimensioon, jotta voitaisiin käyttää tiellä olevia todellisia nopeusrajoituksia ja antaa sen vaihdella simuloinnin kuluessa. Matkadimensioon siirtyminen pitää simuloinnin liikeyhtälöiden ratkaisuympäristön lineaarisena, mikä nopeuttaa ja helpottaa laskelmien tekemistä.
- Tieosien alkukohtien vasteet kasvavat yleensä suuriksi ja se tulisi eliminoida joko alhaisemmalla simulointinopeudella tai sitten simuloinnin käynnistämällä jo edellisen tieosan aikana.
- Pystyliikkeiden simulointiin olisi mahdollista liittää staattinen kaarresimulointi, mutta se edellyttäisi kaarevuustiedon parempaa suodattamista. Kaarresimulointi tuottaisi sivukaltevuustarkastelun kaarteissa, mutta ei olisi kuitenkaan dynaaminen.
- Dynaaminen kaarresimulointi edellyttäisi monimutkaisempaa mallia, joka olisi seuraava kehitysaskel mallin kehittämisessä.
- Ajoneuvovasteiden käyttö edellyttäisi kattavampaa vertailua maastossa havaittavaan tietoon. Maastotieto (huonot tienkohdat) tulisi kartoittaa tarkemmin usean eri arvioijan tuloksena. Tällöin oikea tosimita voisi olla useamman arvioijan yhteistulos.
- Ajoneuvovasteita kannattaisi tutkia onnettomuustietojen kanssa yhdessä.
- Ajoneuvovasteet ovat hyvin kiinteässä yhteydessä ns. yleistavoitteisiin turvallisuus, taloudellisuus, mukavuus ja ylläpidettävyyys, ja sitä yhteyttä tulisi kehittää enemmän. Ajoneuvovasteiden tuottamalla informaatiolla on kytkentä tien parantamisen vaikutuksiin ja sitä kautta kannattavuusanalyysiin.
- Tiellä liikkuu erityyppisiä ajoneuvoja useilla eri nopeuksilla. Pitäisi tarkastella enemmän sitä, mille tilanteille laskelma tulisi tehdä, jotta sillä haettavat tulokset olisivat käyttökelpoisimmat. Ajoneuvojen jousitusominaisuudet toisaalta autokannan uusiutumisen myötä paranevat mutta toisaalta taas vanhetessaan heikkenevät.

- Raja-arvoja tulisi tarkastella suuremmalla aineistolla ts. tuottaa enemmän laskelmia ja tarkastella niistä saatuja vasteiden jakaumia erilaisissa olosuhteissa (tieluokat). Raja-arvona voi periaatteessa toimia yksi arvo kaikille tieluokille, koska parempiluokkaisilla teillä ajetaan suuremmilla nopeuksilla ja vasteet muodostuvat siten suuremmiksi kuin alhaisen nopeuden tieluokilla. Tällöin tieluokan nopeus ikään kuin säätelisi raja-arvon kriittisyyttä. Tätä hypoteesiä tulisi tutkia enemmän.

Ajoneuvon kaarekäyttäytymisen simuloinnissa tarvitaan monimutkaisempi malli. Mallin puuttuessa yhtenä välivaihtoehtona on tehdä staattisia tarkasteluja kaarteissa tarvittavasta sivukitkasta. Tällöin voitaisiin käyttää luvussa 4.3 esitettyjä kaavoja.

Tien kuivatuksen kannalta sivukaltevuutta kannattaa tarkastella yhdessä tien geometrian ja erityisesti pituuskaltevuuden kanssa. Kuivatuksen toimivuutta kuvaa viettokaltevuus, joka muodostetaan sivukaltevuuden ja pituuskaltevuuden avulla. Viettokaltevuuden tulisi olla joka paikassa suurempi kuin nolla. Minimivaatimus riippuu päällysteen tyypistä, karkeudesta ja päällysteessä olevista epätasaisuuksista.

Kuivatuspuutteita tulisi tarkastella erikseen hakemalla sellaisia kohteita, joissa vesi näyttää kertyvän tielle sateen jälkeen ja vertaamalla kertyneen veden määrää viettokaltevuuteen. Viettokaltevuus saa yleensä pieniä arvoja tasaisilla suorilla, siirtymäkaarilla ja pyöristyskaarien taitepisteissä.

Ajoneuvosimulointien yhteydessä tuotetaan viettokaltevuudelle arvot, jotka keskiarvoistetaan 10 m laskentavälille, mutta viettokaltevuuden laskentaan riittäisi myös esim. 1 m lähtötiedoista tehty laskenta. Laskenta tulisi tehdä tarkemmasta datasta kuin verkkotason 10–100 m.

Lähteet

1. Järvinen, Seppo & Mika Vehmas: Ura- ja sivukaltevuustunnusluvun määrittäminen kuntovastuu-urakkaan. Tiehallinnon selvityksiä 40/2005. Tiehallinto, Asiantuntijapalvelut. ISBN 951-803-543-1. TIEH 3200952.
2. Urasyvyyden ja epätasaisuuden vaikutus onnettomuuksiin. Tiehallinnon selvityksiä 49/2005.
3. Lauri Suikki ja Taina Rantanen: Sivukaltevuustunnusluku. Sivukaltevuuden parantaminen päätieverkon ylläpidon hankkeissa. Tiehallinnon selvityksiä 34/2009. Tiehallinto, Asiantuntijapalvelut. ISBN 978-952-221-282-5. TIEH 3201148-v.
4. Eetu Hurtig. Raskaan kaluston kallistelun voimakkuuden arvioiminen tienpinnan profiilista. Diplomityö. Aalto yliopiston teknillinen korkeakoulu. 2009.
5. Gillespie, Thomas D. 1992: Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, Inc. ISBN 1-56091-199-9. 1992.
6. Genta, Giancarlo, 1997: Motor Vehicle Dynamics. Modeling and Simulation. World Scientific Publishing Co. ISBN 9810229119 1997.
7. http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html.
8. http://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance.
9. Sähköpostiviestit. Jarmo Puharinen. Uudenmaan ELY-keskus. 2011.
10. Ari Tuononen ja Tapio Koisaari: Ajoneuvon dynamiikka. Autoalan Koulutuskeskus Oy. 2010.
11. Pekka Rahkola: Kuormauksen vaikutus moduuliyhdistelmän ajostabiliteettiin. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 15/2007. Liikenne- ja viestintäministeriö. 2007.
12. Mikko Lehessaari: Moduuliyhdistelmän stabiliteetin parantaminen renkaiden avulla. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 2007.
13. Huei Peng, Jwu-Sheng Hu: Traction/Braking Force Distribution for Optimal Longitudinal Motion During Curve Following. Vehicle System Dynamics, Vol 26. No 4, October 1996, pp 301-320.
14. Basil Psaranos, Marios Kontaratos, Demetrios Katsios: Influence of Vehicle Parameters on Horizontal Curve Design of Rural Highways. University of Athens.
15. Pekka Rahkola: Raskaan ajoneuvoyhdistelmän ajodynamiikka. Diplomityö. Oulun yliopisto, Sähkö- ja tietotekniikan osasto. 2006.
16. http://www.oocities.org/prohibition_us/friction.html

17. Christian J. Gerdes (2002): Safety, Performance and Robustness of Heavy Vehicle AVCS. California PATH-program. Report MOU 390. Department of Mechanical Engineering. Stanford University. 2002.
18. Michael W Sayers, Steven M. Karamihas (1998): The Little Book of Profiling. Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles. University of Michigan, USA. 1998.
19. 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.
20. Mochamad Safarudin, Anvik Singh, Haeryip Sibombing (2010): Rollover Prevention System for Passenger Vehicle. i DECON – 2010 – International Conference on Design and Concurrent Engineering. Universiti Teknikal Malaysia Melaka 20–21 Sept. 2010.

Tien geometrian suunnittelu

Tien geometrian suunnittelua ohjaavissa normeissa annetaan ohjeita tien geometrisien elementtien suositusarvoista. Suunnittelua ohjaa voimakkaasti tien ohjenopeus, joka korkealuokkaisilla teillä on suurempi ja alempiluokkaisilla teillä pienempi. Muita suunnittelua ohjaavia tekijöitä ovat tien sopeuttaminen maastoon ja esteettiset näkökohdat. Suunnitteluohjeissa annetaan mm. tien kaarresäteen ohjearvot, jotka perustuvat ohjeiden laadintavaiheessa tehtyihin analyyseihin ja arvioihin liikenteen sujuvuuden ja turvallisuuden sekä maastoon ja tien rakennusvaiheen massojen siirtämisten liittyvien näkökulmien tasapainottamisesta. Taulukoissa 1–3. on esitetty poimintoja noista suunnitteluohjeista.

Suunnitteluohjeiden mukaan tien kaarresäteiden minimiarvoina ovat ohjenopeuksille 60, 80 ja 100 km/h arvot 250 m, 500 m ja 1000 m. Näitä pienempiä kaarresäteiden arvoja voidaan pitää siten suunnitteluohjeiden vastaisina ja liikenteelle sopimattomina. Jos niitä kuitenkin tieverkolla on, niin se asettaa lisävaatimuksia mm. sivukaltevuuksille.

On huomattava, että tien ohjenopeus ja nopeusrajoitus eivät ole sama asia. Ohjenopeus on suunnittelua ohjaava mitoitusp parametri ja se määritetään vain kerran. Nopeusrajoitus on tiellä vallitseva, usein myös muuttuva, suurinta sallittua nopeutta rajoittava liikennemerkki, joka asetetaan olemassa olevalle tielle ympäristöstä tai liikenneturvallisuudesta johtuvien tarpeiden perusteella. Nopeusrajoitus on enemmänkin liikenneturvallisuuden parantamistoimenpide tilanteissa, joissa suunnitteluohjeiden mukaiset suunnittelunormit eivät joko ajoneuvodynamiikan tai turvallisuuspuutteiden takia toteudu.

Taulukko 13. Eräitä tien geometrisen suunnittelun ohjearvoja. Ohjearvot koskevat linjaosuuksia ja esimerkiksi liittymien kohdalla ne saattavat muuttua.

Ohjenopeus (km/h)	Näkemät (m)			Kaarresäteen ohjearvot (m)	Pyörästyskaari (m)	
	Pysähtymisnäkemä	Kohtaamisnäkemä	Ohitusnäkemä		Kovera	Kupera
40	45	90		90-200	600	450
50	60	120	400	150-300	1000	800
60	75	150	450	250-500	1500	1500
70	95	190	500	350-700	2100	2400
80	120	240	550	500-1000	2800	3900
90	150	300	600	750-1500	3500	6000
100	180	360	650	1000-2000	4300	9000
110	215	430	700	1250-2500	5200	12500
120	250	500	750	1700-3500	6300	17000
130	295	590		2200-4000	7600	23000
140	355	710		2600-5000	9200	35000

Kuivatuksen kannalta sivukaltevuuden tulisi olla aina vähintään 3 % (Asfalttinormit). Sivukaltevuuden vaihtumiskohdissa tulisi olla pituuskaltevuutta, jotta tien kuivatus toimisi.

LIITE 1 / 2 (2)

Taulukoissa 2 ja 3 on esitetty teiden suunnitteluohjeiden mukaiset kaarresäteiden suositukset, kun nopeusrajoitus vaihtelee. Suosituksissa on lisäksi vaihtoehtoja sivukaltevuuksille ja niiden vaikutus kaarresäteen ohjearvoon.

Taulukko 2. Kaarresäteen ajodynamiikan mukaiset minimiarvot eri nopeusrajoituksilla ja sivukaltevuuksilla (Tien suuntauksen suunnittelu, ohjeluonnos 2.6.2003).

Sivukaltevuus (%)	Kaarresäde (m)											
	30 km/h			40 km/h			50 km/h			60 km/h		
	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)
2 ¹	40	40	35	75	75	60	170	135	100	320	220	160
3	35	35	30	70	70	55	160	125	95	300	200	150
4	35	35	30	65	65	55	150	115	90	280	190	140
5	35	35	30	65	65	50	140	110	85	260	180	135
6										240	170	130
Sivukaltevuus (%)	70 km/h			80 km/h			100 km/h			120 km/h		
	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)
	2	460	330	240	640	460	340	1000	900	660	1500	1500
3	420	300	220	580	420	320	900	800	600	1300	1300	
4	390	280	210	530	390	300	810	720	560	1100	1100	
5	360	260	200	490	360	280	740	650	520	1000	1000	
6	340	240	190	460	340	260	680	600	490			

¹ Voidaan käyttää kaarevilla silloilla päällysteen kuivatuksen salliessa

Taulukko 3. Kaarresäteen ajodynamiikan mukaiset minimiarvot kaksipuolisesti sivukaltevissa kaarteissa eri (Tien suuntauksen suunnittelu, ohjeluonnos 2.6.2003).

Sivukaltevuus (%)	Kaarresäde (m)											
	30 km/h			40 km/h			50 km/h			60 km/h		
	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)
2.5	120	120	100	230	250	180	500	400	300	1000	650	500
3	150	150	120	280	300	220	650	500	400	1200	800	600
4	300	300	250	600	600	500	1400	1100	800	2500	1700	1300
Sivukaltevuus (%)	70 km/h			80 km/h			100 km/h			120 km/h		
	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)	Ohjearvo	Vähimmäisarvo	Välttävää (taajama)
	2.5	1400	1000	750	1900	1400	1000	3000	2600	2000		
3	1700	1200	900	2400	1700	1300	3600	3200	2500			
4	3500	2500	1900	4800	3500	2700	7300	6500	5000			

