



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu

Harri Heikkinen

**Nastarenkaiden vaikutus päällysteiden kulumiseen
taajamanopeuksissa**

TIIVISTELMÄ

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten ajonopeus vaikuttaa nastarenkaiden aiheuttamaan päällysteiden kulumiseen alle 60-80 km/h nopeuksissa. Jotta nastarenkaiden vaikutus päällysteiden kulumiseen voitiin erottaa muista urautumismekanismeista, selvitettiin tutkimuksessa myös muita mahdollisia muuttujia päällysteiden urautumiselle kaupunki-liikenteessä. Tutkimusmenetelminä olivat kirjallisuustutkimus, laserprofilometrillä tehdyt empiiriset urasyvyysmittaukset sekä vuosina 2004-2011 Helsingissä PTM-mittausautolla mitatun katukuntotiedon tilastollinen analyysi.

Suurin osa nastojen aiheuttamasta päällysteen kulumisesta on suoraan verrannollista ajonopeuteen tai sen neliöön. Nastarenkaat ovat muuttuneet 1990-luvulta alkaen huomattavasti matalaprofiilisemmiksi. Mitä matalampi renkaan profiilisuhde, sitä lyhyempi on renkaan ja tien välisen kosketusalan pituus. Tästä seuraa teoriassa, että nykyaikaisilla matalaprofiilisilla renkailla nastan tiekosketus ei olisi alhaisissakaan nopeuksissa yhtä hiertävä kuin aikaisemmissa tutkimuksissa, jotka on tehty pääasiassa korkeaprofiilisemmilla renkailla.

Teoriassa päällysteen kuluminen on suoraan verrannollinen kulumalla asfaltin pinnasta emissoituneeseen katupölyyn, jos ulkoisten tekijöiden, kuten esimerkiksi hiekoitushiekan, vaikutus mitattuun hiukkaspitoisuuteen on pystytty eliminoimaan. Kaikkien tässä tutkimuksessa arvioitujen laboratoriotutkimustulosten mukaan katupölyemissio alle 60 km/h nopeuksissa vähenee ajonopeuden laskiessa, mistä voidaan päätellä, että myös päällysteen kulumisella ja ajonopeudella olisi vastaava yhteys.

Ajonopeuden ja urasyvyyden kasvun välillä ei havaittu selvää tilastollista yhteyttä, kun PTM-mittaustuloksia ja empiiristen urasyvyysmittausten tuloksia analysoitiin. Sitä vastoin urien poikkipinta-alan muutoksena ilmenneen päällystemateriaalin tienpinnasta irtoamisen ja ajonopeuden välillä oli selvä positiivinen korrelaatio. Syy mainittuun urasyvyyden ja urien poikkipinta-alan eroon selitettävänä muuttujana voi mahdollisesti liittyä siihen, että ajokaistan leveyden ja nopeusrajoituksen välillä on merkittävä positiivinen korrelaatio.

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella tulisi kyseenalaistaa aikaisemmat tutkimustulokset, joiden mukaan päällysteiden kuluminen lisääntyy ajonopeuden laskiessa 60–80 km/h alapuolella. Deformaation osuus päällysteiden kokonaisurautumisesta taajamissa vaikuttaa mahdollisesti olevan aliarvioitu, ja nastarenkaiden osuutta on voitu samanaikaisesti yliarvioida. Tutkimuksessa ilmeni myös tarve jatkotutkimukselle, joka liittyy renkaan ja nastan käyttäytymiseen alhaisissa ajonopeuksissa ja ajoneuvon liiketilan muutoksissa.

ABSTRACT

The scope of this research was to investigate the influence of vehicle speed on asphalt pavement studded tire wear at speeds below 60–80 km/h. To distinguish the pavement wear caused by studded tires from the other rutting mechanisms, other possible variables explaining pavement rutting in urban traffic environment were included. The research methods used were literature research, actual rut depth measurements with manually operating laser profilograph beam and a statistical analysis of the pavement rutting measurements conducted between 2004 and 2011 using pavement monitoring vehicle.

The majority of wear caused by studs is directly proportional to the vehicle speed or its square. Since 1990's, the aspect ratio of studded tires has decreased considerably in Finland and elsewhere. The lower the aspect ratio is, the shorter the tire footprint length is. In theory, this means that the stud contact to the pavement surface is not as abrasive at low speeds, as it has been previously discussed in the studies based on tests with higher aspect ratio tires.

Theoretically, without any dust from external factors such as chippings spread on roads or streets to prevent slippery icy conditions, pavement surface wear is directly proportional to the road dust emitted. All experiments in this research indicate that the road dust emissions at speeds below 60 km/h are comparable to the speed of vehicles equipped with studded tires, so it can be concluded that the pavement wear is dependent on the driving speed in a similar way.

Any significant statistical correlation between the driving speed and the measured rut depth increase was found neither in the pavement monitoring measurements nor in the actual rut depth measurements. However, there was a fair positive correlation between the driving speed and the area of ruts in terms of lost material obtained graphically from the measured individual pavement transverse profiles. The difference between rut depth and rutted area as dependent variables could be explained by positive correlation of the lane width to the speed limit.

This research challenges the previous research findings in Finland, which have suggested that the pavement wear is increasing when the driving speed decreases below 60–80 km/h. It looks like the contribution of deformation to the total rutting in urban-type traffic may have been underestimated, while the pavement wear caused by studded tires may have been overestimated. Research revealed a need to further study the tire behavior at low speeds in relation to changes of motion of the vehicle.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Abstract	3
Sisällysluettelo	4
Luettelo kuvista, taulukoista ja liitteistä.....	6
Termit ja käytetyt lyhenteet	8
Esipuhe	10
1. Johdanto	11
1.1. Tutkimuksen taustaa	11
1.2. Tutkimusongelman ja tutkimuskysymysten esittely	11
1.3. Tutkimuksen tavoitteet	12
1.4. Tutkimuksen rajaus	13
2. Päälystetyn tien ja kadun kulutuskerros	14
2.1. Asfaltin koostumus ja kulutuskerroksen tehtävät	14
2.2. Päälystetyypit ja niiden kulumisominaisuudet	16
2.2.1. Asfalttipäälysteet	16
2.2.2. Betonipäälysteet	18
2.3. Päälystetyypin valintaan vaikuttavat tekijät	18
2.4. Liikennemelua vaimentavien päälysteiden kulutuskestävyys ja käyttö	20
3. Tie- ja katupäälysteiden urautumismekanismit	22
3.1. Yleistä päälysteiden urautumisesta	22
3.1.1. Päälysteen urautuminen	22
3.1.2. Päälysteen urautumiseen vaikuttavat tekijät	23
3.1.3. Päälysteen urautumismekanismit	25
3.2. Nastarenkaan tiekosketuksen aiheuttama päälysteen kuluminen	27
3.2.1. Nastan ja päälysteen kosketuksen vaiheet	27
3.2.2. Kiviaineksen ja sideaineen kuluminen nastan tiekosketuksessa	28
3.3. Päälysteen deformaatio liikenteen vaikutuksesta	29
3.3.1. Uuden päälysteen alku-urautuminen	29
3.3.2. Kulutuskerroksen deformaatio	30
3.3.3. Sitomattomien kerrosten deformaatio	33
3.4. Muut kuin liikenteelliset tekijät päälysteiden urautumisessa	35
4. Nastarenkaat päälysteitä kuluttavana muuttujana	39
4.1. Keskeiset rengas- ja ajoneuvomuuttujat päälysteiden kulumisessa	39
4.1.1. Nastojen määrän ja ominaisuuksien vaikutukset kulumiseen	39
4.1.2. Renkaan profiilisuhteen ja ilmanpaineen vaikutukset	43
4.1.3. Nastarenkaita käyttävän ajoneuvon massa	44
4.2. Nastarenkaita koskevat määräykset	45
5. Päälysteiden urautumisen erityispiirteet taajamissa	49
5.1. Ajonopeudet, liikennemäärät ja ajoneuvotyypit taajamissa	49
5.1.1. Ajonopeudet	49
5.1.2. Liikennemäärät	52
5.1.3. Raskaan liikenteen osuus ja joukkoliikenne	53
5.2. Ajoneuvon liiketilan muutokset taajamissa	54
5.3. Renkaan ja nastan käyttäytyminen taajamanopeuksissa	56
5.4. Aiempiä laboratoriomittauksia kulumisesta alhaisissa nopeuksissa	58
5.4.1. Yliajokokeet	58
5.4.2. Katupölymittaukset testiradalla	61

5.5. Päälysteiden kulumismallit ja liikenneverkossa tehdyt uramittaukset	63
5.5.1. VTI:n päälysteiden kulumismalli ja Tukholman katujen kuluminen	63
5.5.2. Koetietutkimuksia ja palvelutasomittauksia Suomessa	67
6. Kuntotietoanalyysi Helsingissä 2004-2011 mitatuista PTM-tuloksista	69
6.1. Kuntotietoanalyysin tavoitteet	69
6.2. Kuntotietoanalyysin aineisto	69
6.2.1. PTM-mitatut kadut	69
6.2.2. Analysoitavien kohteiden valintakriteerit	70
6.2.3. Analysoitaviksi valitut kohteet	71
6.2.4. X-jakopisteohjelma	73
6.3. Selittävien ja selitettävien muuttujien valinta aineistosta	75
6.4. Lineaarinen regressioanalyysi kuntotiedosta	78
7. Urasyvyyssmittaukset laserprofilometrillä Helsingissä 2011-12	80
7.1. Urasyvyyssmittausten tavoitteet	80
7.2. Mittausten toteutus ja mittausolot	80
7.2.1. Mittausaikojen ja -paikkojen valintaperusteet	80
7.2.2. Mittausten tekeminen	83
7.2.3. Selitettävien ja selittävien muuttujien analysointi	84
7.2.4. Nastarenkaiden käyttö ja talvisää Helsingissä talvella 2011-12	86
8. Tutkimustulokset	90
8.1. Kirjallisuustutkimuksen tulokset	90
8.1.1. Päälysteiden urautumista taajamissa selittävät havaitut muuttujat	90
8.1.2. Nastarenkaiden kulutusvaikutus taajamissa	91
8.1.3. Deformaatio taajamissa	93
8.2. Kuntotietoanalyysin tulokset	94
8.2.1. Maksimiurasyvyyden muutoksen analysointi	94
8.2.2. Vasemman tai oikean ajouran urasyvyyden muutoksen analysointi	95
8.2.3. Urien poikkipinta-alan muutoksen analysointi	96
8.3. Urasyvyyssmittausten tulokset	97
8.3.1. Urasyvyyden muutokset	97
8.3.2. Urien poikkipinta-alan muutos	98
9. Tutkimustulosten arviointi	103
9.1. Päälysteiden urautumista taajamissa selittävät havaitut muuttujat	103
9.2. Urasyvyyssmittaustulosten arviointi mittauskohteittain	105
9.3. Onko urautuminen taajama- ja maantienopeuksien välillä erilaista?	107
9.4. Tulosten luotettavuus ja yleistettävyys	108
9.5. Tulosten arviointi nastarenkaiden käytön rajoittamistarpeen kannalta	109
10. Yhteenveto ja suositukset	112
10.1. Yhteenveto	112
10.2. Toimenpide-ehdotukset ja jatkotutkimustarve	113
11. Lähteet	115
LIITTEET	120

Luettelo kuvista, taulukoista ja liitteistä

Kuvat:

<i>Kuva 1. Tavanomainen joustava päällysrakenne</i>	15
<i>Kuva 2. Asfalttibetonin AB16 rakeisuuskäyrä</i>	16
<i>Kuva 3. Kivimastikiasfaltin SMA16 rakeisuuskäyrä</i>	17
<i>Kuva 4. Ajoura ja urasyvyyden mittaaminen oikolaudalla</i>	22
<i>Kuva 5. Päällysteen urautumismekanismit</i>	26
<i>Kuva 6. Nastan pistovoima ajan funktiona</i>	27
<i>Kuvat 7 ja 8. Tielaitoksen deformaatiokoetuloksia Kehä III:lla vuosina 1998–99</i>	32
<i>Kuva 9. Pyöräkuorman aiheuttama jännitysmuutos tien eri kerroksissa</i>	34
<i>Kuva 10. Tietä kuormittavat ilmastotekijät</i>	36
<i>Kuva 11. Pituussuuntaisen routahalkeaman syntyminen tien keskialueelle</i>	38
<i>Kuva 12. Nuuskija-auto</i>	39
<i>Kuva 13. PM₁₀-hiukkasten suhteellinen massa eri ajonopeuksilla ja nastoituksilla</i>	40
<i>Kuva 14. Nastamäärän kaksinkertaistamisen vaikutus nastarenkaiden aiheuttaman hiukkasemission lisääntymiseen eri ajonopeuksissa</i>	41
<i>Kuva 15. Rengaskoon vaikutus renkaan ja tien väliseen kosketusalaan</i>	43
<i>Kuva 16. Toteutuneet matkanopeudet aamuruuhkassa liikenteen sujuvuusmittauksissa</i>	51
<i>Kuva 17. Liikennemäärien koostumus Helsingin kantakaupungin rajalla vuonna 2010</i>	53
<i>Kuva 18. Nastan pää ja nastojen jälkiä kivipinnalla eri profiilisuhteilla ja ajonopeuksilla</i>	57
<i>Kuva 19. Yliajo- ja ratakuluma ajonopeuden funktiona</i>	59
<i>Kuva 20. VTI:n testeissä käytetty kulutusrata</i>	60
<i>Kuva 21. VTT:n yliajokokeissa käytetty kulutuskoeakappale</i>	60
<i>Kuva 22. Nasta- ja kitkarenkaan irrottamien hiukkasten partikkelikokojakauma</i>	62
<i>Kuva 23. PM₁₀-hiukkasten massa eri ajonopeuksilla ja nastoituksilla</i>	63
<i>Kuva 24. Regressioyhtälöt PM₁₀-hiukkasten massan riippuvaisuudelle ajonopeudesta</i>	63
<i>Kuva 25. Tukholman sisääntulo- ja ohitusteiden kulumisprofiileja</i>	66
<i>Kuva 26. Vuosina 2009–2010 PTM-mittausohjelmaan kuuluneet kadut</i>	69
<i>Kuva 27. X-jakopisteohjelman esittämä ajokaistan poikkiprofiili Kuusisaarentieltä</i>	73
<i>Kuva 28. X-jakopisteohjelman esittämä ajokaistan poikkiprofiili Metsäläntieltä</i>	74
<i>Kuva 29. Aalto-yliopiston Tielaboratorion siirrettävä laserprofilometri</i>	83

Taulukot:

<i>Taulukko 1. Pääasiallisesti käytetyt päällystetyypit liikennemäärän perusteella</i>	19
<i>Taulukko 2. Päällysteen urautumismekanismien vaikutus päällysteeseen</i>	25
<i>Taulukko 3. Ympäristötekijöiden ja liikenteen aiheuttamien urautumismekanismien yhteisvaikutuksia</i>	36
<i>Taulukko 4. Suhteellinen hiukkasemission lisääntyminen nastattomaan renkaaseen verrattuna eri nastoituksilla</i>	42
<i>Taulukko 5. Nastamääräykset Suomessa</i>	47
<i>Taulukko 6. Nopeusrajoituksen määrittäminen taajamassa</i>	50
<i>Taulukko 7. Todellinen keskinopeus eri nopeusrajoitusalueilla (ks. kuva 16)</i>	51
<i>Taulukko 8. Taajamaliikenteessä esiintyviä ajoneuvon liiketilän muutoksia</i>	55

Taulukko 9. Tukholman katujen ja sisääntuloteiden urautuminen	65
Taulukko 10. Kuntotietoaanlyysiin valitut kohteet ja niiden tiedot	72
Taulukko 11. Urasyyvyysmittauksiin valitut kohteet ja niiden tiedot.....	81
Taulukko 12. Arvioitu nastarenkaita käyttäneiden henkilö- ja pakettiautojen osuus ja ilmastollisten tekijöiden vaikutus kulumiseen Helsingissä talvella 2011-12	88
Taulukko 13. Nastarenkaita käyttäneiden ajoneuvojen arvioidut yliajokerrat	89
Taulukko 14. Päälysteiden urautumismekanismeihin vaikuttavien muuttujien keskeiset erot taajamanopeuksissa ja -liikenteessä verrattuna maantieliikenteeseen.....	90
Taulukko 15. PTM-mittaustulosten maksimiurasyyvyden muutoksille korkeimman selitystasheen antaneiden yhden selittävän muuttujan mallien tunnusluvut	94
Taulukko 16. PTM-mittaustulosten maksimiurasyyvyden muutoksille korkeimman selitystasheen antaneiden kahden selittävän muuttujan mallien tunnusluvut	94
Taulukko 17. PTM-mittaustulosten vasemman ajouran urasyyvyden muutokselle korkeimman selitystasheen antaneiden mallien tunnusluvut.....	95
Taulukko 18. PTM-mittaustulosten oikean ajouran urasyyvyden muutokselle korkeimman selitystasheen antaneiden mallien tunnusluvut.....	96
Taulukko 19. Urasyyvyden muutokset poikkiprofiilien urasyyvyksien keskiarvoista laskettuna mittauskohteittain	97
Taulukko 20. Laserprofilometrillä mitatun vasemman ja oikean ajouran urasyyvyden muutokselle korkeimman selitystasheen antaneiden mallien tunnusluvut	98
Taulukko 21. Urien poikkipinta-alan muutokset poikkiprofiilien urien pinta-alan keskiarvoista laskettuna mittauskohteittain	99
Taulukko 22. Laserprofilometrillä mitattujen urien pinta-alojen muutoksille korkeimman selitystasheen antaneiden mallien tunnusluvut.....	100
Taulukko 23. Ajourien poikkipinta-alan ja urasyyvyden suhde mittauskohteittain eri menetelmillä	101
Taulukko 24. Kulumisuran suhde kulumispinta-alaan tielaitoksen urautumismallilla	102

Liitteet:

Liite 1. PM ₁₀ -hiukkasten massa eri ajonopeuksilla ja nastoituksilla	120
Liite 2. Nastarenkaiden käyttö Euroopassa	121
Liite 3. Päälysteen urautumiseen vaikuttavat tekijät	123
Liite 4. Liikenne- ja viestintäministeriön asetus 408/2003 ajoneuvon renkaiden nastoista	124
Liite 5. X-jakopisteohjelman esittämiä katujen poikkiprofiileja	125
Liite 6. Lineaaristen regressioanalyysien tulokset kuntotietoaanlyysin datasta	134
Liite 7. Statistix-malleissa käytetty numeerinen katukuntotieto	149
Liite 8. Urasyyvyysmittaustulokset syksy 2011 ja kevät 2012 taulukossa	150
Liite 9. Urasyyvyysmittausten profiilikuvat	151
Liite 10. Urasyyvyysmittausten tilastollisessa analysoinnissa käytetyt muuttujat ja tiedot	182
Liite 11. Lineaaristen regressioanalyysien tulokset urasyyvyysmittausten datasta	183
Liite 12. Urasyyvyysmittauskohteiden sijainti ja ajosuunnat Helsingin kartalla	189
Liite 13. AL-profilometrin (4,0 m) kokoonpano ja tekniset tiedot	190
Liite 14. Päälysteet, autolla tehtävät mittaukset	191

Termit ja käytetyt lyhenteet

AA	<i>Avoin asfaltti</i>
AB	<i>Asfalttibetoni</i>
Adheesio	<i>Pinnan molekyylien varauspainopisteiden yhtymättömyydestä johtuvaa sähköistä vuorovaikutusta.</i>
ASTO	<i>Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma</i>
Aurauskulma	<i>Ajoneuvon ohjaavien pyörien kulma suhteessa toisiinsa ajoneuvon kulkusuuntaan nähden.</i>
Camber-kulma	<i>Auton pyöräntuennassa renkaan pystysuoran akselin ja auton pystysuoran akselin välinen kulma, kun autoa katsotaan edestä tai takaa.</i>
Hystereesikitka	<i>Kitkamekanismi, joka perustuu vaihe-eroon siirtymän ja jännityksen välillä ja siihen, että materiaali palautuu alkuperäiseen muotoonsa vain ulkoisen työn avulla.</i>
IRI	<i>Epätasaisuusluku, tien pituussuuntainen epätasaisuus mm/m</i>
Jousivakio	<i>Vakio (symboli k, yksikkö N/m), joka kertoo jousen, kumin, tms. jäykkyyden ts. kuinka vahvasti se pyrkii palautumaan tasapainoasemaansa.</i>
Kuulamylläarvo	<i>Arvo, joka kuvaa kiviaineksen kestävyyttä päällystemateriaalina</i>
KVL	<i>Keskivuorokausiliikenne</i>
Leikkausdeformaatio	<i>Muodonmuutos, joka johtuu kuormituksen aiheuttamasta leikkausjännityksestä</i>
PAB	<i>Pehmeä asfalttibetoni</i>
PANK	<i>Päällystealan neuvottelukunta</i>
PM ₁₀	<i>Hengitettävät hiukkaset, halkaisijaltaan alle 10 mikrometrin (μm) hiukkaset</i>
PM _{2,5}	<i>Pienhiukkaset, halkaisijaltaan alle 2,5 mikrometrin (μm) hiukkaset</i>
Prall-laite	<i>Päällysteen nastarengaskulumista määrittävä laboratoriolaite</i>

Profilometri	<i>Kaistan poikkiprofiilin määrittävä yleensä lasermittaukseen perustuva kenttämittauslaite</i>
PTM	<i>Palvelutasomittaus</i>
Raideleveys	<i>Auton samalla akselilla olevien renkaiden keskilinjojen välinen etäisyys</i>
Rakeisuuskäyrä	<i>Aineksen partikkelikokojakaumaa kuvaava käyrä</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers, autoalan standardisointijärjestö</i>
SMA	<i>Kivimastiksiasfaltti</i>
SOP	<i>Soratien pinta</i>
Sortokulma	<i>Renkaan todellisen kulkusuunnan ja renkaan keskitason välinen kulma.</i>
SPS	<i>Ominaiskuluminen, yhden nastarenkain varustetun ajoneuvon aiheuttama keskimääräinen päällysteen kuluminen g/km</i>
Tunkeuma	<i>Bitumin testausmenetelmä, jolla voidaan määrittää bitumin kovuus. Tuloksena ilmoitetaan neulan tunkeuma bitumiin mittayksikkönä 1/10 mm</i>
VA	<i>Valuasfaltti</i>
Validointi	<i>Prosessi, jossa tarkistetaan, että prosessin kohde täyttää jotkin tietyt kriteerit</i>
Viskositeetti	<i>Suure, joka kuvaa juoksevan aineen kykyä vastustaa virtausta. dynaamisen viskositeetin (μ tai η) yksikkö on</i> <i>$\text{Pa} \cdot \text{s} (= \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}})$ ja kinemaattisen viskositeetin (ν) yksikkö on</i> <i>$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$</i>

ESIPUHE

Päällysteiden kulumista pidetään yhtenä nastarenkaiden käytön keskeisimmistä haitoista. Nastarenkaiden vaikutusta päällysteiden kulumiseen on Suomessa tutkittu 1960-luvulta lähtien, kun maan autoistuesssa ja nastarenkaiden käytön yleistyessä havaittiin teiden urautumisen lähteneen voimakkaaseen kasvuun. Nastareнкаat kuluttavat tietä, koska kovametalliset liukuesteet eli nastat rikkovat päällysteen pintaa ja irrottavat siitä materiaalia.

Tieliikenteestä aiheutuvien ympäristöhaittojen vähentäminen ja liikenneinfrastruktuurin ylläpitokulujen hallinta ovat liikennepoliittisen päätöksenteon keskeisiä tavoitteita. Liikenteen aiheuttama katupöly ja melu ovat olleet kasvavana huolen aiheena erityisesti taajamissa, joissa on paljon asutusta vilkasliikenteisten teiden ja katujen lähellä. Ruotsissa ja Norjassa nastarenkaiden käyttöä suurimmissa kaupungeissa on rajoitettu edellä mainituista syistä.

Tämä tutkimus tehtiin osana NASTA-tutkimusohjelmaa, jonka rahoittajina toimivat Helsingin kaupungin Rakennusvirasto, Liikennevirasto, Liikenne- ja viestintäministeriö, Sosiaali- ja terveysministeriö, Ympäristöministeriö, Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Helsingin kaupungin ympäristökeskus ja Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi.

Esitän parhaimmat kiitokseni seuraaville Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun työntekijöille: Työn ohjaajalle dosentti Jarkko Valtoselle ja valvojalle professori Terhi Pelliselle asiantuntevasta työn ohjauksesta, autolaboratorion yli-insinöörille TkL Panu Sainiolle erinomaisista neuvoista lähestyttäessä tutkimusongelmaa ajoneuvoteknisestä näkökulmasta, sekä DI Sauli Sainiolle avusta urasyvyysmittausten tekemisessä. Lisäksi haluan kiittää avusta ja yhteistyöstä työhön tarvittavien tietojen hankinnassa Ville Alatyppöä ja Ismo Rantasta Helsingin kaupungin Rakennusvirastosta, sekä Hannu Virtasaloa ja hänen järjestämiään liikenteen ohjaajia Kärkkäistä ja Riikosta STARA:lta.

Espoossa 27.8.2012

Harri Heikkinen

1 Johdanto

1.1. Tutkimuksen taustaa

Nastarenkaiden päällysteitä kuluttavan vaikutuksen lisäksi tie- ja katupäällysteillä on lukuisia erilaisia urautumismekanismeja, joten päällysteiden urautumista ei voida laittaa yksinomaan nastarenkaiden syyksi. Tiellä liikkuvien ajoneuvojen massa tiivistää ja muovaa tien eri rakennekerroksia. Ilmastolliset tekijät, nimenomaan lämpötilan ja kosteuden vaihtelut, vaikuttavat urautumiseen yhteisvaikutuksessa liikenteen kanssa.

Suomessa ja Pohjoismaissa on aiemmin tutkittu laajasti nastarenkaiden käytön vaikutuksia päällysteiden kulumiseen. Suomessa 1990- ja 2000-luvuilla tehtyjen aiempien kulumismittausten pääteemoja ovat olleet mm. hyvin nastarengaskulutusta kestävien päällysteiden kehittäminen eri liikenneympäristöihin (Vuorinen et al. 1998, Suomen Kuntaliitto & VTT Yhdyskuntatekniikka 1999), nastoihin ja nastarenkaisiin kohdistuvien määräysten muutostarve (Solla et al. 2004, Unhola 2004 ja 2008) sekä kunto- vastuu-urakoissa käytettävät tunnusluvut (Tiehallinto 40/2005). Suomessa tehdyt tutkimukset ovat painottuneet maanteille ja maantienopeuksiin. Ruotsissa ja Norjassa puolestaan on tehty aikaisemmin nastarengasaiheisia tutkimuksia runsaasti myös kaupungeissa, mutta tutkimusaiheet ovat liittyneet kulumisen aiheuttamaan katupölyyn, eivätkä niinkään kulumisesta johtuvan urautumisen aiheuttamaan päällysteen ylläpitotarpeeseen.

Tämä tutkimus on kirjallisuustutkimuksen, tilastollisten sekä empiiristen tutkimusmenetelmien yhdistelmä, joka tehtiin osana viranomaisten rahoittamaa NASTA-tutkimusohjelmaa. NASTA-tutkimusohjelman tavoitteena on tarkastella tutkimuksien perusteella, olisiko Helsingissä mahdollista parantaa kaupunki-ilman laatua, vähentää autoliikenteen aiheuttamaa melua sekä katujen ylläpitokustannuksia vähentämällä nastarenkaiden käyttöä. Lisäksi NASTA:ssa tutkitaan, mikä olisi vähentämisen vaikutus liikenneturvallisuuteen. Tämä tutkimus kohdistuu NASTA-tutkimusohjelman tutkimus-alueista päällysteiden kulumisen kautta katujen ylläpitokustannuksiin.

NASTA-tutkimusohjelman tavoitteellinen kesto on kaksi vuotta, vuoden 2011 maaliskuusta vuoden 2013 helmikuuhun. NASTA-tutkimusohjelmasta laaditaan väli- ja loppuraportti. Väliraportti valmistui vuoden 2012 alussa, ja loppuraportti valmistuu vuoden 2013 alussa. Raportoinnin keskeisessä osassa ovat tutkimustulokset.

1.2. Tutkimusongelman ja tutkimuskysymysten esittely

Tie- ja katupäällysteiden useista erilaisista urautumismekanismeista voidaan johtaa seuraavat tärkeät tutkimuskysymykset: Mikä on ominaista eri urautumismekanismien aiheuttamalle urautumiselle taajamissa? Kuinka nastarenkaiden osuus urautumisesta havaitaan?

Tutkimuksessa selvitettiin nastarenkaita käyttävän ajoneuvon ajonopeuden vaikutusta päällysteen kulumiseen erityisesti alhaisilla ajonopeuksilla. Aiemmissä tutkimuksissa on löytynyt selvä yhteys sille, että päällysteiden kulumisen kasvaa selvästi ajonopeuden kasvaessa, kun nastarenkain varustetun ajoneuvon nopeus on suurempi kuin 60–80 km/h, mutta aiemmat tutkimustulokset tätä alhaisempien ajonopeuksien yhteydestä päällysteiden kulumiseen ovat vähäisiä ja ristiriitaisia. Liikenne- ja viestintäministeriö julkaisi Timo Unholan kirjoittaman tutkimusraportin (2004) ajoneuvotekijöiden vaikutuksesta nastarenkaan aiheuttamaan päällysteiden kulumiseen. Kyseisessä raportissa esitettiin tutkimustuloksia, jotka viittasivat kulumisen lisääntymiseen ajonopeuden laskiessa alle 60–80 km/h. Tämän perusteella voidaan muodostaa seuraava hypoteesi, joka tässä tutkimuksessa vahvistetaan tai hylätään:

Nastarenkaat kuluttavat päällysteitä vähiten ajonopeuksilla 60–80 km/h. Tätä alemmilla nopeuksilla päällysteiden kulumisen lisäänty.

Nastoja, nastarenkaita ja niiden käyttöä koskevilla määräyksillä on vaikutettu nastarenkaiden osuuteen päällysteiden urautumisessa. Liikenne- ja viestintäministeriön asetuksella 466/2009 on asetettu uudistetut nastarengasmääräykset, jotka koskevat 1.1.2013 jälkeen valmistettuja nastarenkaita. Tutkimuksessa arvioidaan muiden tutkimuskysymysten yhteydessä uusien määräysten vaikutusta nastarenkaiden osuuteen päällysteiden urautumisesta taajamanopeuksissa.

1.3. Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuskysymyksiä lähestyttiin esittelemällä kirjallisuuden perusteella ne päällysteeseen, liikenteeseen ja renkaaseen liittyvät keskeiset muuttujat, joiden muutokset vaikuttavat nastarenkaiden käytöstä aiheutuvaan tien kulumisen ja muun liikenteen aiheuttaman deformaation määrään sekä osuuteen kokonaisurautumisesta.

Kirjallisuuteen perustuvat teoriat päällysteiden kulumisesta taajamanopeuksissa pyrittiin vahvistamaan tai hylkäämään tilastollisin ja empiirisin tutkimusmenetelmin.

Tutkimustuloksista ja niistä tehtävistä päätelmistä oli tavoitteena saada tietoa, jota voidaan käyttää Helsingin kaupungin Rakennusviraston, Liikenneviraston, Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi:n ja Aalto-yliopiston tutkimustyössä sekä yhteiskunnallisen päätöksenteon tukena.

Koska Pohjoismaisten viranomaisten teettämässä aikaisemmissa tutkimuksissa nastarenkaiden päällysteitä kuluttavasta vaikutuksesta alhaisissa nopeuksissa on tullut selvästi toisistaan poikkeavia tuloksia, otettiin tässä tutkimuksessa kantaa myös niihin. Tutkimuksessa pohdittiin aiempien tutkimustulosten erojen syitä sekä pyrittiin vahvistamaan tai kritisomaan aiempia tutkimustuloksia uudemman näytön perusteella.

1.4. Tutkimuksen rajaus

Tutkimuksessa käsiteltiin ainoastaan pintapuolisesti nastarenkaiden aiheuttaman päällysteiden kulumisen historiaa 1990-luvulta taaksepäin. Vilkasliikenteisten teiden ja katujen päällystäminen kivimastiksiasiastalilla (SMA) sekä nastarenkaisiin kohdistuvien määräysten tiukentuminen ovat vähentäneet päällysteiden kulumista merkittävästi, eivätkä tutkimustulokset asfalttibetonilla ja öljysoralla päällystettyjen päteiden sekä yli kahden gramman nastapainojen ajalta ole vertailukelpoisia. Myös nastan käyttäytymistä eri kuormitustiloissa koskevien vanhojen julkaisujen käyttöön suhtauduttiin kriittisesti ajoneuvo- ja rengastekniikan voimakkaan kehityksen takia.

Tutkimuksessa pohdittiin nastarenkaiden käytön vaikutuksista vain päällysteiden kulumista. Tutkimuksen ulkopuolelle jäivät esimerkiksi katupöly, liikennemelu, liikenneturvallisuus ja eri rengastyypin käyttöominaisuudet. Nämä kaikki tutkimuksen ulkopuolelle jätetyt asiat ovat nastarenkaiden käytön rajoittamista pohdittaessa hyvin tärkeitä tekijöitä, joihin on saatavana tietoa NASTA-tutkimusohjelman muista osatutkimuksista, tämän työn lähdekirjallisuudesta sekä muista koti- ja ulkomaisista rengastutkimuksista ja -vertailuista.

Tutkimus painottui kaupunkiseutujen liikenneympäristöön alhaisille ajonopeuksille ja suurille liikennemäärille. Päällysteiden kulumista maantieosuuksilla korkeilla ajonopeuksilla on käytetty vain kirjallisuudesta saatavana vertailukohtana kulumiselle alhaisissa ajonopeuksissa. Työssä ei erikseen arvioitu vähäliikenteisten teiden ja katujen ikääntymisen ja ilmastollisten tekijöiden määrittämää uudelleen päällystämisen tarvetta.

Tutkimus kohdistui asfalttipäällysteiden (Asfalttibetoni AB ja kivimastiksiasiastal SMA) kulumiseen, koska tällaisten päällysteiden osuus Suomen ja Pohjoismaiden vilkasliikenteisten teiden ja katujen päällysteistä on ylivoimaisen suuri. Tutkimustulokset eivät siksi ole sellaisinaan käytettävissä betonipäällysteiden nastarengaskulumista määriteltäessä. Työn yhteydessä on ainoastaan lyhyesti pohdittu betonipäällysteiden, erikoispäällysteiden ja vähäliikenteisten teiden päällysteiden kulumisominaisuuksia verrattuina tutkittuihin päällysteisiin.

Tien rakennekerrosten osalta tutkimus painottui tien päällystettyyn kulutuskerrokseen ja tien pintaa mittaamalla saataviin mittaustuloksiin. Päällystetyn tien kulutuskerroksen ominaisuuksista on esitetty perusasiat päällystetyypin muuttujien yhteydestä kulutuskerroksen urautumiseen eri mekanismeilla. Tutkimuksessa ei erikseen arvioitu lukuarvoja tai suhteellisia osuuksia tien sitomattomien kerrosten deformaation yhteydestä urasyvyyden muutoksiin. Niissä tutkimuskohteissa, joissa deformaatio-urautumista käsiteltiin, oletettiin tien sitomattomien rakenteiden käyttäytyvän kaikkialla samalla tavalla, ellei kohteen aiemmassa tutkimuksessa ole muuta osoitettu.

2. Päällistetyin tien ja kadun kulutuskerros

2.1. Asfaltin koostumus ja kulutuskerroksen tehtävät

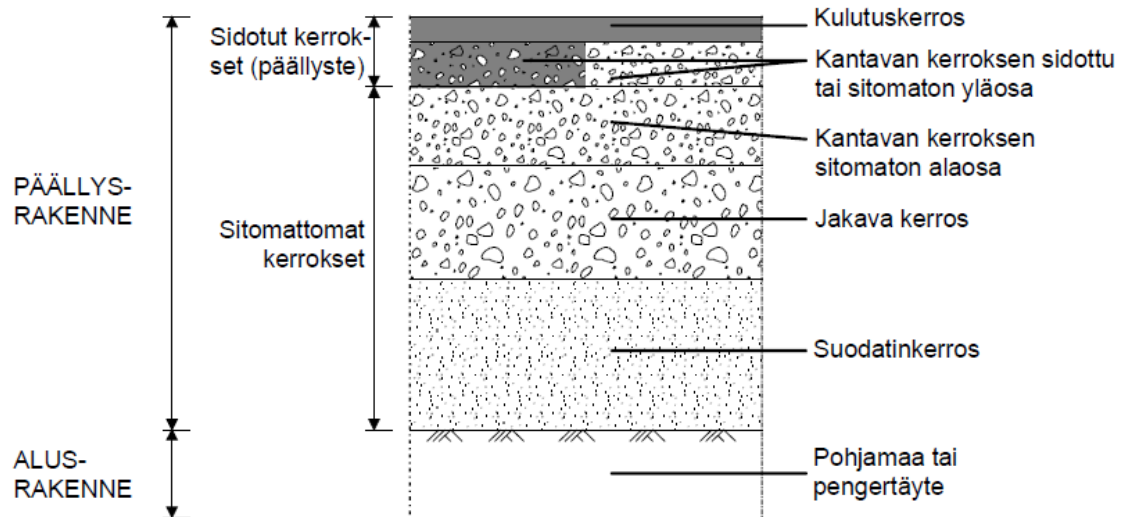
Asfalttipäällyste koostuu kiviaineksesta, bitumista ja ilman täyttämästä tyhjistä tilasta, joka jää kivirakeiden väliin. Asfaltin ominaisuudet muuttuvat bitumin ja kiven ominaisuuksien sekä näiden ja tyhjätilan määrien mukaan. Suomessa vilkkaasti liikennöidyillä teillä päällistetyypeistä selvästi yleisimpiä ovat asfalttibetoni (AB) ja kivimastikiasfaltti (SMA). Päällistetyypin ominaisuuksia ovat lisäksi kiviaineksen maksimiraekoko ja asfaltin paksuus, joka päällysteitä uusittaessa yleensä ilmaistaan massamääränä kg/m^2 . Jos asfalttibetonin maksimiraekoko on esimerkiksi 16 mm ja asfalttia levitetty 100 kg/m^2 , on päällistetyyppi AB 16/100 (PANK 2008)

Tavallisen kuumasekoitteen asfaltin massasta n. 93–95 % on kiviainesta. Kiviaines noudattaa tiettyä raekokojakaumaa, jota kuvataan rakeisuuskäyrällä. Asfalttinormeissa (PANK 2008) esitetään vaatimuksia kiviaineksen rakeisuudelle, muodolle sekä tärkeimmille fysikaalisille ominaisuuksille. Mitä suurempi liikennemäärä tiellä on, sitä tiukempia vaatimuksia kiviainekselle yleensä annetaan. Etenkin nastarengaskulutuskestävyys on Suomessa vilkasliikenteisillä teillä tärkeä kiviaineksen fysikaalinen ominaisuus, koska nastarengaiden käyttö kuluttaa kiveä ja aiheuttaa ajan myötä urautumista. (PANK 2008)

Bitumi toimii asfaltissa kiviaineksen sideaineena. Tavallisen kuumasekoitteen asfaltin massasta noin 5–7 % on bitumia. Bitumin tunkeumaluokka määritetään tunkeumakokeella, jolla mitataan bitumin jäykkyys. Bitumin tyyppimerkinnässä olevat numerot tarkoittavat bitumin tunkeumaa ja niiden yksikkö on 1/10 mm. Esimerkiksi bitumin B35/50 tunkeuma on 3,5–5,0 mm ja viskositeetti 60°C:ssa vähintään 225 Pas. Tunkeuma mitataan penetrometrillä ja ilmaistaan etäisyytenä, jonka neula tunkeutuu tutkittavaan näytteeseen tietyssä lämpötilassa. Myös kuormitus ja kuormitus aika ovat määrättyjä. Mitä suurempi bitumin tunkeuma on, sitä alhaisempi sen viskositeetti on. Bitumin B160/220 viskositeetti 60°C:ssa on vähintään 30 Pas, eli B35/50 vastustaa deformaatiomekanismina olevaa leikkausjännitystä 60°C:ssa 7,5 kertaa suuremmalla leikkausvoimalla kuin B160/220. Korkeiden lämpötilojen juoksevuuden vastapainoksi korkeiden tunkeumaluokkien bitumit kestävät kylmällä ilmalla lämpöjännityksiä paremmin kuin matalien tunkeumaluokkien bitumit. Bitumiin voidaan lisätä tarpeen vaatiessa erilaisia lisäaineita, jotka parantavat bitumin ja siten päällysteen ominaisuuksia. Bitumin määrä ja tunkeumaluokka optimoidaan haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi.

Tiivistyksen jälkeenkin asfaltin kivirakeiden väliin jää tyhjätila. Tyhjätilan osuus koko päällysteen tilavuudesta riippuu siitä, kuinka onnistuneesti päällyste on tiivistetty. Asfalttinormien (PANK 2008) tavoite tyhjätilalle vilkkaasti liikennöidyillä teillä eri päällistetyypeillä on 1–5 %.

Suomessa yleisimmin käytetty päällysrakennetyyppi, ns. joustava päällysrakenne (flexible pavement), on kerroksellinen rakenne, jossa ylimpänä on bitumisella sideaineella sidottu joustava kerros eli päällyste muiden rakennekerrosten ollessa sitomattomia (kuva 1). Sidottuja kerroksia ovat tavanomaisessa rakenteessa kulutuskerros ja usein myös kantavan kerroksen yläosa.



Kuva 1. Tavanomainen joustava päällysrakenne, jossa kulutuskerros päällimmäisenä (Belt et al. 2002, s. 11)

Kulutuskerroksen toiminnallisena tehtävänä on saada aikaan pinta, joka on turvallinen, miellyttävä ja taloudellinen ajaa. Kulutuskerroksen rakenteellisenä tehtävänä on puolestaan toimia rakenteelle vettä pitävänä kattona eli minimoida veden pääsy tierakenteeseen. Kulutuskerros lisää myös päällysrakenteen yläosan jäykkyyttä. (Belt et al. 2002, s. 11–12)

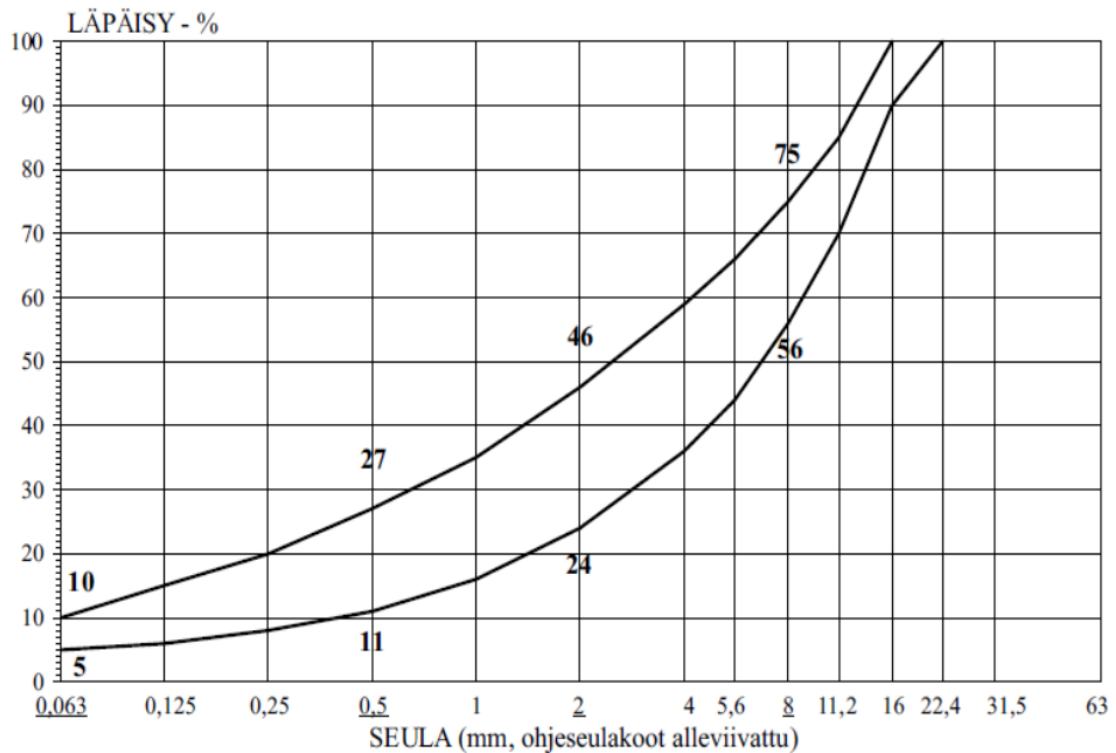
Kulutuskerros suojaa kantavaa kerrosta renkaan tiekosketuksen aiheuttamalta vaurioitumiselta. Kulutuskerroksen paksuus joustavissa päällysrakenteissa on tavanomaisesti 50–100 mm, ja se määritellään liikenteen akselipainon, käytettävän materiaalin ja päällysrakenteen odotetun kestoiän mukaan (Kilareski et al. 2004, s. 92–93).

Kulutuskerros on myös tien ja kadun ylläpidossa hyvin näkyvä elementti. Jos kulutuskerros on kulunut, mutta sitomattomat kerrokset ovat hyvässä kunnossa ja tarjoavat kulutuskerrokselle oikean muotoisen ja tukevan pohjan, on ylläpitotoimien kohdistuminen kulutuskerroksen uudistamiseen riittävä toimenpide.

2.2. Päälystetyypit ja niiden kulumisominaisuudet

2.2.1. Asfalttipäälysteet

Asfalttibetoni (AB) on yleisesti käytetty kestopäälyste, jonka kiviaineseos on murskettua (karkeita ja hienoja lajitteita), hiekkaa ja täytejauhetta siten, että rakeisuuskäyrä on jatkuva. (kuva 2) Sideaine on bitumia, jonka tunkeuma 25°C:ssa on alle 250 l/10 mm. (PANK 2008)



Kuva 2. Asfalttibetonin AB 16 jatkuva rakeisuuskäyrä (PANK 2008)

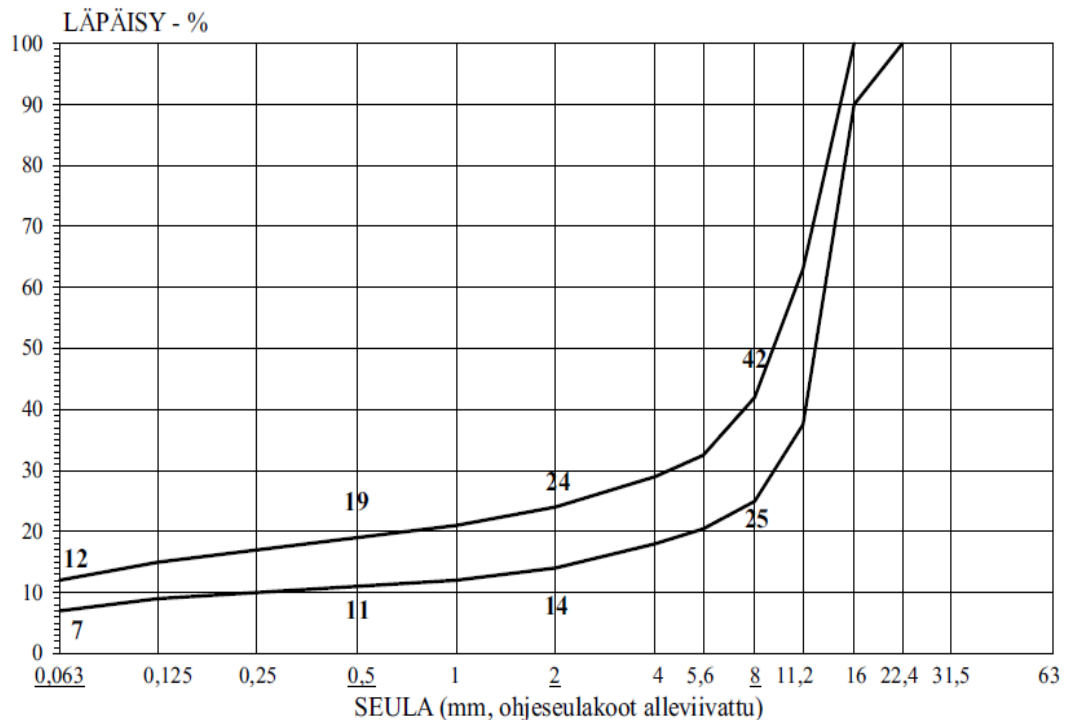
AB 16 on raekooltaan tyypillinen päälyste Suomen teiden ja katujen ajoratojen kulutuskerroksissa, vähäliikenteisillä teillä käytetään myös AB 11:ta. Asfalttibetonissa on oltava yli 5,6 mm kiviaineksesta kokonaan tai osittain murtopintaisia rakeita vähintään 40–75 %. Kulutuskerroksen asfalttibetonin sideaineiksi soveltuvat bitumit B35/50 ... B160/220 sekä kumibitumit KB65 ja KB75. (PANK 2008)

Kulutuskerroksen lisäksi asfalttibetonia käytetään myös sidekerroksena ja kantavan kerroksen sidottuna yläosana. Tällöin käytetään suurirakeisempia lajeja kuin kulutuskerroksessa (maksimiraekoko ≥ 20 mm).

Kivimastikiasfaltti (SMA) on asfaltti, jonka pääosana on karkea, lähes tasarakeinen murskattu kiviaines. Kuvassa 3 sivulla 17 on kivimastikiasfaltin SMA 16 rakeisuuskäyrä. Karkeasta aineksesta koostuvan kiviainesrungon tyhjätilan täyttää stabiloitu mastiksi. Kivimastikiasfalttia käytetään kulutuskerroksen materiaalina

vilkkaasti liikennöidyillä teillä, koska SMA kestää paremmin kuin asfalttibetoni nastarenkaiden aiheuttamaa kulutusta. Korkeamman hinnan takia SMA:ta ei käytetä vähäliikenteisillä teillä.

Kivimastiksisfalttien (SMA) kiviaineksesta on kalliomursketta vähintään 85%. Kivimastiksisfaltin sideaineiksi soveltuvat bitumit B35/50 ... B100/150 sekä kumi-bitumit KB65 ja KB75. Kivimastiksisfaltissa käytetään stabiloivana lisäaineena selluloosakuitua ja/tai luonnonasfalttia. (PANK 2000, 2008)



Kuva 3. Kivimastiksisfaltin SMA 16 rakeisuuskäyrä (PANK 2008)

Kivimastiksisfaltin parempi kulutus- ja deformaatiokestävyys asfalttibetoniin verrattuna johtuu tasaisemmasta ja keskimäärin lähempänä maksimirakekokoa olevasta raakoosta sekä sideaineena käytettävän bitumin stabiloinnista. Lisäksi kivimastiksisfaltin kiviaines valitaan kulutuskestävistä kivimateriaaleista ja kulmikkaista rakeista siten, että useat suuretkin rakeet ovat valmiissa päällysteessä kiinni toisissaan ja suurten kivirakeiden osuus päällysteen pinta-alasta on korkeampi kuin asfalttibetonissa.

Pehmeät asfalttibetonit (PAB-B, PAB-V) ovat kiviaineksen ja bitumisen sideaineen seoksia, joiden erona asfalttibetoneihin on juoksevampien bitumien käyttö sideaineina ja pienempiin kivirakeisiin painottunut raekäyrä. PAB-B on näistä vaihtoehtoista paremmin kulutusta kestävä, ja sitä käytetään kulutuskerroksen materiaalina, kun KVL on 500–2500 ajon/vrk. PAB-V:ta voidaan käyttää päällystenormien mukaan KVL:n ollessa 200–1500 ajon/vrk, mutta sitä käytetään lähinnä vähäliikenteisimmillä päällystetyillä teillä. PAB-V:ssa käytettävät viskositeetti- ja luokitellut bitumit tai bitumi-

emulsiot ovat juoksevia kuin PAB-B:ssä käytettävät, ja PAB-V voidaan valmistaa myös kylmään kiviainekseen. (PANK 2008)

Valuasfaltti (VA) on kuumana valettavaa asfalttia, eikä sitä tarvitse tiivistää. Valuasfaltin pääasiallisia käyttökohteita ovat sillat sekä erilaisten kansien ja välitasojen päällä olevat väylät ja pysäköintitasot. (PANK 2008)

Avoimen asfaltin (AA) rakenteessa on paljon tyhjätillaa. Ilmahuokokset ovat yhteydessä toisiinsa, joten asfaltin rakenne on vettä läpäisevä. Rakenne tekee avoimesta asfaltista hyvin liikennemelua vaimentavan. Avoimen asfaltin huokoisuus alentaa nastarengaskulutuskestävyyttä. Päälystetyyppejä käytetään lähinnä joidenkin kenttien ja pysäköintialueiden päällystämiseen erikoistapauksissa (PANK 2008).

2.2.2. Betonipäällysteet

Betonipäällysteet kuuluvat jäykkiin päällysrakenteisiin (vs. asfalttipäällysteet joustava päällysrakenne). Jäykän päällysrakenteen idea on, että kulutuskerros deformoituu sekä elastisesti että plastisesti hyvin vähän kuormituksen alla, jolloin kuormitus jakaantuu kulutuskerroksen alapuolisiin rakenteisiin laajalle alueelle.

Betonipäällysteet poikkeavat asfalttipäällysteistä myös siten, että betonipäällysteen sisällä on teräksisiä tukirakenteita. Tavallisia tukirakenteita ovat joko yhtenäiseen valuun käytetty raudoitusverkko tai betonilaattojen toisiinsa liittämiseksi käytetty liitin. (William 1986)

Suomen päätieverkolle tehtiin 1990-luvulla muutamia betonipäällysteisiä kokeiluosuuksia. Betonilaatujen kestävyys ei vastannut Suomen oloissa niiden korkeampaa hankintahintaa, ja viimeinen päätieverkon betoniosuus Tampereen ohitustieellä vt 9 päällystettiin kivimastiksiasfaltilla vuonna 2006. (Repo 2006)

Suomen kaupungeissa betonipäällysteitä näkee yleisimmin katetuissa pysäköintihalleissa ja -laitoksissa. Myös bussiterminaaleissa on käytetty betonipäällysteitä.

2.3. Päälystetyypin valintaan vaikuttavat tekijät

Päälystetyypin valinnassa on liikennemäärällä yleensä ratkaiseva vaikutus, koska esimerkiksi heikosti kulutusta ja deformaatiota kestävät päälystetyypit kestävät vain alhaisia liikennemääriä. Vuosikustannuksien avulla tehdään lopullinen valinta eri päällysteiden välillä. Yleisimmin käytetyt päällysteet ja niiden karkeat valintaperusteet liikennemääräluokittain ilmenevät taulukosta 1 sivulla 19. (Tielaitos 1997)

Taulukko 1. Pääasiallisesti käytetyt päällystetyypit ja niiden karkea soveltuvuus tielle liikennemäärän perusteella (Tielaitos 1997).

Liikennemäärä, KVL	Päällystetyyppi
0–300	SOP soratien pinta
200–1500	PAB-V pehmeä asfalttibetoni
500–2500	PAB-B pehmeä asfalttibetoni
1000–6000	AB asfalttibetoni
yli 3000	SMA kivimastiksiasfaltti

Jos raskaan liikenteen osuus on paikallisesti suuri esimerkiksi joukkoliikennekaistoilla, voi olla perusteltua käyttää paikallisesti tai kaistakohtaisesti päällystettä, joka kestää deformaatiota paremmin kuin väylän muilla ajokaistoilla oleva päällyste.

Muita päällystetyypin valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. kiviaineksen saatavuus ja laatu, aikaisempi päällyste, melu, ajonopeudet ja sijainti sekä tietyt ympäristötekijät. (Tielaitos 1997)

Kiviaineksen saatavuus on voimakkaasti paikallinen ja alueellinen muuttuja. Suurivolyymista, painavaa ja yksikköhinnaltaan edullista kiviainesta ei useimmissa tapauksissa kannata lähteä siirtämään toiseen maahan tai maakuntaan satojen kilometrien päähän. Kiviaineksen alkuperä vaikuttaa mm. kuulamylyarvoon ja raemuotoon, joiden vaihtelu aiheuttaa vaihtelua myös päällysteen ominaisuuksiin (Frith et al. 2004).

Kuulamylyarvolla ei voida kaikissa tapauksissa ennustaa täysin luotettavasti päällysteen kulumista, vaikka kuulamylyarvo korreloikin Vuorisen et al. (1998) tutkimuksessa kulumisen kanssa varsin selvästi korrelaatiokertoimen (r) ollessa 0,86–0,98. Viimeksi mainitussa tutkimuksessa ilmeni myös, että murskausteknisin keinoin raemuotoa parantamalla on mahdollista vähentää SMA-päällysteen kulumista 5–15 %.

Päällystetyypin valinta riippuu myös tiellä olleesta aikaisemmasta päällysteestä. Soveltuvatko aikaisemman päällysteen kulutus- ja käyttöominaisuudet myös tien nykyiseen ja uuden päällysteen elinkaaren aikaiseen käyttöön? Aiotaanko vanhaa kulutuskerrosta sekoittaa uuteen massaan päällystyksen yhteydessä? Jos vastaus ensimmäiseen tai molempiin edellisistä kysymyksistä on kyllä, on uusi päällyste suurimmalla todennäköisyydellä samanlainen kuin vanha oli uutena. Kiviaineksen kuljetusetäisyys ja vanhan kulutuskerroksen kierrättäminen vaikuttavat suoraan myös tien päällystämisen ja ylläpidon aiheuttamaan ympäristökuormaan.

Nopeusrajoitus ja liikennevirran keskinopeus vaikuttavat päällysteen valintaan. Suurissa ajonopeuksissa päätteillä riittävä kitka on tärkeä turvallisuustekijä. Lisäksi päällysteiden kulumisen lisääntyä ajonopeuksien kasvaessa 60–80 km/h yläpuolella (Unhola 2004), mikä vaikuttaa päällysteen kulutuskestävyyteen kohdistuviin vaatimuksiin. Thom

(2008, s. 17–19) vetoaa korkeiden nopeusrajoitusten teillä myös päällysteiden hiljaisuuden vaatimukseen, joita on käsitelty tarkemmin kappaleessa 2.4. Suomessa korkeiden nopeusrajoitusten teillä kulumiskestävyyttä pidetään tärkeämpänä päällysteen valintakriteerinä kuin liikennemelua.

Päällysteiden ylläpitotarve ja ylläpidon helppous ovat alueen ja käyttötarkoituksen mukaisia valintakriteereitä päällysteelle. Kaupunkiympäristössä, jossa kadun voi joutua avaamaan nopeasti esim. maanalaisten putkitöiden takia, on tärkeää että päällyste on helposti ja normaaleilla työvälineillä avattavissa ja uudelleen levitettävissä (Thom 2008, s. 21–22). Pitkä kestoikä ennen uudelleenpäällystystä on sekä kaupungeissa että niiden ulkopuolella tärkeä ominaisuus. Usein toistuvien päällystystöiden liikenteelle aiheuttamaa haittaa tulee välttää, ja ylläpitokulujen aikayksikköä kohti täytyy olla alhaisia, joten tässä palataan osin päällystetystypin valintaan liikennemäärien mukaisen kulumiskestävyyden perusteella.

2.4. Liikennemelua vaimentavien päällysteiden kulumiskestävyys ja käyttö

Liikennemelun takia voi olla tarpeellista käyttää asutuksen lähellä melua vaimentavaa päällystettä. Päällysteen ominaisuuksista rengasmeluun vaikuttavat ennen kaikkea päällysteen pintarakenne, huokoisuus ja huokoisen kerroksen paksuus. Yleisimmin Suomessa käytetty melua vaimentava päällyste on valmistettu pienirakeisesta kiviaineksesta (esim. melua vaimentava SMA 8, maksimiraekoko 8 mm vs. SMA 16, maksimiraekoko 16 mm).

Helsingin kaupungin rakennusviraston (2008) mukaan melua vaimentavasta päällysteestä suurin hyöty on 50–80 km/h nopeusrajoitusalueilla, koska rengasmelun osuus liikenteen kokonaismelusta on tällä nopeusvälillä suurin. Alhaisemmissa nopeuksissa moottorin melu ja korkeammissa nopeuksissa aerodynaaminen melu ovat suhteessa rengasmeluun suurempia, mikä vähentää melua vaimentavan päällysteen käyttökohteita. Koska päällysteen raekoko vaikuttaa myös päällysteen kulumiskestävyyteen, kestää melua vaimentava päällyste normaalia heikommin kulutusta. Tien tai kadun keskivuorokausiliikenteen (KVL) ollessa yli 12000 ajon/vrk ei melua vaimentavan päällysteen käyttöä yleensä suositella liikenteen aiheuttaman kulumisen takia.

Aksnes kirjoitti raportissaan (2009) Norjassa vuosina 2004–2009 tutkituista ympäristöystävällisistä päällysteistä. Liikennemelun ja nastarengaskulumisen välinen yhteys oli näissä tutkimuksissa sikäli relevantti, että Norjassa on kiinnitetty ympäristöystävällisten päällysteiden suunnittelussa ja valinnassa huomiota myös päällysteistä irtoavaan katupölyyn. Tutkitut päällysteet olivat pienirakeisia AB- ja SMA-päällysteitä, hyvin ohutkerroksinen päällyste, kaksi erilaista avointa asfalttia ja muutamia erikoisasfaltteja. Tutkimuksessa havaittiin, että melua vaimentavien

päällysteiden pinnankarkeus lisääntyi nastarenkaiden aiheuttaman kulumisen takia voimakkaasti jo 1–3 vuodessa. Melua vaimentavat päällysteet olivat uusina 3–9 desibeliä hiljaisempia kuin referenssipäällysteet, mutta kolmen vuoden käytön jälkeen ero oli kutistunut 1–3 desibeliin. Kulumiskestävyyteen vaikuttavilla päällysteominaisuuksilla, kuten kiviaineksen maksimiraekoolla, kovuudella ja raemuodolla oli myös odotettu yhteys katupölyn muodostumiseen: Mitä heikompia nämä muuttujat olivat kulumiskestävyiden kannalta, sitä enemmän hiukkasiakin syntyi.

Kelkka et al. (2003) tutkivat liikennemelua alentavien päällysteiden kulutuskestävyyttä ja tuotevaatimuksia HILJA-tutkimuksessa. HILJA:ssa selvisi, että useat hiljaiset päällysteet kestävät deformaatiourautumista hyvin. Ajonopeuden vaikutuksista nastarenkaiden aiheuttamaan hiljaisten päällysten kulumiseen ei voida HILJA-tutkimustulosten perusteella tehdä varmoja päätelmiä. Osassa mittauskohteista mitattiin liikennelaskennan yhteydessä keskinopeus (52–67 km/h), ja nopeusrajoitukset kaikissa mittauskohteissa olivat 50–80 km/h. Lisäksi kaikkia tutkittuja päällystetyyppejä ei ollut käytettävissä kaikilla nopeusrajoitusalueilla. Tulosten perusteella hyvin kulutusta kestävien päällysteiden urautuminen suhteessa liikennemääriin oli hieman suurempaa mittauskohteissa, joiden mitattu keskinopeus oli 67 km/h tai nopeusrajoitus 80 km/h, kuin kohteissa, joiden mitattu keskinopeus oli enintään 60 km/h. Toisaalta eri päällystetyyppien välillä nastarengaskulumisessa oli moninkertaisia eroja jo 52 km/h nopeudessa, joten tavanomaista heikommin kulutusta kestävien hiljaisten päällysteiden käyttöikää taajamanopeuksissakin voidaan lisätä merkittävästi rajoittamalla nastarenkaiden käyttöä.

3. Tie- ja katupäällysteiden urautumismekanismit

3.1. Yleistä päällysteiden urautumisesta

3.1.1. Päällysteen urautuminen

Urautumisella tarkoitetaan päällysteeseen syntynyttä poikittaista epätasaisuutta eli ajouria (kuva 4). Liian syvät urat aiheuttavat turvallisuusriskin, kun niihin kerääntyy sateella vettä, mikä lisää huomattavasti riskiä ajoneuvon hallinnan menetykseen vesiliirron takia.



Kuva 4. Ajoura ja urasyvyyden mittaus oikolaudalla. Kuvan mittaustapa ei ole standardinmukainen. (Garba 2002, s. 12)

Urat vaikuttavat myös kuivalla tiellä auton ajettavuuteen, koska poikittaiset epätasaisuudet heikentävät auton ohjattavuutta. Tämän takia auton ajolinja voi muuttua odottamattomasti, mikä nostaa onnettomuusriskiä ja on epämiellyttävää sekä kuljettajalle että matkustajille.

Urausmittayksikkö on millimetri, ja palvelutasomittauksissa (PTM) sitä mitataan mitta-autolla ajamalla mitattava osuus läpi. Mitatuista poikkiprofiileista lasketaan maksimiurien keskiarvo, joka on käytettävä tunnusluku. Tunnusluku kuvaa siis tien poikittaista epätasaisuutta (Tiehallinto 57/2005). Tieverkolla aineisto käsitellään sadan metrin mittausosuuksille keskiarvotettuna, eli jokaista satametristä

kuvaa yksi urasyvyysluku. Kaupunkien kaduilla paikallisten viranomaisten teettämässä mittauksissa aineistoa voidaan käsitellä myös lyhyemmin välein. Esimerkiksi Helsingin kaupungin Rakennusviraston ja Destian Helsingissä vuosina 2004–2011 tekemissä PTM-mittauksissa aineisto on käsitelty kymmenen metrin mittausvälien keskiarvoina.

Urasyvyyden tunnuslukuja uramittauksissa ovat tavanomaisesti vasen ura, oikea ura ja maksimiura. Lisäksi urautumista kuvaavat useat muut tunnusluvut, joista tässä tutkimuksessa ovat relevantteja SPS (Göransson 2009, s. 10) ja pinta-alamuutos:

SPS = *(keskimääräinen kuluminen ajokaistan leveydellä (mm) * ajokaistan leveys (m) * päällysteen tiheys (kg/m³)) / ((henkilöautojen lukumäärä (ajon/vrk) * nastarenkaita käyttävien autojen osuus * mittausaika (vrk)) * 1 000 000*

Pinta-alamuutos = urien poikkipinta-alan muutos tarkastelujakson aikana

SPS antaa tulokseksi yhden nastarenkaita käyttävän henkilöauton aiheuttaman päällysteiden kulumisen g/km. Urien poikkipinta-ala on päällysteen pinnan sekä tieprofiiliin ylle kiristetyn kuvitteellisen langan tai oikolaudan väliin jäävä pinta-ala.

Tien poikkileikkaukselle säännönmukaisesti sijoittuva urautuminen johtuu liikenteen aiheuttamista mekaanisista tekijöistä, yleisimmin nastarenkaiden aiheuttamasta päällysteen kulumisesta ja raskaan kuormituksen aiheuttamasta deformaatiosta. Urautuminen on vilkasliikenteisillä teillä pääasiallinen päällysteen uusimistarpeen määrittävä tekijä. Urasyvyyden toimenpiderajana Suomessa käytetään 12–25 mm sen mukaan, mikä on tien tai kadun nopeusrajoitus, liikennemäärä, toiminnallinen luokka sekä ylläpitomenetelmä. Kun urasyvyys saavuttaa toimenpiderajan, on aika tehdä päällystettyä ylläpitävä toimenpide, esimerkiksi koko ajokaistan tai -radan poikkileikkaukselta koskeva uudelleen päällystäminen tai vain urautuneita kohtia koskeva urapaikkaus.

3.1.2. Päällysteen urautumiseen vaikuttavat tekijät

Lampisen (1993, s. 137) mukaan päällysteiden urautumiseen vaikuttavat seuraavat muuttujat:

- Liikenne
- Ilmasto
- Ajoneuvo
- Rengas
- Nasta
- Päällyste
- Liikenneympäristö

Lampisen esittämät urautumiseen vaikuttavien muuttujien yksityiskohdat ja selitteet ovat nähtävissä liitteen 3 olevassa taulukossa. Liikenneympäristössä tehdyissä mittauksissa ja havainnoissa ei mikään yksittäinen muuttuja voi täysin selittää urautumista, vaan urautuminen johtuu aina useamman muuttujan yhteisvaikutuksesta.

Tässä työssä päällysteen urautumista pohditaan seuraavista näkökulmista:

- Liikenne
 - ajonopeuden vaikutus eri kulumismekanismeihin
 - liikennemäärä
 - liikenteen koostumus ajoneuvotyyppin mukaan
- Ilmasto
 - lämpötilan vaikutus päällysteen deformaatiokestävyyteen
- Ajoneuvo
 - tyyppi ja paino
- Rengas
 - rengastyypin, nastan vai kitkan
 - renkaan profiilisuhteen vaikutus nastarengaskulumiseen
- Nasta
 - paino ja määrä
 - nastan ajodynamiikka eri nopeuksissa ja kuormitustiloissa
- Päällystetyyppi
 - AB vs. SMA
 - Nastarengaskulutuskestävyys vs. deformaatiokestävyys

Zubeck et. al (2004, s. 101) mukaan nastarengaskulumiselle alttiita geometrisia kohteita välillä ovat mm. jyrkät kaarteet ja mäet, lyhyet liittymis- ja erkanemiskaistat sekä kapeat kaistat. Nämä liittyvät ajoneuvon liiketilan muutoksissa kasvaneisiin nastavoimiin ja liikenteen keskittymiseen samoille ajolinjoille.

Tutkimusaineisto valittiin siten, että muut päällysteiden urautumiseen vaikuttavat muuttujat on otettu huomioon aiemmissa tutkimustuloksissa, tai niiden voidaan olettaa pysyvän vakioina.

3.1.3. Päällysteen urautumismekanismit

Garba (2002), Villiers et al. (2005) ja White et al. (2002) ovat todenneet, että asfalttipäällysteeseen voi muodostua uria neljästä eri mekaanisesta syystä: Pinnan kuluminen, sidekerroksen leikkausdeformaatio, sitomattomien kerrosten deformaatio ja tiivistyminen (taulukko 2).

Kulumisessa päällysten pinnasta irtoaa kivirakeiden ja sideaineen vaurioitumisen seurauksena hiukkasia, mikä vähentää päällysteen paksuutta ajouran kohdalta. Kuluminen on ainoa urautumismekanismi, joka vähentää myös päällysteen massaa.

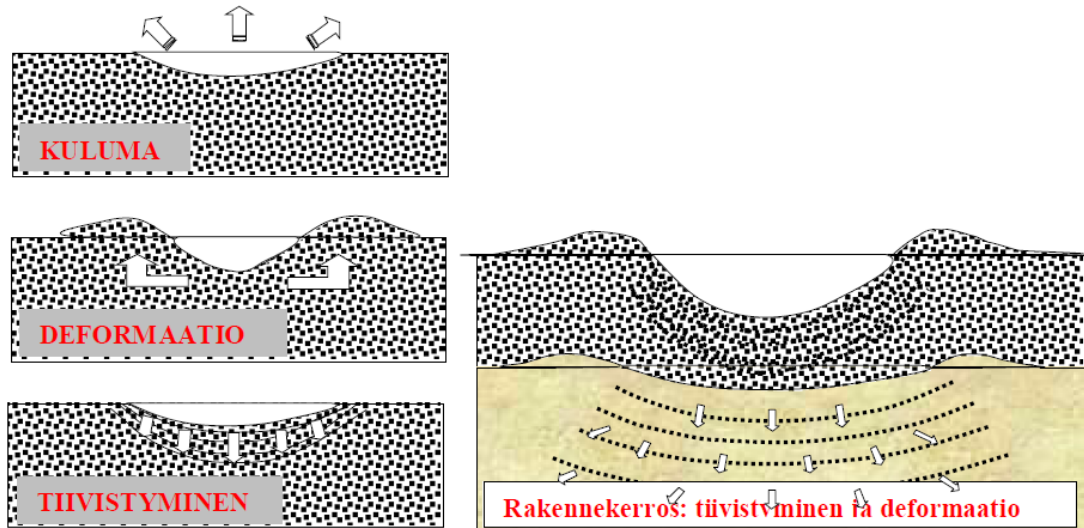
Sidekerroksen leikkausdeformaatiossa päällysteen kulutuskerroksen (ja mahdollisesti kantavan kerroksen sidotun yläosan) muoto muuttuu, mutta sitomattomat kerrokset eivät tiivisty eivätkä deformoidu. Tämän seurauksena kulutuskerroksen pohja ei pääse siirtymään pystysuunnassa alaspäin, vaan asfalttimassa siirtyy ajouran kohdalta sivulle ja osin ylös.

Taulukko 2. Päällysteen urautumismekanismien vaikutukset päällysteeseen. Iso rasti (X) = pääasiallinen vaikutus. Pieni rasti (x) = toissijainen vaikutus.

Urautumis- mekanismi	Päällysteen asfalttimassa vähenee	Asfalttimassa siirtyy urasta sivulle ja osin ylös ja tiivistyy	Päällysteen alapuolinen tien rakenne tiivistyy	Asfalttimassa tiivistyy
Kuluminen	X			
Sidekerroksen leikkaus- deformaatio		X		
Sitomattomien kerrosten deformaatio		x	X	x
Tiivistyminen				X

Sitomattomien kerrosten deformaatiossa kulutuskerroksen alapuoliset rakennekerrokset deformatuvat tai tiivistyvät, ja kulutuskerroksen pohja laskee vastaavan matkan alaspäin. Kuvassa 5 (s. 26) on sitomattomien kerrosten deformaatiosta käytetty harhaanjohtavasti termiä *rakennekerroksen deformaatio*, jonka kanssa samanaikaisesti on tapahtunut myös sidekerroksen deformaatio. Käytännössä kuva 5 esittääkin deformaation kokonaisvaikutusta tien urautumiseen havainnollisesti. Tien pinnassa näkyvän uran profiilin suhde sitomattomien kerrosten tiivistymiseen uran alla riippuu

siitä, kuinka hyvin sidekerros kestää deformaatiota suhteessa sitomattomiin kerroksiin. Kuvan 5 tapauksessa sitomattomat kerrokset ovat sekä deformatuneet että tiivistyneet, ja sidekerroksen deformaatio on ollut voimakkaampaa kuin sitomattomien kerrosten muodonmuutokset yhteensä.



Kuva 5. Päällysteen urautumismekanismit. (Laaksonen et al. 2004, s. 16) Kuvassa esitetystä kulumasta on käytetty tässä tutkimuksessa termiä kuluminen ja deformaatiosta termiä sidekerroksen leikkausdeformaatio.

Tiivistymisessä päällysteen kulutuskerros tiivistyy, koska päällysteen tyhjätila pienenee. Tiivistymisessä päällysteen paksuus ajouran kohdalta vähenee, massa säilyy ennallaan ja tiheys kasvaa. Tiivistymisessä päällysteen pinta ei kohoa ajourien vierestä vastaavasti kuin plastisessa deformaatiossa, koska päällystemassa ei siirry ajourien kohdalta sivulle vaan painuu pienempään tilaan. Tässä tutkimuksessa käytetty termi *kulutuskerroksen deformaatio* vastaa kuvan 5 urautumismekanismeista yhdistettyä deformaatiota ja tiivistymistä.

Näistä urautumismekanismeista kuluminen on selvästi nastarenkaiden aiheuttamaa, ja deformaation sekä tiivistymisen eri muodot johtuvat pääosin raskaasta liikenteestä. Koska useat urat johtuvat kahden tai useamman urautumismekanismin yhteisvaikutuksesta, täytyy nastarengasurautumisen määrittämiseksi olla tietoa paljon useammasta taustamuuttujasta kuin urasyvyydestä ja sen kasvusta.

3.2. Nastarenkaan tiekosketuksen aiheuttama päällysteen kuluminen

3.2.1. Nastan ja päällysteen kosketuksen vaiheet

Lampinen (1993, s. 82) havaitsi koeratutkimuksissaan nastan ja päällysteen kosketuksessa seuraavat vaiheet:

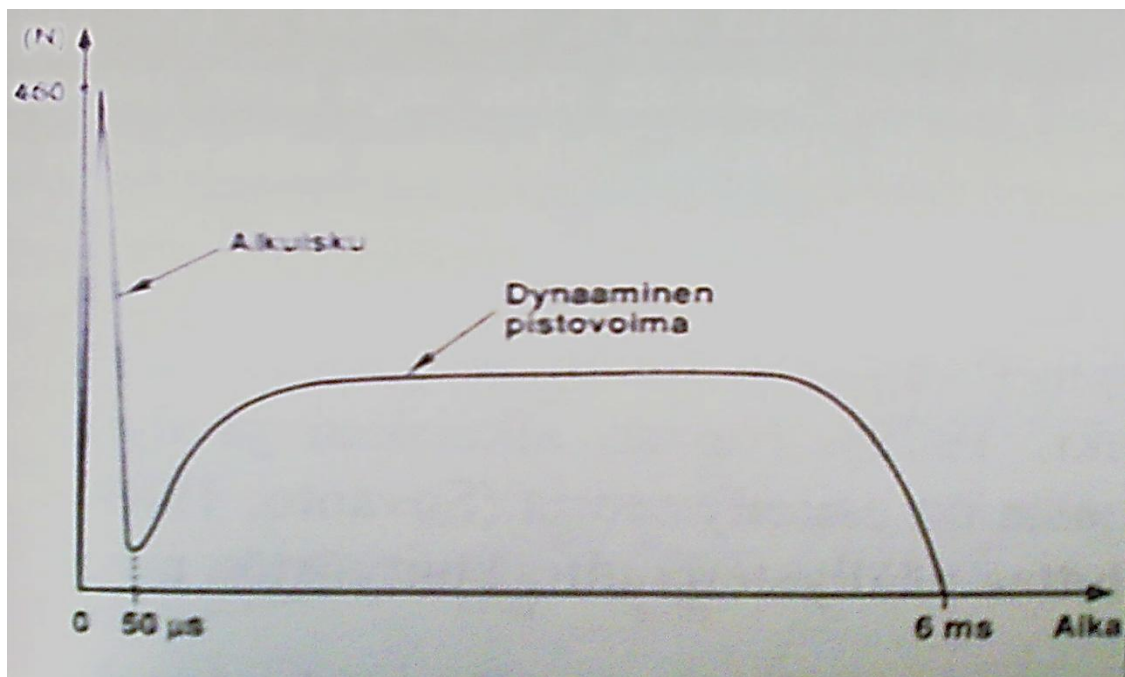
1. dynaaminen alkuisku
2. dynaaminen pistovoima
3. hierto
4. raapaisu nastan irrotessa

Nastakosketuksen ensimmäinen vaihe, dynaaminen alkuisku, liittyy nastan liike-energian purkautumiseen nastan osuessa tienpintaan. Liike-energia on verrannollinen nastan massaan ja pystynopeuteen sen kohdatessa tien pinnan:

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad (\text{kaava 1})$$

missä m on nastan massa ja v nastan pystynopeus.

Kuvan 6 mukaisesti nastan pistovoima laskee jyrkästi lähelle nollaa, kun alkuisku päättyy. Tämän jälkeen nastasta tienpintaan alkaa vaikuttaa dynaaminen pistovoima, joka syntyy nastan ollessa painautuneena tienpintaa vasten.



Kuva 6. Periaatekuva päällysteeseen asennetulla voima-anturilla mitatusta nastan pistovoimasta ajan funktiona 1980-luvun renkailla ja nastoilla. (Lampinen 1993, s. 83)

Nastojen painon, ulkoneman ja pistovoiman pienenemisestä seuraa se, etteivät 1980-luvulla mitatut alkuiskun ja pistovoiman suuruus ole enää vertailukelpoisia nykyisiin nastoihin ja renkaisiin, mutta Lampisen tutkimuksista selviää silti hyvin, että nastan ja tienpinnan välinen kosketus tapahtuu useassa vaiheessa.

Lampinen (1993, s. 84, 89) toteaa, että hiertovaiheeksi nimitetään sitä osaa kulumisprosessista, joka aiheutuu nastan horisontaalisesta liikkeestä päällysteen pinnalla ja jonka seurauksena on päällysteen pinnan rikkoutuminen ja vähäinen materiaalin irtautuminen, ”kuluminen”. Hiertovaihe on kestoajaltaan pisin rasitusvaihe, jonka pituus riippuu mm. renkaan ja tienpinnan välisestä ajogeometriasta sekä ajoneuvon liiketilan muutoksiin liittyvästä luistosta. Hiertovaiheen pistovoima määreytyy rengas- ja nastatyypin, nastaulkoneman ja nastan iskunopeuden mukaan.

Lampisen (1993, s. 96) mukaan nastakosketuksen irtoamisvaiheessa nastan, kumin ja tienpinnan väliset jännitykset aiheuttavat sen, että nasta raapaisee, tekee ”jälkipotkun”. Raapaisten vaikutus verrattuna dynaamiseen alkuiskuun ja pistovoimaan on vähäinen, ja se voidaan joko sisällyttää osaksi hiertokomponenttia tai jättää huomiotta kulumismuuttujana.

3.2.2. Kiviaineksen ja sideaineen kuluminen nastan tiekosketuksessa

Päällysteiden kulumiseen vaikuttaa yhden nastapiston aiheuttama kuluminen kerrottuna pistojen määrällä. Pistojen määrään vaikuttavat nastarengas- ja ajoneuvomuuttujat. Nastapiston aiheuttama kuluminen tapahtuu sekä kiviaineksen että mastiksin kulumisena. Mastiksi kuluu yleensä nopeammin kuin kiviaines, jolloin päällyste karkeutuu, kuten on havaittavissa teillä nastarengaskauden aikana ja erityisesti keväällä. Kuluminen tapahtuu karkean runkokiviaineksen osalta vähittäin iskun ja hierron seurauksena. Pienirakeinen kiviaines sen sijaan voi vähittäisen kulumisen lisäksi irrota nastaraapaisten seurauksena kokonaisuutena ”isona” kappaleena tai nastaisku voi hajottaa sen, jolloin päällysteestä poistuu normaaliin nastaiskun tai -hierron aiheuttamaan kulumaan verrattuna huomattavasti suurempi ainesmäärä. (Lampinen 1993, s. 100–102)

Yksinkertaisesti nasta rikkoo päällysteen pintaa, koska kovametallinen nasta on huomattavasti kovempaa materiaalia kuin nastan tiekosketuksen vastaanottava kivi ja bitumi. Voidaan ajatella, että nasta on tienpintaan osuessaan kuin pieni vasara, pora ja teräsharja: Alkuiskussa terävä vasara napauttaa nopeasti päällystettä. Vasaran isku on vähemmän vahingollinen, jos se osuu keskelle ehjää isoa kiveä, jossa ei ole valmista halkeaman alkua. Jos vasara osuu kiveä heikompaan bitumiin, pieneen kiveen tai johonkin aikaisempaan vauriokohtaan, on jälki pahempaa. Dynaamisessa pistovoimassa nasta käyttäytyy kuin pora. Poran terä on painettuna tienpintaa vasten paikoilleen, ja se yrittää tehdä reikää kiveen ja bitumiin. Hiertovaiheessa nasta on kuin teräsharja, se harjaa kaikki potentiaalisesti irtoamaisillaan olevat hiukkaset irti päällysteen pinnasta sekä viimeistelee poran ja vasaran työn.

3.3. Päällysteen deformaatio liikenteen vaikutuksesta

3.3.1. Uuden päällysteen alku-urautuminen

Sainion (2011, s. 21) mukaan alku-uran muodostumismekanismiin täytyy perustua päällysteen tiivistymiseen eli tyhjätilan pienenemiseen ja päällysteen plastiseen deformaatioon, jossa päällyste siirtyy sivuille ja ylöspäin. Lampisen (1993, s. 80–81) mukaan myös työvirheet tiivistettäessä ja täytettäessä vanhoja syviä uria sekä liikenteen päästäminen liian varhain juuri päällystetylle lämpimälle asfalttipäällysteelle aiheuttavat alku-urautumista.

Jos liikenteelle avatulla tiellä uuden päällysteen huokosissa on ilmaa niin paljon, että liikenteen kuormitus riittää painamaan tyhjätilan pysyvästi kasaan ja ylimääräisen ilman pois huokosista, tapahtuu uuden päällysteen tiivistymistä.

Päällysteen alku-urautumisen ajallisesta kestosta on olemassa useita keskenään erilaisia näkökantoja. Lampisen (1993, s. 131) mukaan alku-urautumisella tarkoitetaan päällystämivuonna syntynyttä uuden päällysteen urautumista. Sainion (2011, s. 18) mukaan Liikennevirasto olettaa alku-urautumisen päättyvän tai olevan merkityksetöntä viimeistään kuuden viikon kuluttua päällystämisestä, koska alku-urat on mitattava uusilta vilkasliikenteisiltä teiltä Suomessa 3–6 viikon kuluttua päällysteen valmistumisesta. Sainio toteaa myös asfalttipäällysteen urautuvan valmistumisensa jälkeisinä päivinä huomattavasti nopeammin kuin seuraavina vuosina, ja että alku-urat ovat uuteen asfalttipäällysteeseen liikenteelle avaamisen jälkeen muodostuvat urat.

Sainion (2011) mittaustuloksista selviää, että jokaisella tutkitulla päällystystyömenetelmällä ja mittalaitteella suurin osa alku-urasyvyydestä on muodostunut jo ennen päällystetyn tien avaamista liikenteelle. Urasyvyyden kasvu ensimmäisinä päivinä liikenteelle avaamisen jälkeen oli muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta havaittavaa, mutta verrattaessa urasyvyyttä 3–7 vuorokautta liikenteelle avaamisen jälkeen urasyvyyteen 3–6 viikkoa liikenteelle avaamisen jälkeen, oli urasyvyyden kasvu käytännössä pysähtynyt ensin mainitun ajanjakson kohdalla yhtä profilometrillä mitattua oikeaa ajouraa lukuun ottamatta. Lisäksi työssä todettiin, että huomattava osa mitatuista alku-urasyvyyksistä johtuu päällysteen karkeudesta ja epätasaisuudesta, eli päällysteen jälkitiivistyminen ja deformaatio eivät ole ainoita alku-urien mittauksissa näkyviä tekijöitä.

Sainio (2011, s. 104) kirjoittaa, että Lampisen (1993) tutkimuksessa keskimääräiset alku-urasyvyydet Suomessa 1980-luvulla olivat liikennemäärän mukaisesti 2,9–3,9 mm liikennemäärällä 1500–9000 (KVL, ajon/vrk). Vastaavilla liikennemäärillä nykyään keskimääräiset alku-urasyvyydet ovat 2,0–2,4 mm. Alku-urasyvyys kasvaa hieman liikennemäärien kasvaessa. Mahdollisia syitä alku-urautumisen vähenemiselle ovat ainakin ne, että nykyään käytetään yhtä tai kahta tunkeumaluokkaa jäykempiä bitumeja

ja SMA-päällysteitä vilkaisliikenteisillä teillä. Mittaustulokset eivät myöskään ole täysin vertailukelpoisia, koska mittaustekniikka on kehittynyt merkittävästi.

Uuden päällysteen *alkukulumisen* mekanismi poikkeaa olennaisesti alku-urautumisesta. Alkukuluminen tarkoittaa uuden päällysteen nopeaa kulumista materiaalin irrotessa päällysteen pinnasta. Alkukuluminen johtuu siitä, että uuden päällysteen pinnassa on pinta-alayksikköä kohti huomattavasti vähemmän suuria kivirakeita kuin päällysteen rakenteessa keskimäärin. Koska sideaine ja pienet kivirakeet kuluvat nastarenkaan vaikutuksesta nopeammin kuin suuret, irtaota uuden päällysteen pinnasta massaa enemmän kuin hieman vanhemman päällysteen. Esimerkiksi Lampinen (1993, s. 102–103, 106) on esittänyt AB20-päällysteen kulutuskestävyyden olevan parhaimmillaan n. 8–12 mm urasyvyyksillä, mikä tukee sitä teoriaa, että urasyvyyden ollessa puolet maksimiraekoosta on suurten kivirakeiden osuus päällysteen pinta-alayksikköä kohti suurin. Niissä aiemmissa tutkimuksiin perustuvissa päätelmissä, joissa alku-urautumista on esitetty tapahtuvan ensimmäisen vuoden aikana päällystämisen tai kauemminkin, on alku-urautumiseen sisällytetty myös alkukuluminen.

Analysoitaessa urautumista on havainnoista yksinkertaisinta jättää pois alle vuosi ennen urasyvyysmittauksia päällystetyt kohteet. Jos analyysiin on havainnon muun arvokkuuden takia painava syy ottaa kohde, josta on tehty jokin mittaus päällystysvuonna, on tuloksia arvioitaessa otettava huomioon päällystysajankohta ja uuden päällysteen nopea urautuminen.

3.3.2. Kulutuskerroksen deformaatio

Kulutuskerroksen plastinen deformaatio on muodonmuutosmekanismi, jossa kulutuskerroksessa olevan massan muoto muuttuu pysyvästi liikenteestä syntyneen pintapaineen aiheuttamasta leikkausjännityksestä. Kulutuskerroksen leikkausdeformaatioissa päällysteen kokonaismassa, tilavuus ja tiheys säilyvät käytännössä ennallaan, mutta päällysteen paksuus tien poikkileikkauksen eri osissa muuttuu. Tässä tutkimuksessa leikkausdeformaatiota käsitellään tiivistymiseen verrattuna erillisenä asiakokonaisuutena. Leikkausdeformaation ja plastisen deformaation tärkeimpänä erona on se, että plastiseen deformaatioon sisältyy muodonmuutoksen lisäksi myös tiivistyminen, jolloin päällysteen tiheys muuttuu.

Thom (2008, s. 22) toteaa urien asfaltissa aiheutuvan erityisesti raskaiden kuormitusten liikkua hitaasti, koska bitumit ovat säilyttäneet huoneenlämmössäkin nestemäisiä ominaisuuksiaan siten, että hitaasti liikkuva kuormitus mahdollistaa bitumien deformaation ja kivirakeiden liikkumisen toisiinsa nähden. Garban (2002, s. 7) mukaan vastaava deformaatiourautuminen johtuu asfalttiseoksen riittämättömästä leikkauslujuudesta suhteessa liikenteen aiheuttamiin toistuviin raskaisiin kuormituksiin. Koska bitumisten sideaineiden viskositeetti on voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta, heikkenee asfalttiseoksen leikkauslujuus voimakkaasti lämpötilan noustessa, ja

deformaatiourautumista tapahtuu erityisen voimakkaasti kesällä päällysteen lämpötilan ollessa korkea.

Garba (2002, s. 83) toteaa, että päällysteen deformaatio voidaan jakaa neljään eri alalajiin:

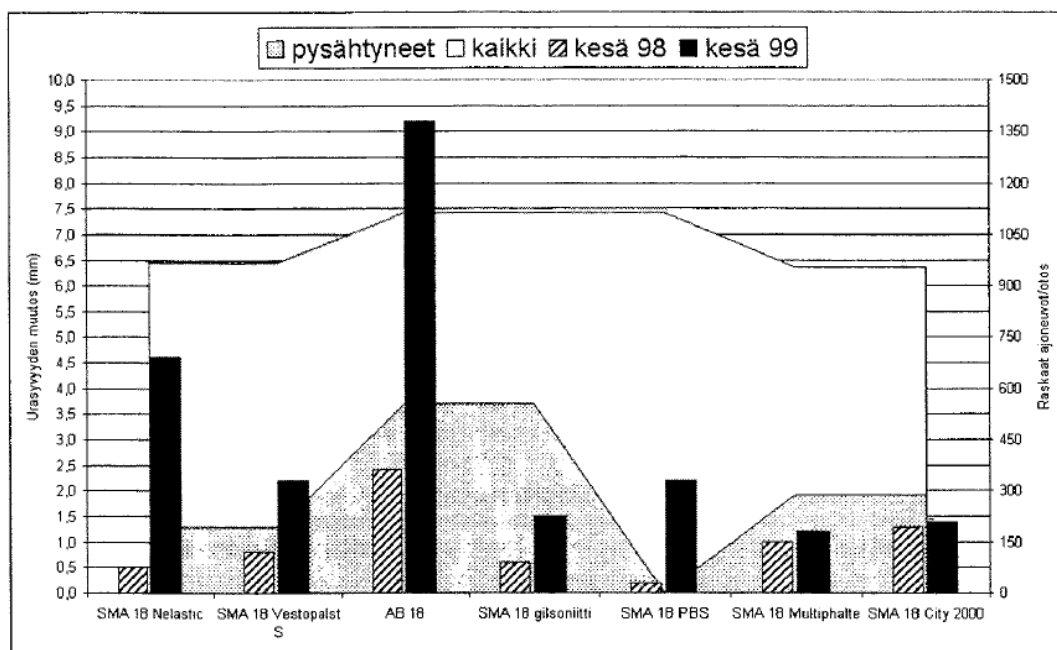
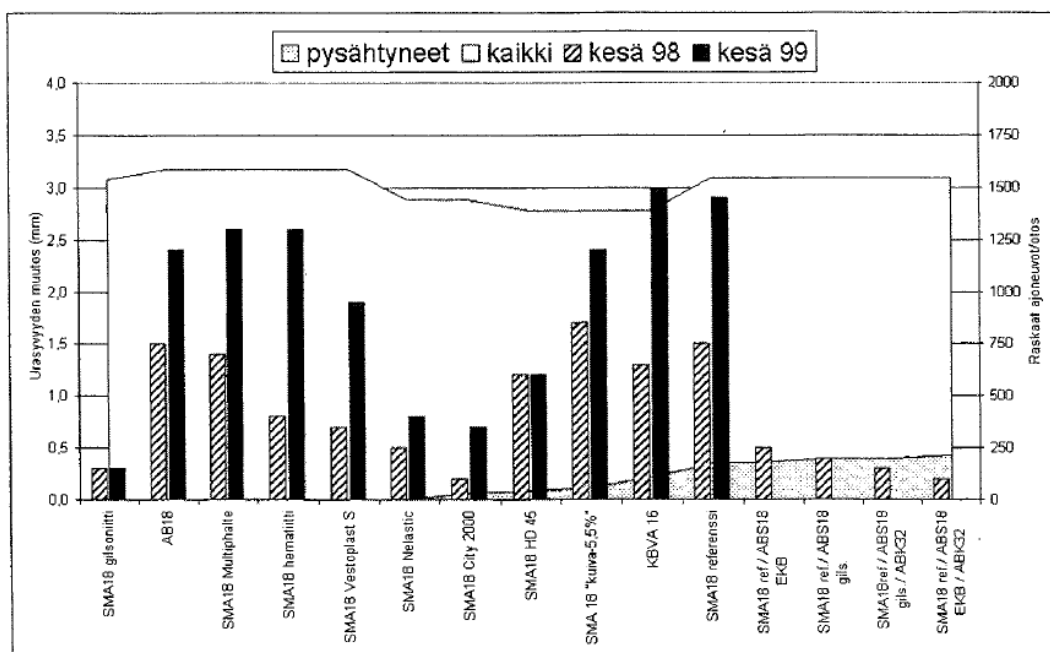
- Elastinen (palautuva, ei riippuvainen kuormituksen kestosta)
- Viskoelastinen (palautuva tai palautumaton, riippuvainen kuormituksen kestosta)
- Plastinen (palautumaton, ei riippuvainen kuormituksen kestosta)
- Viskoplastinen (palautumaton, riippuvainen kuormituksen kestosta)

Plastiseen deformaatioon vaikuttavat liikenteellisistä tekijöistä tien poikkileikkauskohdan ylittävien ajoneuvojen lukumäärä, niiden akselipaino sekä kuormitetun alan koko. Viskoplastiseen deformaatioon vaikuttaa edellisten lisäksi kuormituksen kesto.

Tielaitos Tie- ja liikennetekniikka teetti vuosina 1998–2000 selvityksen 36/2000 ”Asfalttipäällysteiden deformatioiden vähentäminen”, jossa selvitettiin eri tienkohtien alttiutta deformaatiolle ja haettiin hyvin deformaatiota kestäviä asfalttipäällysteratkaisuja. Tutkimuksessa Kehä III:lle tehtiin kesällä 1998 deformaatiokoetie, jolle päällystettiin yhteensä 31 osuutta. Kaikilta koeosuuksilta mitattiin poikkiprofiilit heti niiden valmistuttua, syksyllä 1998 sekä keväällä ja syksyllä 1999.

Tielaitoksen tutkimustuloksista on havaittavissa mm. seuraavia asioita:

- Kesä 1998 oli selvästi keskimääräistä viileämpi (kesä-elokuun keskilämpötila Helsingin Kaisaniemessä $14,8^{\circ}\text{C}$). Kesä 1999 oli keskimääräistä lämpimämpi (kesä-elokuun keskilämpötila Helsingin Kaisaniemessä $17,3^{\circ}\text{C}$). Kesällä 1999 deformaatiourautuminen on ollut kauttaaltaan voimakkaampaa, vaikka koeosuudet olivat kesällä 1998 vasta-päällystettyjä ja niissä esiintyi alku-urautumista. (kuvat 7 ja 8 sivulla 32).
- Urasyvyyden kasvulla ja pysähtyvien ajoneuvojen lukumäärällä on ollut selvä positiivinen korrelaatio. Osa koepäällysteistä on deformatioiden pysähtyneiden ajoneuvojen vaikutuksesta herkemmin uuden päällysteen alkutiivistymisen takia (suhteellinen muutos pysähtyneiden ajoneuvojen määrä vs. urasyvyyden muutos suurempi v. 1998), osa puolestaan deformatioiden herkemmin lämpötilan vaikutuksesta. (Suhteellinen muutos suurempi v. 1999)
- Koetien ohituskaistaosuuksilla, joilla raskaan liikenteen KVL oli tutkimuksen aikaan 200–400 ajon/vrk, oli urasyvyyden muutos talvella 1998–99 voimakkaampaa kuin kesinä 1998 ja 1999 yhteensä. Oikean ajokaistan koeosuuksilla, joilla raskaan liikenteen KVL oli tutkimuksen aikaan 900–1600 ajon/vrk, oli urasyvyyden muutos suurimmassa osassa mittauskohteita talvella 1998–99 vähäisempää kuin kesinä 1998 ja 1999 yhteensä.



Kuvat 7 ja 8. Tielaitoksen deformaatiokoetuloksia Kehä III:lla vuosina 1998–99. Kaaviossa urasyvyyden muutos koepäällystetyypeittäin, raskaiden ajoneuvojen KVL ja pysähtymään joutuvien ajoneuvojen lukumäärä.

Päällysteen deformaatio riippuu lämpötilasta ja pysähtyneiden tai hitaasti liikkuvien raskaiden ajoneuvojen lukumäärästä. Tielaitoksen (2000) tutkimustulosten yhteydessä voidaan esittää, että koetiellä olleet erot liikenteen koostumuksessa ajoneuvotyypeittäin eri ajokaistojen välillä ovat olleet niissä oloissa kriittisiä päällysteen ensisijaisen urautumismekanismin kannalta: Koetien oikean ajokaistan raskaan liikenteen osuus oli

14–18 % KVL:sta, ja näillä osuuksilla urasyvyyden kasvu kesällä (eli pääosin päällysteen tiivistyminen ja plastinen deformaatio) oli voimakkainta.

Koetien ohituskaistaosuuksilla, joilla raskaan liikenteen osuus oli 4–6 % KVL:sta, urasyvyyden kasvu talvella (eli pääosin nastarengaskuluminen) oli voimakkainta. On tosin huomattava, että ohituskaistaosuuksien urasyvyyden kasvu talvella oli pääosin voimakkaampaa verrattuna vastaaviin päällystelaatuihin oikealla kaistalla, vaikka ohituskaistan liikennemäärät olivat kautta linjan alhaisempia kuin oikean ajokaistan. Tämän syyksi voidaan esittää, että vähäinen raskas liikenne ei tiivistänyt ohituskaistaosuuksien päällystettä päällystyskesänä samalla tavalla kuin oikean ajokaistan koeosuuksien, minkä takia nastarenkaiden uuden päällysteen pinnasta sideainepitoista massaa irrottava vaikutus oli ohituskaistaosuuksilla ensimmäisenä talvena suuri. Lisäksi ajonopeudet ohituskaistalla olivat hieman korkeampia kuin oikealla ajokaistalla.

Deformaation aiheuttama urautuminen on havaittavissa kaupunkialueella erityisesti bussikaistoilla, liikennevaloissa sekä tavaraliikenteen runsaasti käyttämällä lastaus- ja purkualueilla. Jos ura on syntynyt ainoastaan kulutuskerroksen deformaation vaikutuksesta, eroaa se nastarengasuraan verrattuna sekä muodoltaan että raideleveydeltään: Deformaatiourien raideleveys muistuttaa raskaan liikenteen raideleveyttä (n. 180–190 cm), ja nastarengasurien raideleveys henkilö- ja pakettiautoliikenteen raideleveyttä (n. 140–150 cm). Jos kulutuskerroksen deformaatio on ollut selvästi voimakkaampaa kuin päällysteen tiivistyminen ja sitomattomien kerrosten deformaatio, on päällysteen pinta urien reunoilta kohonnut. Koska urautumiseen vaikuttaa yleensä useampi kuin yksi mekanismi, tulee visuaalisesti ja mittalaitteella erotettavaan uran muotoon piirteitä useammista eri urautumismekanismeista. (White et al. 2002)

Kulutuskerroksen plastisen deformaation aiheuttaman urautumisen mittausta saadaan erotettua nastarengaskulumisen mittauksesta parhaiten siten, että tehdään mittaukset vähintään kaksi kertaa vuodessa ja tunnetaan raskaan liikenteen osuus mittauspisteessä. Päällyste ei deformoidu merkittävästi kylmänä vuodenaikana, eivätkä nastarenkaat kuluta päällysteitä merkittävästi sellaisina vuodenaikoina, jolloin nastarenkaiden käyttö on kiellettyä tai tarpeetonta.

3.3.3. Sitomattomien kerrosten deformaatio

Deformaatiota syntyy kaikkiin tien rakennekerrokseen päällysteestä pohjamaahan. Sidotuissa kerroksissa deformaatio voi parhaimmillaan olla lähes olematon, mutta sitomattomissa kerroksissa sitä esiintyy aina mitattavia määriä.

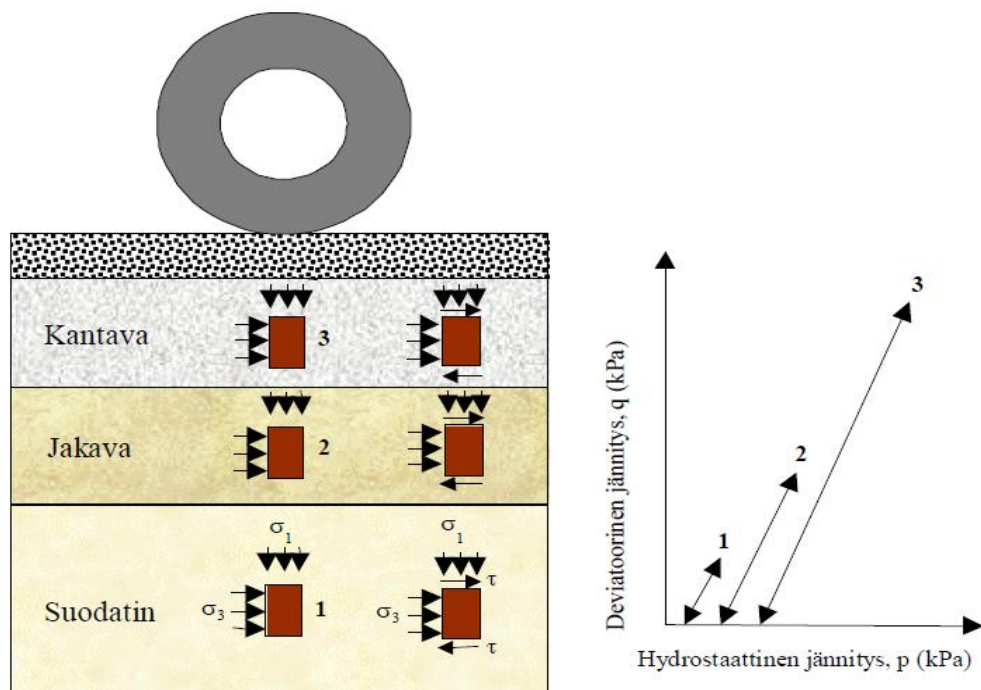
Sitomattoman kerroksen deformaatio määräytyy kuormituksesta, materiaali- ja tilaominaisuuksista: pysty- ja leikkausjännitys, tiiveys, kosteus ja kuormituskertaluku.

Lämpötila ja kosteus vaikuttavat sitomattomien kerrosten deformaatioon. Sitomattomilla materiaaleilla löyhtymistä ja uudelleentiivistymistä tapahtuu myös jäätymis-sulamissykliä myötä. Uudelleentiivistyminen johtaa osalla materiaaleja kosteuden läsnä ollessa myös deformaatioon.

Pohjamaan deformaatio määräytyy samoista tekijöistä, ja rakenteellinen mitoitus – toteutunut tien rakennekerrosten paksuus – määrää deformaation. Deformaatioon ei kuitenkaan lasketa konsolidaatiopainumaa pohjamaassa (tai rakennekerroksissa). Stabiloitujen kerrosten deformaatio määräytyy samoin kuin päällysteillä ja sitomattomissa kerroksissa. Kuormitus (pystysuora ja leikkaava), tyhjätila, kosteus ja stabiloitien pysyvyys vaikuttavat deformaation määrään.

Deformaatiota ei välttämättä kehity pelkästään tien ja kadun rakennekerroksissa, vaan sitä saattaa muodostua merkittäviä määriä myös pohjamaan pintaan erityisesti, jos tierakenne on hyvin ohut ja rakennekerrosten jäykkyydet alhaisia. (Laaksonen et al. 2004, s. 15)

Liikenteen aiheuttaman pintapaineen vaikutus vaimenee ja leviää laajemmalle pinta-alalle syvemmällä tien rakennekerroksissa. Kuvassa 9 on esitetty pyöräkuorman aiheuttama jännitysmuutos tien eri kerroksissa.



Kuva 9. Pyöräkuorman aiheuttama jännitysmuutos tien eri kerroksissa. Kuormituksen keskilinjän ulkopuolella materiaaliin syntyy myös leikkausjännityksiä (Laaksonen et al. 2004, s. 17)

Belt et al. (2002, s. 25–26) mukaan sitomattomien kerrosten deformaation kriittisyys urautumismekanismina ja vaikutukset urautumiseen riippuvat sidotun kerroksen paksuudesta ja jäykkyydestä. Jos sidottu kerros on ohut ja/tai joustava, sen merkitys koko tierakenteen kuormituskestävyyteen on vähäinen. Tällöin liikennekuormitus aiheuttaa sitomattomaan kantavaan kerrokseen niin suuria rasituksia, että kerrokseen alkaa syntyä pysyviä muodonmuutoksia. Päällysteen ollessa ohut on sitomaton kantava kerros kuormituskestävyyden kannalta tärkein tien rakenteellinen osa. Sen sijaan päällysteen väsyminen ei ole ohutpäällysteisillä tierakenteilla yleensä kriittinen tekijä. Sitomattomien kerrosten paksuus vaikuttaa alusrakenteeseen syntyviin rasituksiin ja sitä kautta koko tierakenteen toimintaan. Mitä paksumpi on sitomaton päällysrakenne, sitä pienemmät ovat liikennekuormituksen aiheuttamat alusrakenteen rasitukset ja niiden aiheuttamat pysyvät muodonmuutokset. Sen sijaan pehmeällä alusrakenteella päällysrakenteen paksuntaminen (massan kasvu) lisää alusrakenteen painumia. Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset näkyvät tien pinnalla pääosin poikkisuuntaisena epätasaisuutena. Kapeilla teillä liikennekuormitus välittyy rakenteeseen lähellä tien reunaa aiheuttaen reunan painumista. Tämän seurauksena pysyvät muodonmuutokset eivät ilmene kokonaisuudessaan leveistä teistä poiketen ajolinjojen kohdalle syntyvänä urautumisena.

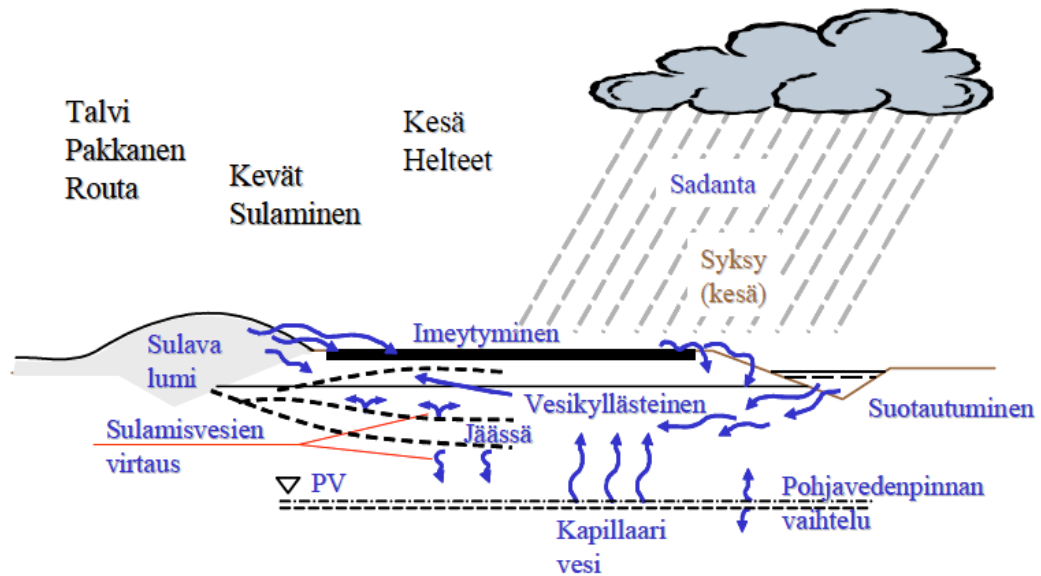
Paksupäällysteisten tierakenteiden päällystekerros alkaa vaurioitua väsymällä liikennekuormituksen ja sitä kautta sidotun kerroksen alapinnan vetomuodonmuutosten toistuessa riittävän monta kertaa. Päällysteen väsyminen on asteittain kehittyvä ja ilmenee vaurioitumisen loppuvaiheessa päällysteeseen syntyvinä verkkohalkeamina. Päällysteen väsyminen on yleensä kriittinen tekijä paksupäällysteisillä tierakenteilla. Liikennekuormituksesta päällysteen alapintaan kohdistuvat rasitukset riippuvat päällysteen ominaisuuksien lisäksi merkittävästi ylimmän sitomattoman eli kantavan kerroksen jäykkyydestä. (Belt et al. 2002)

3.4. Muut kuin liikenteelliset tekijät päällysteiden urautumisessa

Ympäristötekijät urauttavat päällystettä sekä itsenäisinä muuttujina että yhteisvaikutuksessa liikenteellisten muuttujien kanssa.

Päällysteen lämpötila vaikuttaa paljaan päällysteen urautumiseen kahdella asfalttimastiksina ominaisuuksista riippuvalla tavalla: Alhaisissa lämpötiloissa mastiksi muuttuu hauraaksi, jolloin se on altis nastaiskun ja -hierron aiheuttamalle murtumiselle. Korkeissa lämpötiloissa bitumin viskositeetti on alhainen, jolloin kulutuskerroksen plastinen deformaatio on voimakasta.

Kuvassa 10 (s. 36) on esitetty kootusti tietä kuormittavat ilmastotekijät, ja taulukossa 3 (s. 36) ilmastotekijöiden yhteisvaikutuksia liikenteen aiheuttamien urautumismekanismien kanssa.



Kuva 10. Tietä kuormittavat ilmastotekijät (Belt et al. 2002, s. 20)

Taulukko 3. Ympäristötekijöiden ja liikenteen aiheuttamien urautumismekanismien yhteisvaikutuksia.

Ympäristötekijä	Urautumismekanismi, johon vaikuttaa	Miten vaikuttaa
Lämpötila, kylmä	1) Nastarengas 2) Raskas liikenne	1) Bitumi hauras, murtuu helposti 2) Väsyminen
Lämpötila, kuuma	1) Plastinen deformaatio 2) Raskas liikenne	1) Bitumin viskositeetti alhainen, päällyste deformaatio helposti 2) Väsyminen
Sade	1) Nastarengas 2) Raskas liikenne	1) Hydrostaattinen paine, lisääntynyt hiesto, märkä päällyste kuluu nopeammin 2) Rakennekerrosten löyhtyminen
Routa	Deformaatio useassa kerroksessa	Painumia ja halkeamia päällysteeseen

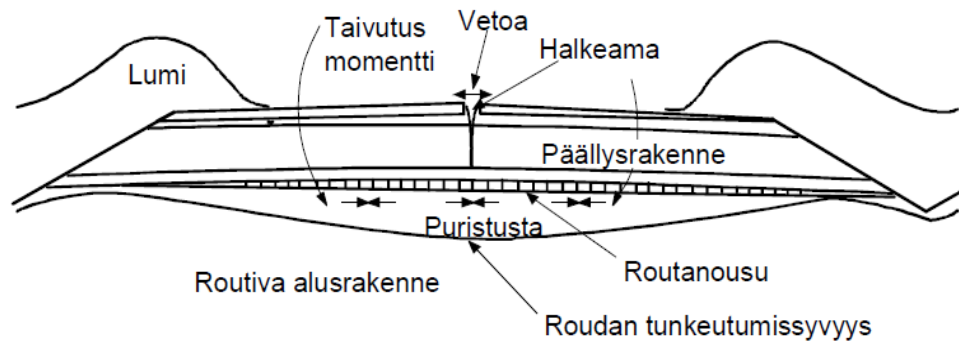
Sade ja märkä tienpinta vaikuttavat nastarenkaiden aiheuttamaan päällysteiden kulumiseen. Lampinen (1993, s. 122–123) väittää veden vaikutuksen päällysteiden nastarengaskulutuksen kestävyyyteen selittyvän seuraavilla hypoteeseilla:

1. *Päällysteen raoissa ja huokosissa oleva vesi joutuu nastaiskun aikana dynaamisen hydrostaattisen paineen lisäyksen alaiseksi. Se aiheuttaa kiviaineksen rakeiden välille suuria voimia, jotka irrottavat rakeita toisistaan ja höllentävät niiden välisiä sidoksia.*
2. *Nastaiskun jälkeisessä hierrossa nasta pääsee liikkumaan pitemmän matkan märällä päällysteellä kuin kuivalla päällysteellä, koska renkaan kosketuspinnan ja tien pinnan välinen kitka on märkänä pienempi.*
3. *Kuivan päällysteen pinnalle kertyy nastarengaskulutuksen seurauksena päällysteestä irronnutta hienoaainesta, joka pinnalla ollessaan toimii iskuenergiaa sitovana vaimentajana nastaiskuja vastaan. Märällä pinnalla, kun vettä on paljon tai se on vaikuttanut pitkään, on pinta huuhtoutunut paljaaksi, jolloin nastaisku vaikuttaa suoraan päällystepintaan.*

Leutoina talvina päällysteiden kulumisen lisääntyä, koska päällyste altistuu nastarengaskulumiselle paljaana ja usein märkänä. Vähälumisina pakkastalvina päällysteiden kulumisen lisääntyä, koska kovan pakkasen haurastama paljas päällyste kuluu nopeasti nastarenkaiden vaikutuksesta.

PAB-päällysteisillä teillä keväällä tierakenteen alkaessa sulaa heikkenee rakenteen kuormituskestävyys huomattavasti. Silloin liikennekuormitus aiheuttaa tien pinnan epätasaisuuksien seurauksena rakenteeseen suuria (dynaamisia) sysäyskuormituksia, minkä vuoksi jo sulaneeseen päällysrakenteen osaan syntyy helposti pysyviä muodonmuutoksia. Sulamisrintaman edetessä alusrakenteeseen, myös alusrakenteeseen alkaa muodostua pysyviä muodonmuutoksia sulamispehmenemisen seurauksena. Tienkohdissa, missä routanousut ovat suuria, myös pysyvät muodonmuutokset ovat yleensä suuria. Tämän seurauksena pituussuuntaiset epätasaisuudet sijaitsevat yleensä samoilla kohdilla sekä talvella että kesällä.

Routanousujen aiheuttamat halkeamat voivat olla pituushalkeamia tai muita ajokaistahalkeamia, jotka esiintyvät vinosti, poikkisuuntaisesti tai muuten epämääräisesti tien pituussuuntaan nähden. Vaikka halkeamat ilmenevät päällysteen halkeiluna, käytännössä halkeamat usein ulottuvat syvälle tierakenteeseen (kuva 11 sivulla 38). Halkeamien perimmäisenä syynä on epätasaisen routanousujen aiheuttama vetorasitus päällysrakenteen yläosassa. Routanousun aiheuttaman vetorasituksen ylittäessä rakenteen lujuuden tierakenteeseen muodostuu halkeamia päällysrakenteen yläosasta alkaen. (Belt et al. 2002, s. 50–52)



Kuva 11. Pituussuuntaisen routahalkeaman syntyminen tien keskialueelle (Belt et al. 2002, s. 52)

Ympäristötekijöiden vaikutukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota etenkin verrattaessa päällysteiden urautumista eri vuosina samoissa mittauskohteissa. Tässäkin työssä käsitellään useita sellaisia aiempia tutkimuksia, joissa urautumisen erot perättäisinä vuosina selittyvät suureksi osaksi eroilla ilmastollisissa muuttujissa.

Suolaus vaikuttaa päällysteiden kulumiseen siten, että se muuttaa lumisen, jäisen tai kuivan päällysteen pinnan märäksi, ja lisää siten nastarengaskaudella märän päällysteen aikaa. Vestola et al. (2006) mainitsevat, etteivät natriumkloridi ja kalsiumkloridi (CaCl) vahingoita kemiallisesti asfalttipäällysteen pintaa.

Suolaa käytetään liukkauden torjunnassa vilkasliikenteisillä teillä ja kaduilla alimmillaan noin $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Tätä kylmemmällä ilmalla Suomessa tavanomaisesti käytettävän natriumkloridin (NaCl) ja siitä tehtyjen liuosten sulatuskyky loppuu.

Hiekoitushiekka aiheuttaa katupölyn lisäksi myös välillisiä vaikutuksia päällysteiden kulumiseen. Esimerkiksi Kupiainen on esitellyt väitöskirjassaan (2007, s. 33) hiekkapaperiefektiä: hiekoitusmurske hajoaa pienemmiksi partikkeleiksi renkaan alla, ja syntyneet partikkelit kuluttavat myös päällystettä. Hiekkapaperiefektin päällysteitä kuluttava vaikutus riippuu ajonopeudesta, renkaan tyypistä, käytetyn hiekoitusmurskeen määrästä ja hiekoitusmurskeen kovuudesta suhteessa päällysteen kovuuteen. Jos hiekoitusmurske on päällysteeseen verrattuna helposti murenevaa, suuri osa hiekoituksen aiheuttamasta katupölyhiukkasten lisääntymisestä on lähtöisin pienemmiksi partikkeleiksi hajonneesta hiekoitusmurskeesta. Jos hiekoitusmurske on päällysteeseen verrattuna kovaa, suuri osa hiekoituksen aiheuttamasta katupölyhiukkasten lisääntymisestä onkin lähtöisin partikkeleiden päällystettä kuluttavasta vaikutuksesta. Kupiainen tutkimuksissa myös nastarengaiden käyttö lisäsi sekä hiekoitusmurskeesta että hiekoitetun testiradan päällysteestä lähtöisin olevaa pölyä jo alhaisissa nopeuksissa, sillä suurin osa testeistä ympyräradalla tehtiin ajonopeutta 15 km/h vastaavalla renkaan pyörimisnopeudella.

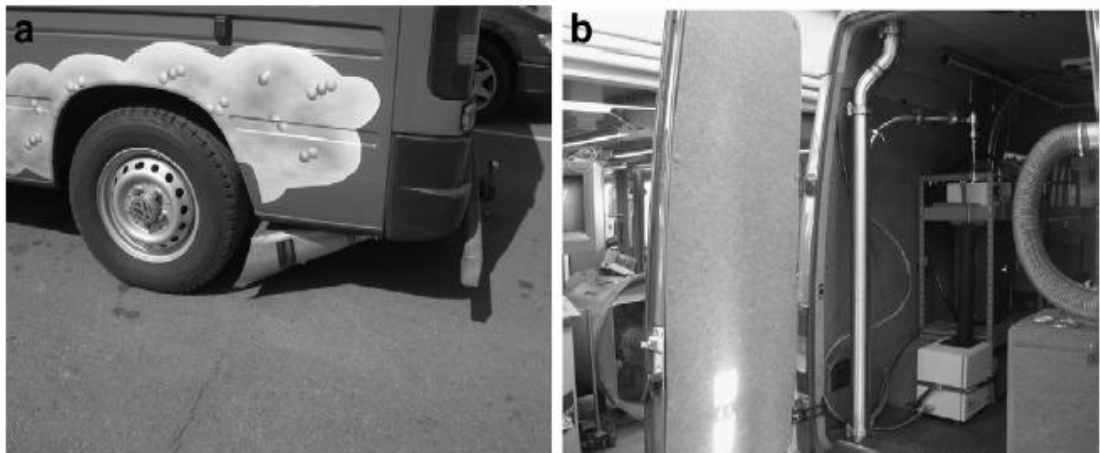
4. Nastarenkaat päällysteitä kuluttavana muuttujana

4.1. Keskeiset rengas- ja ajoneuvomuuttujat päällysteiden kulumisessa

4.1.1. Nastojen määrän ja ominaisuuksien vaikutukset kulumiseen

Nastojen lukumäärä renkaassa vaikuttaa nastaiskujen lukumäärään ja sitä kautta päällysteen kulumiseen, koska nastarengaskuluminen on teoriassa nastaiskun aiheuttama kulumisen kerrottuna nastaiskujen lukumäärällä.

Kupiainen ja Pirjola (2011) tutkivat PM_{10} -hiukkasten muodostumista testiradalla eri ajonopeuksien, rengas- ja nastavaihtoehtojen sekä hiekoitushiekan määrän funktiona (taulukko 11, liite 1). Testirataa kierrettiin VW LT -pakettiautosta rakennetulla Nuuskija-autolla (kuva 12 a ja b), joka kerää hiukkasnäytteen kartiomaiseen ilmanotto-putkeen (putken suuaukon pinta-ala 0,20 x 0,22 m) renkaan takaa, noin 5 cm:n etäisyydeltä. Mittarengas nostaa tienpinnalla olevaa pölyä renkaan taakse, josta pölynäyte imetään näytteenottolinjastoihin. Näyte johdetaan hiukkasmittalaitteisiin, jotka mittaavat hiukkasten massa- tai lukumääräpitoisuutta. Katupölynäytteen osalta tulosten tulkinnessa on käytetty PM_{10} -massapitoisuutta.

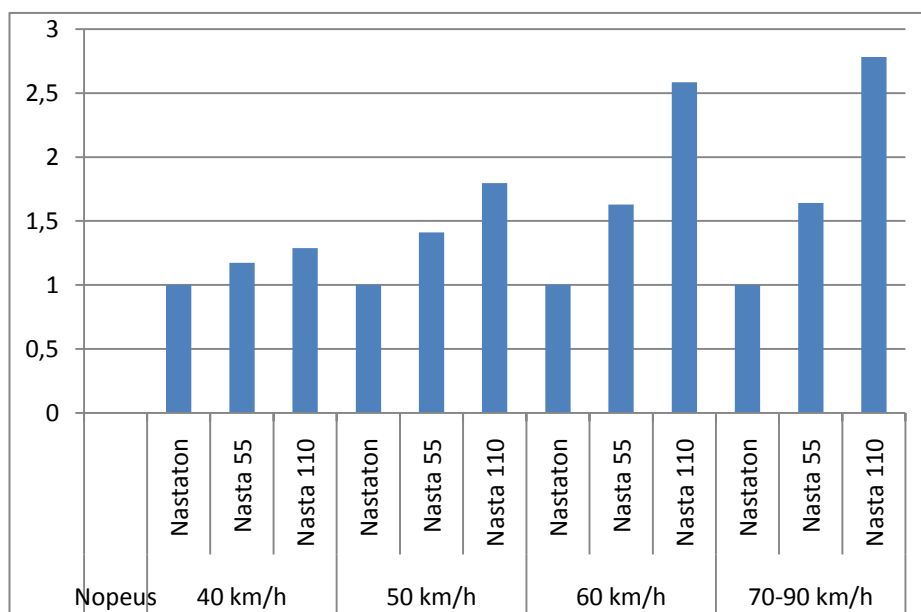


Kuva 12 a ja b. Nuuskija-auton tuloilmaputken sijainti vasemman takapyörän takana (a) ja mittalaitteistoa tavaratilassa (b). (Kupiainen & Pirjola 2011)

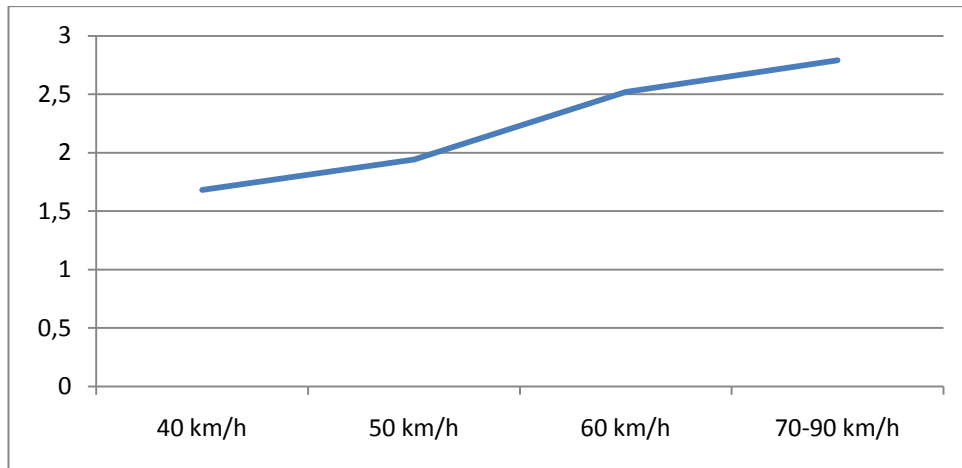
Solla et al. (2004, s. 29) mukaan yleisellä tiellä ja kadulla tehtävän pölymittauksen luotettavuutta päällysteen kulumisen arvioinnissa heikentää merkittävästi mittauksen herkkyys olosuhteille ja tuntemattomille tekijöille. Testiradalla tehtyjen hiukkasmittausten tulokset ovat kuitenkin vertailukelpoisia haettaessa hiukkasten määrän muutoksille selittäviä muuttujia saman testisarjan sisältä, kun testiradan olosuhteet hiekoitushiekan sekä muiden ajoradan kunnosta ja puhtaudesta riippuvien tekijöiden osalta ovat tiedossa.

Kuva 13 on tehty liitteenä 1 olevasta Kupiaisen ja Pirjolan (2011) testitulosten taulukosta seuraavasti: Hiukkasten massapitoisuuden keskiarvo nastattomin renkain tehdyissä mittauksissa saa kaikissa ajonopeuksissa ja kaikilla testiradan osuuksilla arvon 1. Puoliksi nastoitettulla (55 nastaa) ja täysin nastoitettulla (110 nastaa) renkaalla tehtyjen mittaustulosten keskiarvoja on verrattu nastattomilla renkailla mitattuihin arvoihin testiradan jokainen osuus kerrallaan. Testirataosuuskohtaisista suhdeluvuista on laskettu aritmeettinen keskiarvo. Eli kuvaajassa nastoitettun renkaan kohdalla oleva arvo 1,5 tarkoittaisi, että renkaalla ajettaessa on testiradan eri osuuksilla aritmeettisena keskiarvona emissoitunut 50 % enemmän PM_{10} -hiukkasia kuin vastaavalla ajonopeudella nastattomalla renkaalla.

Kuva 14 (s. 41) näyttää 110 nastan testiajoissa ja nastattomalla renkaalla ajetuissa vertailuajoissa emissoituneiden hiukkasten massan erotuksen sekä 55 nastan testiajoissa ja nastattomalla renkaalla ajetuissa vertailuajoissa emissoituneiden hiukkasten massan erotuksen osamäärän. Eli jos nastattomilla renkailla emissoitunut pöly oletettaisiin vakioksi, ja kaikki sen lisäksi syntynyt pöly nastarenkaiden lisäkulutuksen aiheuttamaksi, saataisiin kuvaajasta nastojen lukumäärän kaksinkertaistamisen vaikutus päällysteen kulumiseen eri ajonopeuksissa.



Kuva 13. PM_{10} -hiukkasten suhteellinen massa nastojen lukumäärän mukaan eri ajonopeuksissa. Nastattomien renkaiden hiukkasemissio kaikissa nopeuksissa on vertailuluku 1.



Kuva 14. Nastamäärän kaksinkertaistamisen vaikutus nastarenkaiden aiheuttaman hiukkasemission lisääntymiseen eri ajonopeuksissa.

Kuvista 13 ja 14 nähdään, että hiukkaspitoisuus ei lisäännä lineaarisesti nastojen lukumäärän ja ajonopeuden mukana: 110 nastan aiheuttama hiukkaspitoisuuden kasvu on 40 km/h ajonopeudella 1,68-kertainen, mutta 70–90 km/h ajonopeudella 2,79-kertainen verrattuna 55 nastan aiheuttamaan. Vaikka lähteenä käytettyjen hiukkasmittausten mittaustarkkuus ja toistettavuus on mittaustuloksista ilmenneen keskihajonnan perusteella vain tyydyttävä, ja mittaustuloksia on analysoitu tässä työssä varsin pelkistetysti (mm. keskiarvoa ei ole painotettu mittaussuukien pituuden eikä osuuksilla esiintyneen referenssipölyn mukaan), on tuloksista nähtävissä että nastojen lukumäärä ei ole kaikissa ajonopeuksissa suoraan verrannollinen nastojen aiheuttamaan päällysteiden kulumisen lisääntymiseen. Pienissä nopeuksissa nastojen lukumäärän kaksinkertaistaminen ei kaksinkertaista nastojen kulutusvaikutusta, suurissa nopeuksissa se lisää kulutusvaikutuksen yli kaksinkertaiseksi.

Lampisen (1993, s. 82, 89) mukaan nastan ulkonema vaikuttaa nastaискun nopeuteen ja nastan pistovoimaan. Suurempi nastaulkonema tarkoittaa, että nasta osuu dynaamisessa alkuiskussa tiehen suuremmalla pystysuuntaisella nopeuskomponentilla, koska se saavuttaa päällysteen pinnan renkaan kulutuspinnan ollessa suuremmassa kulmassa suhteessa tiehen. Ulkonevan nastan alla oleva kumi vastustaa nastan puristumista kulutuspinnan sisään suuremmalla voimalla, koska kumilla on tietty jousivakio, ja kumin jousivoima kasvaa lähes lineaarisesti nastan alla tapahtuvan kumin kokoonpuristumisen mukana. Lisäksi runsaasti ulkoneva nasta on koko tiekosketuksen ajan vinommassa asennossa kuin normaalisti ulkoneva nasta. Tämä kaikki lisää myös dynaamisen pistovoiman ja hierron kuluttavaa vaikutusta.

Nastan dynaaminen iskuenergia on periaatteessa suoraan verrannollinen nastan massa. VTT:n tutkimuslaskelmissa 624 (1987) todetaankin yliajokokeiden tuloksia arvioitaessa ytimekkäästi, että nastan painon pienentäminen kahden gramman tasolta yhdellä grammalla vähentää päällysteen kulumista 50 %.

Verrattaessa Kupiaisen ja Pirjolan tutkimustuloksia (liite 1), joissa on ajettu testirataa samanlaisissa oloissa renkailla, joissa on 110 kpl 1,1 g painavia nastoja sekä renkailla, joissa on 55 tai 110 kpl 2,2 g painavia nastoja huomataan, ettei nastan painon kaksinkertaistuminen tarkoita kaikissa ajonopeuksissa automaattisesti hiukkaspitoisuuden kaksinkertaistumista. Ajonopeudella 40 km/h rengas, jossa on 110 kpl 1,1 g painavia nastoja, emisoi hiukkasia testiradasta jopa 7 % vähemmän kuin nastoitamaton rengas. Nopeudella 50 km/h 1,1 g nastoilla nastoitettu rengas lisää hiukkasten emissiota nastoitamattomaan renkaaseen verrattuna vain 36 % siitä lisäyksestä, jonka 55 kpl 2,2 g painavia nastoja aiheuttaa ja 18 % lisäyksestä, jonka 110 kpl 2,2 g painavia nastoja aiheuttaa. (Taulukko 4)

Nopeuksilla 60–90 km/h 1,1 g painavien nastojen hiukkasemissiota lisäävä vaikutus on noin 78 % lukumäärältään puolitettujen ja massaltaan kaksinkertaisten nastojen vaikutuksesta. Verrattuna täyteen lukumäärään 2,2 g painavia nastoja on 1,1 g nastojen aiheuttama hiukkaspitoisuuden kasvu näissä nopeuksissa 27–31 %.

Taulukko 4. Suhteellinen hiukkasemission lisääntyminen nastattomaan renkaaseen verrattuna eri nastoituksilla, kun 55 kpl 2,2 g painavia nastoja indeksi = 100.

Ajonopeus	Suhteellinen hiukkasemissio (55 kpl 2,2 g painavia nastoja – nastaton = 100)		
	110 kpl 1,1 g nastoja	55 kpl 2,2 g nastoja	110 kpl 2,2 g nastoja
40 km/h	*	100	168
50 km/h	36	100	194
60 km/h	78	100	252
70-90 km/h	77	100	279

* emissio pienempi kuin nastattomalla renkaalla

Kupiaisen hiukkaskokeista voidaan tehdä seuraavat päätelmät nastojen painon ja lukumäärän yhteydestä päällysteiden kulumiseen taajamanopeuksissa:

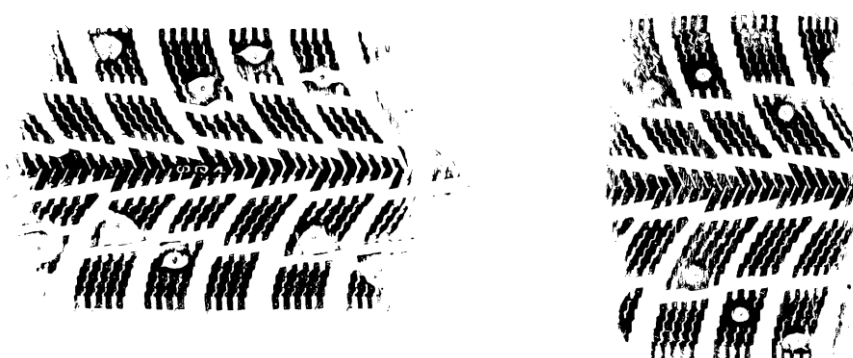
- Päällysteiden kuluminen on verrannollinen nastojen massa- ja lukumäärään.
- Kaksi kevyttä nastaa kuluttaa päällystettä vähemmän kuin yksi painava nasta, joka painaa yhtä paljon kuin kaksi kevyttä. Erityisen suuri tämä ero on mahdollisesti alhaisissa nopeuksissa.
- Alhaisissa ajonopeuksissa nastan massa voi vaikuttaa kulumiseen voimakkaammin kuin nastojen lukumäärä. Nopeuden kasvaessa nastojen lukumäärän vaikutus päällysteiden kulumiseen kasvaa.

Lisäksi Lampinen (1993) ja Unhola (2004, 2008) ovat todenneet, että mm. nastan kärjen halkaisija ja muoto, nastan runkorakenne sekä nastan kumikiinnityksen väljyys ja joustavuus vaikuttavat nastarenkaiden aiheuttamaan päällysteiden kulumiseen. Näitä muuttujia on kuitenkin huomattavan vaikea mitata ja dokumentoida sellaisilla välineillä ja suureilla, että toinen mittaaja voisi saavuttaa toisella mittavälineellä saman tuloksen ja todistaa muuttujien selittävyyden luotettavuuden.

4.1.2. Renkaan profiilisuhteen ja ilmanpaineen vaikutukset

Renkaan profiilisuhde vaikuttaa renkaan kylkien jäykkyyden kautta renkaan jousivakioon, painumaan ja kosketusalan mittasuhteisiin. Mitä matalampi profiili renkaassa on, sitä jäykempi on sen kylki ja sitä pienemmät ovat painuma ja muodonmuutokset renkaan ja tien kosketuskohdassa. (Unhola 2004, s. 17)

Koska matalaprofiilisen renkaan kosketuspinta tiehen renkaan pyörimissuunnassa on tuntuvasti lyhyempi kuin korkeaprofiilisella renkaalla (kuva 15), kestää matalaprofiilisen renkaan dynaaminen nastaisku ja nastan hierto vähemmän aikaa kuin korkeaprofiilisella renkaalla. Lisäksi nasta liikkuu matalaprofiilisessa renkaassa suhteessa asfalttiin vähemmän renkaan tiekosketuksen aikana.



Kuva 15. Rengaskoon vaikutus renkaan ja tien väliseen kosketusalaan. Vasemmalla talvirengaskoon 175/80 R 14 kosketusala tiehen, "footprint". Oikealla samassa mittakaavassa 225/45 R 17 talvirengaskoko. Renkaat Nokian Hakkapeliitta 2. (Unhola 2004, s. 11–12)

Jäykemmässä renkaassa nastan tulisi yleisesti liikkua suhteessa tiehen enemmän tiekosketuksen aikana, koska jos nasta ei liiku suhteessa kumiin, se liikkuu suhteessa tiehen. Ilmeisesti tämän teorian ero tämän työn kappaleessa 5.3. tarkemmin tutkittaviin nastajälkitutkimuksiin (Unhola 2004, s. 22) verrattuna liittyy siihen, ettei renkaan jäykkyys ole yksiselitteinen muuttuja. Matalaprofiilisen renkaan tunnettu jäykkyys on renkaan kylkien jäykkyyttä: matala kylki leveän ja matalan ilmatilan laidalla tulee jo renkaan mittasuhteidenkin takia jäykäksi. Nastan liikkuminen suhteessa kumiin liittyykin renkaan kosketuspinnan leikkausjännityksiin ja pintapaineeseen, jolla ei ole suoraan verrannollista yhteyttä renkaan kylkien jäykkyyteen. Koska renkaan

kosketuspinnan pinta-ala eri profiilisuhteilla on lähes vakio (vaikka mittasuhteet poikkeavat toisistaan huomattavasti), ei kosketusalalle kohdistuva pintapaine riipu renkaan profiilisuhteesta, jos rengaspaine ja renkaan kuormitus ovat vakioita. Unholan (2004, s. 23) yhteenvedossa todetaan, että renkaan profiilisuhteen laskeminen 0.10 yksiköllä vähentää päällysteen kulumista noin 10 %, jos muut muuttujat säilyvät vakiona.

Jos renkaan profiilisuhteen madaltamiseen perustuva jäykkyys vähentää päällysteiden kulumista, renkaan ilmanpaineen nostoon perustuva jäykkyys lisää kulumista. Milliken & Milliken (1995, s. 55) toteaa renkaan ilmanpaineen laskemisen lisäävän kosketusalan kokoa ja vähentävän siten sen alalla olevaa pintapainetta. Toisaalta liian alhainen ilmanpaine aiheuttaa paikallista korkeaa pintapainetta kulutuspinnan reunaosiin, koska tällöin renkaan kylkien jäykkyys kannattelee liian suurta osaa renkaan pystysuuntaisesta kuormituksesta. Ilmanpaine tulisi asettaa siten, että kulutuspinnan keskiosa (jota pääosin ilmanpaine tukee) ja kulutuspinnan reunaosat (joita sekä ilmanpaine että renkaan kyljet tukevat) jakavat renkaaseen kohdistuvan kuormituksen tasan.

Unholan (2004, s. 18) mukaan rengaspaineen vaikutus yliajokulumaan on erittäin selkeä ja suoraviivainen, ja esimerkiksi rengaspaineen nosto 220 kPa -> 230 kPa lisää kulumista 3,6 %. Millikenin ja Unholan teorioita yhdistelemällä voi päätellä, että renkaan liian korkea ilmanpaine lisää nastarenkaiden päällysteitä kuluttavaa vaikutusta, koska renkaan kosketusala pienenee, sen pintapaine kasvaa, nastan tienpintaan kohdistamat pystyvoimat ovat suurempia ja nasta mahdollisesti liikkuu kumin lisääntyneen pintapaineen takia enemmän suhteessa asfalttiin. Liian alhainen ilmanpaine lisää päällysteiden kulumista mahdollisesti siitä syystä, että kosketusalan laidoilla on paikallinen korkea pintapaine. Lisäksi renkaan kokoonpuristuminen on liian alhaisella rengaspaineella suurta, mikä lisää nastan iskunopeutta, nastan asennon vinoutta sen osuessa tiehen sekä dynaamisen nastaiskun ja hierron kestoaikaa.

4.1.3. Nastarenkaita käyttävän ajoneuvon massa

Unholan julkaisussa (2004, s. 19) tutkittiin henkilöauton massan vaikutusta päällysteen kulumiseen kahdella painolla, auton omamassalla (omamassa+kuljettaja+polttoaine) 1230 kg ja samalla autolla lastattuna 414 kg:n henkilö- ja hiekkasäkkikuormalla, jolloin kokonaismassaksi tuli 1644 kg. Rengaskoko oli 195/65R15, rengaspaine pidettiin lastin lisäyksestä huolimatta samana (230 kPa). Ajonopeus tässä kokeessa oli 80 km/h. Henkilöauton massan lisäys lisäsi tien kulutusta hyvin samassa suhteessa massan lisäykseen verrattuna. Esimerkiksi massan nosto 1200 -> 1300 kg lisää kulutusta 11 %.

Kun ajoneuvon massa kasvaa niin paljon, että renkaiden vierintäkehä, footprintin pinta-ala, ohjeistettu ilmanpaine ja jopa lukumäärä kasvavat, ei päällysteiden kulumisen välttämättä riipu enää lineaarisesti ajoneuvon massasta, vaan kulumisen kasvu voi olla suhteessa vähäisempää kuin ajoneuvon massan muutos. Lampinen (1993, s. 148–150) arvioi uramuutosmalliensa perusteella, että nastarenkaita käyttävän kuorma-auton

vaikutus uran syvyyteen ja poikkipinta-alamuutokseen oli 1980-luvulla n. 3–5 -kertainen yhteen henkilöautoon verrattuna. Vaikka nastarenkaita käyttävä kuorma-auto olisi tilastollisesti keskimäärin pieni kaksiakselinen jakelukuorma-auto, painaa se enemmän kuin 3–5 kappaletta 1980-luvun henkilöautoja yhteensä.

Liikenteessä olevat henkilöautot ovat muuttuneet suuremmiksi ja painavammiksi 1980-luvulta lähtien. Unholan (2004, s. 24) mukaan Suomen 30 myydyimmän henkilöautomallin omamassan keskiarvo kasvoi vuosina 1990–2003 peräti 18 % (v. 1990 ka. 1078 kg, v. 2003 ka. 1276 kg).

4.2. Nastarenkaita koskevat määräykset

Nastarenkaiden **käyttöaika** rajoitetaan lakisääteisesti, jottei nastarenkaiden tarpeettomasta käytöstä tulisi haittoja sellaisina vuodenaikoina, jolloin talvioloja ei normaalisti esiinny. Toisaalta kesärenkain ajaminen talvikuukausina on kiellettyä useissa maissa, joissa talviolot ovat todennäköisiä. Kalenterin tai kelin mukaan määräytyvien talvirengaspakkojen yleisimpiä perusteita ovat liikenneturvallisuus ja liikenteen palvelutaso, ja talvirengaspakon aikana liikenteessä olevan auton tulee olla varustettuna pintakuvioltaan talvikäyttöön soveltuvilla renkailla. Zubeck et al. (2004, s. 23) mukaan myös talvikunnossapitoon kohdistuvat vaatimukset vaikuttavat talvirengasmääräyksiin – jos nastarenkaiden käyttö on kielletty, täytyy talvikunnossapidon olla tehokkaampaa.

Nastarenkaita sallittu käyttöaika Suomessa alkaa 1.11. ja päättyy 31.3. tai toisen pääsiäispäivän jälkeisenä maanantaina, myöhemmän ajankohdan määrätessä päättymisajan. Nastarenkaita saa käyttää Suomessa myös muuna ajankohtana, jos sää- ja keliolot sitä edellyttävät. Suomessa on talvirengaspakko 1.12.-28.2., jolloin henkilö- ja pakettiautoissa on käytettävä nastoitettuja tai nastattomia talvirenkaita.

Myös muissa autoistuneissa maissa, joissa talvioloja esiintyy säännöllisesti, on yleistä asettaa nasta- ja talvirenkaiden käyttöä koskevia määräyksiä ja rajoituksia. Euroopan maakohtaiset talvirengasmääräykset ovat nähtävissä Autoliiton kokoamassa taulukossa (liite 2).

Renkaassa olevien **nastojen määrää ja ominaisuuksia** koskevien määräysten taustalla on liikenteessä olevien nastarenkaiden käytöstä aiheutuvien haittojen vähentäminen. Nastojen lukumäärä, massa ja ulkonema vaikuttavat huomattavasti nastarenkaiden aiheuttamaan teiden kulumiseen.

Nastarenkaiden aiheuttama päällysteiden kulumisen väheni 1990-luvulla voimakkaasti, koska nastarenkaisiin kohdistuvat määräykset tiukentuivat ja nastarengaskulutusta kestävät päällysteet yleistyivät vilkasliikenteisillä teillä. Päällysteiden kulumiseen vaikuttavat ajoneuvotekijät söivät tämän hyödyn 2000-luvun puolella, ja kulumisen

vähentäminen pysähtyi. Unhola (2004, s. 25) totesi nastarengaskulutukseen vaikuttavien ajoneuvotekijöiden kehityksestä vuosina 1990–2003 suhteessa nastarengasmääräyksiin seuraavaa: ”Ominaiskuluttavuuden (grammaa / ajoneuvokilometri) kasvu tarkastelun aikavälillä oli nyt tutkittujen ominaisuuksien ja nastamäärän muutosten vaikutuksesta yhteensä 38 prosenttia. Jos tähän lisätään liikenteen (nastallisen suoritteen) kasvu, on tien kulutus kasvanut ajoneuvoihin liittyvistä syistä valta- ja kantatiestöllä 13 vuodessa 44 prosenttia. Kun samana aikana nastan massa on pudonnut kahdesta grammasta 1,1 grammaan, tarkoittaa se aiempien tutkimusten perusteella arvioituna kulumisen alentumista lähes samalla määrällä, 45 prosentilla. Nastojen keventyminen 90-luvun alun nastamääräysten johdosta on nyt päättynyt.”

Suomessa oli vuosina 1978–2009 voimassa kansallinen pykälä, joka kielsi renkaan kulutuspinnan keskimmäisen kolmanneksen nastoitamisen. Unhola (2008, s. 11) kertoo, että renkaan kulutuspinnan keskimmäisen kolmanneksen nastoituksen kieltävä pykälä sai alkunsa Aarre Niemen vuonna 1974 tekemistä koeratakokeista, joissa kulutuspinnan keskiosalla sijainneiden nastojen pistovoima todettiin suuremmaksi kuin kulutuspinnan reunaosilla sijainneiden. Unholan samassa julkaisussa esitettiin tutkimustulokset, joissa kulutuspinnan keskiosan nastoituksen vaikutusta oli testattu yliajokokeella. Tuloksista ei löytynyt minkäänlaista tilastollista yhteyttä sille, että keskiosan nastoitus lisäisi päällysteen kulumista tai nastojen pistovoima kulutuspinnan keskiosassa olisi reunaosia suurempi, mikä johti kulutuspinnan keskiosan nastoitustiellon kumoamiseen Liikenne- ja viestintäministeriön asetuksessa 466/2009.

Suomessa tulivat voimaan 1.7.2009 nastamääräykset, joissa muutokset vuonna 1992 voimaan tulleisiin ja 1996 päivitettyihin vanhoihin määräyksiin verrattuna koskivat nastojen lukumäärää ja sijoittelua renkaan kulutuspinalla. 1.7.2009 voimaan tulleet määräykset ovat täysin samanlaiset myös Ruotsissa ja Norjassa. Taulukossa 5 (s. 47) ovat nähtävissä 1.7.2009 voimaan tulleiden määräysten aiheuttamat muutokset, määräykset jotka uudet määräykset ovat kumonneet sekä aikaisemmat määräykset, jotka ovat yhä voimassa. **1.7.2009 voimaan tulleiden nastarengasmääräysten siirtymäaika nastojen lukumäärää koskien päättyy 1.1.2013.** Vuoden 2013 alusta lähtien valmistettujen nastarengaiden tulee täyttää 1.7.2009 voimaan tullut määräys nastojen lukumäärästä.

Nastan pistovoiman mittausta koskeva määräys tuli voimaan vuonna 2003 (LVM:n asetus 408/2003) ja on nähtävänä liitteessä 4.

Henkilöautojen renkaissa sallitun nastamäärän laskentaperusteita päädyttiin muuttamaan, koska liikenteessä olevien nastarengaiden keskimääräinen nastojen lukumäärä oli kasvanut. Unholan (2008, s. 18) raportissa käy ilmi, että nastarengaskokojen määrän lisääntyttä ja laajennuttua myös kaikkein matala-profiilisimpiin kokoihin syntyi vannekokoon sidotusta nastamäärästä vääristymiä.

Taulukko 5. Nastamääräykset Suomessa. Kursivoidut määräykset on kumottu 1.7.2009 voimaan tulleilla määräyksillä.

	Määräys	Henkilöauton rengas (+perävaunut)	Kevyen kuorma-auton rengas	Kuorma-auton rengas
nastojen määrä (kpl)	<i>LMA 1256/1992</i>	<i>90 kpl ($\leq 13''$) 110 kpl (14– 15'') 130 kpl ($\geq 16''$, LMA 304/1996)</i>	150	150
	LVMA 466/2009	50 kpl yhtä vierintäkehän metriä kohti	150	150
nastan massa (g)	LMA 304/1996	1,1	2,3	3,0
staattinen pistovoima (N)	LMA 304/1996	120	180	340
nastaulkonema (mm)	LMA 304/1996	1,2	1,2	1,5
sijoittelu kulutuspinnan keskimmaiselle kolmannekselle	<i>LMA 1256/1992</i>	<i>kielletty</i>	<i>kielletty</i>	<i>kielletty</i>
	LVMA 466/2009	sallittu	sallittu	sallittu

Renkaiden muuttuminen matalaprofiilisemmiksi johti siihen, että vierintäkehän pysyessä ennallaan vanteen tuumakoko ja renkaan sallittu nastamäärä kasvoivat. Tutkituissa renkaissa nastojen lukumäärä vierintäkehän metriä kohti vaihteli välillä 48–71, keskiarvon ollessa 58,8. Tutkimustulosten ja neuvottelujen perusteella päädyttiin siihen, että sallittu nastamäärä sidotaan renkaan vierintäkehän pituuteen ja on 50 nastaa vierintäkehän metriä kohti. Tämän arvioitiin johtavan siihen, että korkeaprofiilisilla renkailla sallittu nastamäärä pysyy ennallaan tai nousee enintään muutaman nastan, matalaprofiilisilla puolestaan laskee enintään 35 nastalla. Vuonna 2005 Suomessa myytyihin 30 yleisimpään nastarengaskokoon mainittu muutos vaikuttaa siten, että nastojen lukumäärä vähenee keskimäärin 17 kappaletta eli 15 %. Tämän muutoksen arvioitiin vaikuttavan lähes suoraan päällysteiden kulumiseen.

Vaikuttavatko uudistuneet nastamääräykset päällysteiden kulumiseen taajama-nopeuksissa? Onko nastojen lukumäärän vähentäminen oikein kohdennettu toimenpide myös alhaisten nopeuksien kulumiseen? Poikkeako kulutuspinnan keskiosassa olevien nastojen käyttäytyminen eri ajonopeuksissa merkittävästi reunaosien nastoista?

Kappaleessa 4.1.1 tehtyjen päätelmien mukaan voidaan arvioda, että nastojen lukumäärän rajoittaminen vähentää päällysteiden kulumista taajamanopeuksissa vähemmän kuin maantienopeuksissa, koska nastojen paino vaikuttaa kulumiseen alhaisissa nopeuksissa enemmän kuin lukumäärä. Tutkituilla nopeusalueilla nastojen lukumäärän vähentäminen vaikuttaisi lähes sellaisenaan kaupunkiseutujen kehäteiden, sisääntuloväylien ja nopeiden pääkatujen nastarengaskulumiseen, mutta kaupunkien keskustoissa ja kokoojakaduilla ajonopeuksien ollessa alle 50 km/h ei vastaavaa hyötyä synny.

Kulutuspinnan keskiosassa olevien nastojen kulutusvaikutuksesta on julkaistu aiempia tuoreita tutkimustuloksia (Unhola 2008, s. 14, 27) vain yliajokokeesta 100 km/h ajonopeudella ja pistovoimamittauksista. Tässä tutkimuksessa ei ole syytä olettaa, että mikään renkaan ajodynamiikassa muuttaisi kulutuspinnan keskiosan nastojen käyttäytymistä verrattuna reunaosien nastoihin radikaalisti alhaisemmissa nopeuksissa. Kulutuspinnan keskiosan nastoituksen kieltävä määräys on ensisijaisesti kumottu tarpeettomana, eikä sen muutoksen vaikutuksia kulumiseen ole pidetty relevantteina myöskään alhaisissa nopeuksissa.

5. Päälysteiden urautumisen erityispiirteet taajamissa

5.1. Ajonopeudet, liikennemäärät ja ajoneuvotyypit taajamissa

5.1.1. Ajonopeudet

Taajamat ovat taajama-liikennemerkeillä (571) rajattuja alueita, joilla ovat voimassa taajamia koskevat liikennesäännöt. Nopeusrajoitusjärjestelmä koostuu yleisestä 50 km/h -rajoituksesta, rajoitusarvoltaan yleisrajoitusta alemmista nopeusrajoitusalueista sekä yksittäisistä muista nopeusrajoituksista. Korkein taajamassa käytettävä rajoitus on 60 km/h (Tiehallinto 2009, s. 34). Taulukossa 6 (s. 50) kuvataan nopeusrajoituksen määrittämistä taajamissa.

Hellmanin (2009) julkaisussa on esitetty liikenteen sujuvuusmittausten tuloksena saatuja toteutuneita matkanopeuksia Helsingissä. Sujuvuusmittaukset on tehty ns. kelluvan auton menetelmällä, jossa kolme mittalaittein varustettua autoa ajaa vapaasti muun liikenteen mukana. Mittausohjelma tallentaa nopeus- ja viitetietoja.

Todelliset ajonopeudet taajamien katuverkoilla eivät luonnollisesti ole yhtä kuin nopeusrajoitus. Yksittäiset ajoneuvot ja kokonaiset liikennevirrat ovat usein estyneitä ajamaan nopeusrajoituksen mukaisella nopeudella, koska myös vähintään seuraavat tekijät vaikuttavat todelliseen ajonopeuteen:

- Sää- ja keliolot (kitka, näkyvyys)
- Väylän geometria (näkyvyys, pituus- ja poikittaiskallistus, kaarteiden säde, hidasteet)
- Muut liikennesäännöt (väistämisvelvollisuus, tilannenopeus)
- Liikennevalot (hidastaminen ja pysähtyminen)
- Liittymät (väistämis- ja pysähtymisvelvollisuus, havainnointi, geometria)
- Muu liikenne (jonon ja edellä ajavan ajoneuvon nopeus)

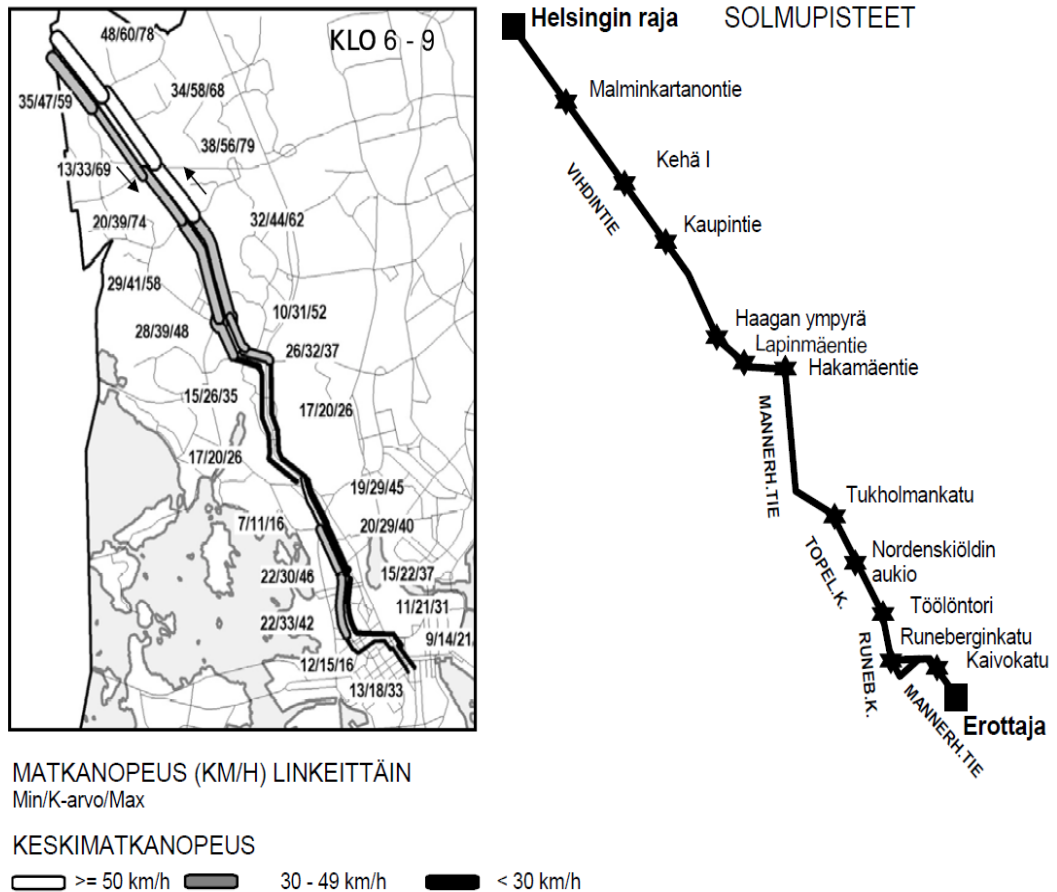
Kuvassa 16 (s. 51) on esitetty sujuvuusmittausten tuloksena saatuja matkanopeuksia. Tulokset eivät ole kadun tietyllä poikkileikkausviivalla esitettyjä mittauspistekohtaisia keskinopeuksia. Usean mittauksen keskiarvona saadut keskinopeudet eri nopeusrajoituksilla ovat taulukossa 7 sivulla 51. (nopeusrajoitus 60 km/h tiedot otettu kuvan ulkopuolelta Veturitien ja Sörnäisten Rantatien 60 km/h osuuksilta, koska kuvassa ei ollut yhtään koko solmuväliä nopeusrajoituksella 60 km/h)

Taulukko 6. Nopeusrajoituksen määrittäminen taajamassa väylän liikenteellisen tehtävän, väylän ja sitä ympäröivän maankäytön suhteen, liikennejärjestelyjen ja turvallisuustilanteen perusteella. Lihavoinnilla on esitetty yleisin kysymykseen tuleva rajoitusarvo. (Tiehallinto 2009, s. 36)

Nopeusrajoitus	Maankäyttöä palveleva paikallinen väylä
20 km/h	Asuntoalueen pihakatu, keskustan kävelypainotteinen katu
30 km/h	Asuntoalueen tonttikatu, keskustan asuntokatu
40 km/h	Työpaikka-alueen tonttikatu
	Maankäyttöä palveleva kokoava väylä tai pääväylä
30 km/h	Asuntoalueella, keskustan kauppakatu, taajaman keskustatie
40 km/h	Asuntoalueella, jos suojatiellä on saarekkeet ja korotukset Muu kuin keskustan kauppakatu tai asuntokatu Keskustan kauppakatu, jos suojatiellä on saarekkeet ja korotukset Työpaikka-alueella oleva katu
	Läpikulkua palveleva kokoava väylä
30 km/h	Vaaralliseksi koetun tai todetun kohteen kohdalla Koulun tai muun erityishuomiota edellyttävän kohteen läheisyydessä
40 km/h	Asuntoalueella Keskusta-alueella ja työpaikka-alueella
50 km/h	Työpaikka-alueella, jos suojatiellä on saarekkeet
	Läpikulkua palveleva pääväylä
30 km/h	Vaaralliseksi koetun tai todetun kohteen kohdalla Koulun tai muun erityishuomiota edellyttävän kohteen läheisyydessä
40 km/h	Asuntoalueella Keskusta-alueella ja työpaikka-alueella
50 km/h	Asuntoalueella, jos kevyt liikenne risteää eri tasossa tai valo-ohjattuna Työpaikka-alueella, jos suojatiellä on saarekkeet
	Ohikulkua palveleva kokoava väylä
30 km/h	Vaaralliseksi koetun tai todetun kohteen kohdalla Koulun tai muun erityishuomiota edellyttävän kohteen läheisyydessä
40 km/h	Asuntoaluetta sivuttaessa Keskustaa ja työpaikka-aluetta sivuttaessa
50 km/h	Asuntoaluetta ja keskustaa sivuttaessa, jos suojateillä on saarekkeet Työpaikka-aluetta sivuttaessa
	Ohikulkua palveleva pääväylä
40 km/h	Vaaralliseksi koetun tai todetun kohteen kohdalla Koulun tai muun erityishuomiota edellyttävän kohteen läheisyydessä
50 km/h	Edellyttäen, että suojatiellä on vähintään saarekkeet
60 km/h	Kevyen liikenteen eritasojärjestely tai valo-ohjaus Liittymät kanavoituja 3-haaraliittymiä tai kiertoliittymiä Ei soveltu valo-ohjaamattomiin 4-haaraliittymiin

Taulukko 7. Todellinen keskinopeus kuvan 16 mittausväleillä eri nopeusrajoitusalueilla

Nopeusrajoitus (km/h)	Keskinopeus klo 06–09 (km/h)
30	14–21
40	11–33
50	20–39
60	24–48
70	33–60



Kuva 16. Toteutuneet matkanopeudet aamuruuhkassa klo 6–9 liikenteen sujuvuusmittauksissa 2009 Erottajan ja Vihdintiellä olevan Helsingin rajan välillä. Oikealla reitin katujen nimet. Vasemmalla vastaavilla solmuväleillä mitatut keskinopeudet. Nopeudet merkitty: min / ka. / max. (Hellman 2009, s. 21)

Ruuhka-aikojen ulkopuolella mitatut keskinopeudet olivat Hellmanin tutkimuksessa pääosin hieman korkeampia kuin ruuhka-aikoina, mutta vain hyvin harvoilla solmuväleillä ne olivat yhtä korkeita kuin nopeusrajoitukset tai jopa hieman korkeampia.

Tutkimusaihetta käsiteltäessä on siis relevanttia arvioida päällysteiden kulumista 0–60 km/h ajonopeuksilla. Nopeusrajoituksen määrittämisperusteet ja liikennevirran todellinen keskinopeus tulevat esille, kun arvioidaan kulumisen ominaisuuksia kapeammalla nopeusvälillä ja pohditaan, tulisiko kulumista rajoittavia toimenpiteitä määrätä katuverkon tietyille osalle.

5.1.2. Liikennemäärät

Taajamien ja kaupunkiseutujen pääkaduilla sekä sisääntulo- ja ohikulkuteillä kulkee yleisesti selvästi enemmän liikennettä kuin kaupunkiseutujen ulkopuolella. Suurimmat liikennemäärät ovat yleensä katuverkon ulkopuolisilla monikaistaisilla sisääntulo- ja ohikulkuteillä, joiden liittymä- kaista- ja nopeusrajoitusjärjestelyt mahdollistavat suuremman välityskyvyn ja korkeamman keskinopeuden kuin katuverkossa.

Esimerkiksi Helsingin ja koko Suomen suurin liikennemäärä 107810 ajoneuvoa syksyn arkivuorokaudessa (Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirasto, 2010) on Kehä I:llä Pirkkolassa Hämeenlinnanväylän ja Tuusulanväylän välillä. Saman liikennemääräkartan mukaan katuverkon ja enintään 50 km/h nopeusrajoitusalueiden suurin liikennemäärä on Porkkalankadulla 68500 ajon/vrk. Pääkaupunkiseudun ulkopuolella suurimmat liikennemäärät löytyvät Tampereen Teiskontieltä (Vt 12) 46300 ajon/vrk ja Oulun Pohjantieltä (Vt 4) 45500 ajon/vrk (Liikennevirasto liikennemäärät 2009, 2010).

Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluviraston (2011) ja Liikenneviraston (2010) liikennemääräkarttojen mukaan suurimmalla osalla Helsingin kantakaupungin pääkaduista liikennemäärät ovat 3000–40000 ajon/vrk. Pääkaupunkiseudun suurten osakeskusten kokoojakadut sekä pienten kaupunkien ja taajamien pääkadut ovat liikennemääriltään tyypillisesti 2000–20000 ajon/vrk, ja pääkaupunkiseudun suurten osakeskusten läpiajoonkin käytettävät pääkadut sekä suurten muiden kaupunkiseutujen pääkadut 10000–35000 ajon/vrk. Varsinkin vilkkaimmilla pääkaduilla liikenteen aiheuttama urautuminen vaikuttaa huomattavasti myös hyvin kulutusta ja deformaatiota kestävien päällysteiden ylläpitotarpeeseen.

Yksinkertaistetusti pääkaupunkiseudun vilkkaimmin liikennöidyt tiet ja kadut päällystetään 15 vuoden suunnittelujakson aikana liikenteen aiheuttaman urautumisen takia uudelleen 4–5 kertaa, mutta hiljaisilla teillä ja kaduilla riittää vastaavana aikana yksi päällystyskerta, jonka tarpeen määrittää useimmiten ympäristötekijöiden aiheuttama päällysteen ikääntyminen ja halkeileminen.

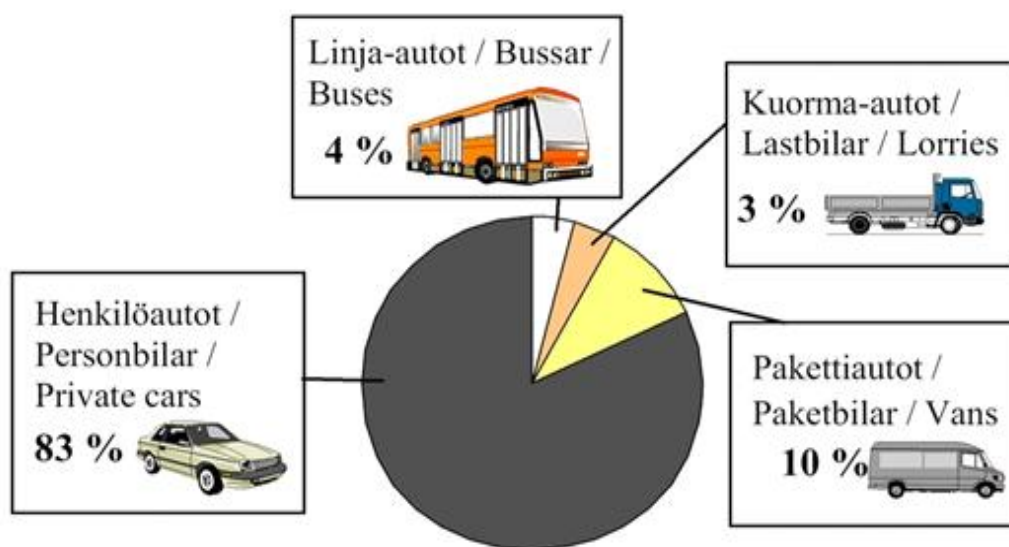
5.1.3. Raskaan liikenteen osuus ja joukkoliikenne

Helsingin kantakaupungin rajalla henkilöautojen osuus on 83 % ja raskaan liikenteen yhteensä 7 % liikennemääristä (kuva 17).

Hellmanin ja Lillebergin (2011, s. 27) julkaisussa käsiteltiin Helsingin liikenteen koostumusta ajoneuvolajijakaumana laskentalinjoittain. Laskentapisteistä korkein raskaan liikenteen (kuorma-autot, rekat, linja-autot) osuus kaikista autoista oli 35,9 %, ja se mitattiin Kehä III:n jatkeena olevassa Vuosaaren tunnelissa.

Helsingin kantakaupungin liikennemäärien koostumuksen erot verrattuina valtakunnallisiin keskiarvoihin ovat tyypillisiä taajamille ja suurten kaupunkiseutujen keskuksille. Tavarankuljetusten painopiste taajamissa siirtyy sitä enemmän kuorma-autokuljetuksista pakettiautokuljetuksiin, mitä lähempänä taajaman keskustaa ja sen ahtaita katuja liikutaan. Suurten kaupunkien keskustoissa vallitseva joukkoliikenteen korkea tarjonta ja kysyntä vaikuttavat luonnollisesti bussiliikenteen määrään.

Liikennemäärien koostumus kantakaupungin rajalla vuonna 2010
Sammansättning av trafikmängderna på innerstadens gräns år 2010
Composition of the traffic volumes at the boundary of the inner city in 2010



Kuva 17. Liikennemäärien koostumus Helsingin kantakaupungin rajalla vuonna 2010 (Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirasto 2010)

Taajamissa on olemassa katuja ja alueita, joissa raskaan liikenteen aiheuttama deformaatio ei selitä juuri lainkaan päällysteen urautumista. Tällaisia ovat esimerkiksi tiet ja kadut, joilla ei ole joukkoliikennettä, ja jotka ovat geometriansa tai matalien alikulkujen takia vaikeita tai mahdottomia ajaa raskaalla ajoneuvolla. Tällaisilla kaduilla voi silti olla runsasta henkilöautoliikennettä, joka aiheuttaa päällysteiden kulumista nastarenkaiden tiekosketuksen välityksellä.

Toisaalta taajamissa on katuja, kaistoja ja alueita, joissa raskaan liikenteen aiheuttama deformaatio selittää täysin päällysteen urautumisen. Bussiliikenne tiivistää ja muovaa kadun eri rakennekerroksia joukkoliikennekaistoilla, -kaduilla ja -terminaaleissa. Suuria tavaramääriä lähettävien ja vastaanottavien yritysten ja terminaalien lastausovien edustalla ja sinne johtavilla ajoväylillä on havaittavissa voimakasta deformaatiourautumista.

Koska raskaan liikenteen ja joukkoliikenteen osuus liikennemääristä sekä teiden urautumisesta vaihtelee taajamissa erittäin voimakkaasti eri ajoneuvotyyppien liikenteen kysynnän ja niiden ajoreittien mukaan, on päällysteiden urautumista taajamanopeuksissa arvioitaessa erittäin tärkeää analysoida raskaan liikenteen aiheuttaman deformaation taustat ja erottaa deformaatio nastarengaskulumisesta.

5.2. Ajoneuvon liiketilan muutokset taajamaliikenteessä

Ajoneuvon liiketilan muutokset vaikuttavat päällysteiden kulumiseen. Kun ajoneuvon liiketila muuttuu, renkaan kulutuspinnasta välittyy tienpintaan useampia ja suurempia voimia kuin tasaisessa liikkeessä. Lampinen (1993, s. 91) on esittänyt 1970-luvun saksalaisten koeratutkimusten tuloksia, joissa suhteellinen kuluma kaarreaajossa on 1,1-kertainen, kiihdytyksessä 1,4-kertainen ja jarrutuksessa 2,8-kertainen tasaisella nopeudella ajoon verrattuna. Koska alkuperäisistä tutkimuksista on valtavasti aikaa eikä käytetyistä tutkimusmenetelmistä ole tarkempaa tietoa, ei tuloksia voi sellaisinaan soveltaa arvioitaessa ajoneuvon liiketilan muutoksista aiheutuvaa kulumista nykyisillä autoilla ja renkailla.

Käyttäen kappaleissa 4.1.2. ja 5.3. esitettyjä tuloksia ja teorioita renkaan profiilisuhteen ja nastan tiekosketuksen yhteydestä voisi olettaa, että kuluminen ajoneuvon liiketilan muutoksissa on nykyisillä renkailla ja nastoilla suhteessa vähäisempää kuin 1970-luvulla. Matalaprofiilinen rengas vaatii suuremman kuormituksen ja liiketilan muutoksen, jotta sen nastan hirttovaikutus myös liiketilan muutoksissa kasvaa. Lisäksi lukkiutumattomien jarrujen, vetoluiston estojärjestelmien ja ajonvakautusten yleistymisen autoissa on vähentänyt renkaan luistoprosenttia ajettaessa pidon rajoilla. Toisaalta tilanteet, joissa ajonhallinnan apuvälineet puuttuisivat luistoon, ovat harvinaisia suhteessa kaikkiin liikenteessä esiintyviin liiketilan muutoksiin.

Taajamaliikenteelle on ominaista ajoneuvon liiketilan muutosten suuri osuus liikkumiseen käytetystä ajasta ja matkasta. Liittymiä, pysähdyksiä ja liikennetapahtumia on paljon. Taajamaliikenteessä ajoneuvon liiketila voi muuttua mm. seuraavien ilmiöiden vaikutuspiirissä (taulukko 8 s.55).

Taulukko 8. Taajamaliikenteessä esiintyviä ajoneuvon liiketilan muutoksia

Ilmiö	Ajoneuvon liiketilan muutos
Pysäköinti (oma tai muun ajoneuvon)	Jarrutus, kiihdytys
Liikennevalot	Jarrutus, kiihdytys
Suojatie	Jarrutus, kiihdytys
Rakenteellinen hidaste (hidastetöyssy tai -kavennus)	Jarrutus, kiihdytys
Liittymästä kääntyminen	Jarrutus, kaarreaajo, kiihdytys
Kiertoliittymä	Jarrutus, kaarreaajo, kiihdytys
Jyrkkä kaarre	Jarrutus, kaarreaajo, kiihdytys
Kaistanvaihto, ryhmittäminen	Jarrutus, kaarreaajo, kiihdytys
Mäki	Jarrutusta tai kiihdytystä vastaava tien pituussuuntainen voima
Väistämisvelvollisuus (kärkikolmio, stop-merkki, oikealta tulija, kevyt liikenne, joukkoliikenne)	Jarrutus, kiihdytys
Jono, ruuhka	Jarrutus, kiihdytys

Jacobsson (2007) toteaa, että Tukholman kaduilla tehdyissä urasyvyysmittauksissa urasyvyys ei ole ollut riippuvainen mittauspisteen etäisyydestä liittymään. Tutkimusraportissa ei ole kuitenkaan eritelty sitä, kuinka kaukana liittymistä mittauspisteet ovat olleet, ja kuinka suuren osan liikenteestä arvioidaan hidastavan, pysähtyvän ja lähtevän liikkeelle liittymän takia.

Vaikuttavatko mittauskohteessa tai -pisteessä tapahtuvat ajoneuvon liiketilan muutokset olennaisesti mittautuloksiin? Onko ajoneuvon liiketilan muutoksille tyypillinen paikka paikannettu varmasti oikein? Voiko mittauspisteestä mitata urasyvyyden muutosta siten, että liikennevirran voi olettaa ajaneen yli tasaisella nopeudella? Nämä kaikki ovat tärkeitä kysymyksiä vastattaviksi, jos liikenneympäristöstä haetaan tiedon lähteitä päällysteiden kulumisen ja urasyvyyden määrittämiseksi tai tulkitaan aikaisempien mittausten tuloksia.

5.3. Renkaan ja nastan käyttäytyminen taajamanopeuksissa

Nastan tiekosketuksen ainoa komponentti, joka voisi selittää suuremman kulumisen alhaisissa nopeuksissa, on hierto. Lampisen (1993, s. 92) mukaan

$$\text{hierron kulumisrasitus} = \text{hierron pituus} \times \text{hiertovoima} \quad (\text{kaava 3.})$$

Tärkeimpiä hierron pituuteen vaikuttavia muuttujia ovat luistoprosentti, renkaiden auras- ja sortokulmat, tien kallistus ja renkaan kosketuspinnan pituus. Hierron pituutta voidaan tutkia myös kosketuspinnan leikkausjännityksen ja pintapainejakauman funktiona, koska teoriassa suuremman pintapaineen tai leikkausjännityksen itseisarvon pitäisi vähentää nastan liikkumista suhteessa kumiin, mikä puolestaan lisäisi nastan liikkumista suhteessa asfalttiin.

Hiertovoima riippuu nastan pistovoimasta ja nastaulkonemasta. Koska hiertovoimalla on nastan **dynaamiseen pistovoimaan** liittyvä komponentti, joka on lineaarisesti verrannollinen ajonopeuteen, täytyisi hierron pituuden kasvun nopeuden laskiessa kompensoida edellisen vaikutus, jotta hierron kulumisrasitus voisi kasvaa ajonopeuden laskiessa. Luistoprosentin, pyöräntulmien ja tien kallistuksen vaikutus hierron pituuteen ei kasva nopeuden laskiessa, jos muut muuttujat säilyvät vakiona. Renkaan kosketuspinnan pituus riippuu kappaleessa 4.1.2. esitetyllä tavalla renkaan profiilisuhteesta, jos renkaan pystykuormitus säilyy vakiona.

Renkaan voidaan ajatella toimivan jousen tavoin, kun se painuu kuormitettuna kasaan pystysuunnassa. Lampinen (1993, s. 91) toteaa, että mitä suurempi renkaan jousivakio on, sitä pienempi kokoonpuristuminen ja lyhyempi kosketusala. Renkaan jousivakio kasvaa ajonopeuden kasvaessa.

Ilmiö perustuu keskeiskiihtyvyyteen. Renkaan massa pyrkii siirtymään kauemmaksi pyörimisakselilta, kun rata- ja kulmanopeus kasvavat. Kumin kiinteä rakenne estää massaa pakenemasta renkaan vierintäkehän ulkopuolelle, mutta samaan aikaan kumin elastiset ominaisuudet mahdollistavat vierintäkehän lievän kasvun. Kun renkaan vierintäkehä on ajonopeuden ja keskeiskiihtyvyyden kasvun takia kasvanut, puristuu rengas myös pystysuunnassa vähemmän kasaan, ja kosketusala lyhenee. Tämä ilmiö on korkeaprofiilisilla renkailla voimakkaampaa kuin matalaprofiilisilla, koska matalaprofiilisen renkaan jousivakio on suurempi kuin korkeaprofiilisen, ja keskeiskiihtyvyys venyttää matalaprofiilisen renkaan vierintäkehää vähemmän.

Unhola (2004, s. 22) tutki nastajälkikokeella nastan tiekosketusta ja liikkumistaipumusta alustaan nähden ajonopeuden ja rengasprofiilin funktiona. Tutkimuksessa erot renkaan profiilien välillä näkyvät selvästi (kuva 18 s. 57). Jäljistä näkyy, että mitä korkeampi profiili on, sitä enemmän nasta pyrkii liikkumaan alustaan nähden. Liike ei ole aina suoraviivainen, vaan saman kosketuksen aikana saattaa nastan liike varsinkin 0.80-profiilin renkaassa vaihtaa suuntaa ja aikaansaa kaarevan tai

kulmikkaan raapaisun jopa 100 km/h vauhdissa. Matalampien profiilien renkaiden nastojen jäljet ovat pistemäisempiä. Ajonopeuden vaikutus nastajälkeen oli, että kaikilla rengasprofiileilla nastajälki oli suurissa ajonopeuksissa pistemäisempi ja alhaisissa ajonopeuksissa raapaisevampi. Erityisen suuri ajonopeuden vaikutus oli korkeaprofiilisissa renkaissa.

Ilmiö liittyy renkaan kokoonpuristumiseen ajonopeuden ja rengasprofiilin funktiona. Kun renkaan kosketusala on ajonopeuden tai profiilisuhteen takia lyhempi, aloittaa nasta tiekosketuksen vähemmän takakenossa asennossa kuin alhaisemmilla nopeuksilla tai korkeaprofiilisilla renkailla. Tämä tekee nastajäljistä pistemäisempiä ja vähentää raapaisun osuutta nastajäljen pinta-alasta.

Muuttuja	Profiilisuhte, (100km/h)			
Nastan pää	.80	.65	.55	.45
				
Ajonopeus, km/h, (.65 rengasprofiili)				
40	60	80	100	120
				

Kuva 18. Nastan pää ja nastojen jälkiä kivipinnalla eri profiilisuhteilla ja ajonopeuksilla (13-kertainen suurennos). (Unhola 2004)

Nastajälkikokeen visuaalinen tarkastelu kertoo kuitenkin ainoastaan nastan iskujäljen muodon. Tämän jälkeen jäävät avoimiksi kysymykset siitä, kuinka syvä nastan iskujälki on, paljonko materiaalia päällysteen pinnasta iskujen seurauksena irtoaa, ja kuinka vahingollisia nämä iskut ovat päällysteelle. Yksittäisen nastaiskun aiheuttama vaurio riippuu kappaleessa 3.2.2. kuvatulla tavalla myös useista päällysteen pinnassa olevista tekijöistä.

Renkaan kosketuspinnan pintapainejakauman ja leikkausjännitysten muutosta eri kuormitustiloissa on tutkittu yleisesti elementtimenetelmällä (FEM). Koisaaren ja Tuonoson (2010, s. 55) mukaan FEM-simuloinnin ongelmia ovat renkaan suuret siirtymät, komposiittinen rakenne ja epälineaariset materiaaliominaisuudet. Lopez ja

Steen (2007) tutkivat kuorma-auton renkaan ja tienpinnan välisiä jännitys jakaumia ympyräradan testilevyjen yliajokokeena, TireView-testissä ajamalla alhaisella nopeudella renkaan poikkileikkauksen leveydelle sijoitettujen 20 anturineulan yli, sekä FEM-simuloinnilla. Yhtenä tutkimuskohteena oli arvioida ajonopeudessa 80 km/h vaikuttavia dynaamisia jännityksiä ja siihen käytettyjen mallien luotettavuutta.

Lopezin ja Steenin (2007) testeissä elementtimenetelmään pohjautuvalla simuloinnilla renkaan pintapainejakauma oli 80 km/h nopeudessa lähes identtinen 1,5 km/h nopeudessa mitattuun verrattuna. Mallin mukaan leikkausjännityksen aiheuttama deformaatio kasvoi 20% ajonopeuden noustessa 1,5 km/h $\Rightarrow$ 80 km/h, mutta renkaan pituussuuntaisen voiman kasvu on huomattavasti tätä alhaisempi, koska rengas käyttäytyy voimakkaan epälineaarisesti. Ympyräratatestissä, jossa radan eri osien välille oli tehty pieniä korkeuseroja auttamaan pystysuuntaisten voimien ja värähtelyn käyttämistä nopeusmallien validoinnissa, saatiin pituussuuntaisen voiman kasvuksi vastaavalla nopeusvälillä 65 %. Testien tekijät katsoivat, että ympyräratatestin taustalla ollut malli oli parempi pituussuuntaisten voimien määrittämiseksi, koska se pohjautui kokemukseräisiin mittaustuloksiin ja sitä oli validoitu tähän tarkoitukseen laajasti. Sitä vastoin ympyräratatestin tuloksia ei voi muutoin ekstrapoloida määrittämään jännitys jakaumien muutosta eri nopeuksissa, vaan ainoastaan antamaan kvalitatiivista tietoa. Tämän perusteella on syytä olettaa, että renkaan kosketuspinnan leikkausjännityksen ja pintapainejakauman muutokset eivät ole relevantteja määritettäessä nastan dynaamista käyttäytymistä tasaisella alhaisella nopeudella ajettaessa.

5.4. Aiempia laboratoriomittauksia kulumisesta alhaisissa nopeuksissa

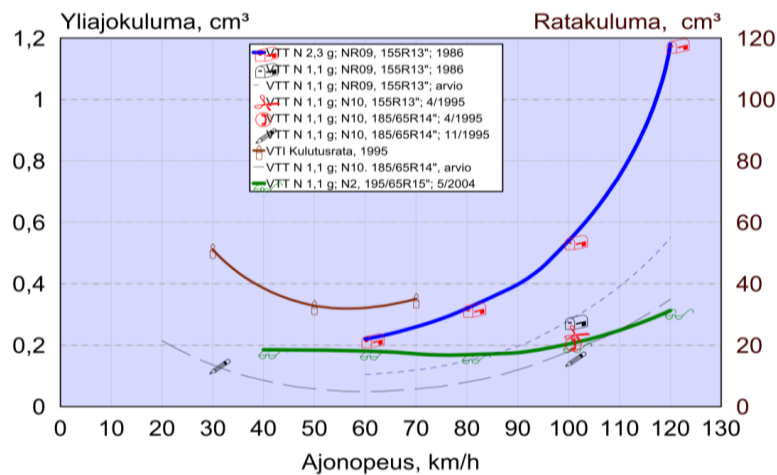
5.4.1. Yliajokokeet

Unholan LVM julkaisussa ”Nastarenkaiden kuluttavuus” (2004) tutkittiin yliajokokeena nastarenkaan aiheuttamaa tien kulumista ajonopeuden funktiona. Julkaisun mukaan tien kuluminen suoraan ja tasaisestikin ajettaessa aiheuttaa uria eri tavoin eri nopeuksilla (kaupungissa / päätiestöllä). Koerengas oli kokoa 195/65 R 15 ja rengaspaine 230 kPa. Unholan julkaisussa esiteltiin myös kuvan 19 (s. 59) mukaisesti aiemmissä tutkimuksissa mitattua yliajo- ja ratakulumaa ajonopeuden funktiona.

Unhola (2004, s. 22) toteaa: *Lienee selvää, että nastan isku on kulumisessa päätekijä suuremmilla nopeuksilla. Kevytnastoillakin kulutus lähtee jyrkkään nousuun 100 km/h suuremmilla nopeuksilla. Nousu ei ole kuitenkaan läheskään yhtä jyrkkä kuin painavilla nastoilla. Alemmilla nopeuksilla (alle 60 km/h) iskun merkitys on vähäisempi, mutta ilmeisesti raapaisu aiheuttaa silloin lisää kulutusta. Välillä näyttää olevan alue, jossa kummankin em. tekijän vaikutus on pienempi.*

Edellä mainittu Unholan toteamus on ollut tutkimuskysymyksissä esitetyn hypoteesin määrittäisperuste.

Kuvan 19 mukaisesti yliajokokeiden tutkimustulokset ajonopeuden vaikutuksesta yliajo- ja ratakulumaan myös poikkeavat toisistaan merkittävästi. Tähän on etsittävä syitä tutkimusmenetelmien eroista ja kehitysalueista.



Kuva 19. Yliajo- ja ratakuluma ajonopeuden funktiona VTT:n tutkimuksissa eri rengaskokoja ja nastoja käyttäen (Unhola 2004 s. 21). Kaikissa tutkimuksissa kuluma kasvaa 60–80 km/h nopeuden yläpuolella, mutta tätä alemmissa nopeuksissa tulokset ovat ristiriitaisia.

Kuvassa 19 on viitattu vuonna 1995 tehtyyn VTI:n kulutusratatestiin (kulutusrata kuvassa 20 sivulla 60). Tässä testissä kuluma on kasvanut kaikkein voimakkaimmin ajonopeuden laskiessa. VTI:n kulutusrata on halkaisijaltaan 5,25 m ympyrärata, jota vaakasuoriin akseleihin kiinnitetyt testirenkaat kiertävät. Kuudesta testiakselista neljä on sähkömoottorin avulla vetäviä ja kaksi vapaasti pyöriviä. (Jacobson & Wågberg 2007, s. 27)

VTI:n kulutusrata on suhteessa käytettyihin kulma- ja ratanopeuksiin hyvin pienisäteinen: keskeiskiihtyvyys tasaisella radalla 70 km/h ratanopeudella olisi

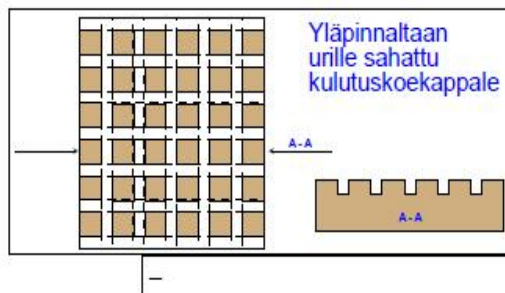
$$a = v^2 / r = (70 \text{ m} / 3,6 \text{ s})^2 / 2,625 \text{ m} \approx 144 \text{ m} / \text{s}^2 \quad (\text{kaava 4.})$$

mikä tarkoittaa lähes 15G kiihtyvyyttä. Kumikitkan avulla rengas pysyisi vastaavan säteisellä ympyräradalla enintään 15–20 km/h ratanopeudella, mistä voidaan päätellä testirenkaissa esiintyvän huomattavasti luistoa. On mahdollista, että renkaan eteneminen VTI:n pienisäteisellä kulutusradalla jatkuvassa luistossa vääristää tutkimustuloksia ajonopeuden funktiona.

VTT:n yliajokokeissa koekappaleina käytettiin graniittilaattoja, joiden yläpinta on sahattu urille. (kuva 21). Koekappale asennetaan asfalttiin mittauspisteeseen, ja testirenkailla ajetaan kappaleen yli tavanomaisesti 400 ylitystä, minkä jälkeen kappale punnitaan ja kappaleesta poistunut massa lasketaan. Koekappaleet kastellaan testin ajaksi, jotta olosuhteet säilyvät testin läpi yhtäläisinä (mm. vältetään koekappaleen pinnan lämpötilan nousua ja hiekkapaperi-efektiä).



Kuva 20. VTT:n testeissä käytetty kulutusrata (Jacobson & Wågberg 2007, s. 27)



Kuva 21. VTT:n yliajokokeen graniitista valmistettu kulutuskoekappale (Unhola 2004, s. 14)

VTT:n yliajokoe on toistettavuudeltaan ja eri muuttujien yhdisteltävyyden osalta hyvä menetelmä päällysteen kulumisen mittaukseen, mutta alhaisissa ajonopeuksissa relevantin nastan hiertovaikutuksen osalta jää avoimia kysymyksiä: Kappaleessa 3.4. on esitetty Lampisen (1993, s. 122–123) 2. hypoteesi märän asfaltin nopeasta kulumisesta nastan lisääntyneen hiertovaikutuksen takia. Tuleeko hierron osuus kulumisesta yliajokokeessa liian suureksi todelliseen liikenneympäristöön verrattuna sen takia, että

kokeessa ajetaan jatkuvasti märällä alustalla? Mikä on urille sahatun ja märän kappaleen pinnan yhteisvaikutus hiertoon? Koekappaleen pinnan muotoon ja kosteuteen liittyvät koejärjestelyt ovat toimineet hyvin määritettäessä suurissa nopeuksissa relevantin nastaiskun kulutusvaikutusta, mutta samat ilmiöt voivat mahdollisesti heikentää alhaisissa nopeuksissa tapahtuvan hiertovaikutuksen mittauksen luotettavuutta. Näin siksikin, ettei yliajokokeiden kulumista pystytä päättelemään minkäänlaista yhteyttä kappaleessa 5.3. esitettyyn nastajälkikokeeseen, jonka mukaan matalaprofiilisella renkaalla hierron pitäisi tapahtua alhaisemmissa nopeuksissa kuin korkeaprofiilisilla, eikä kappaleessa 4.1.1 esitettyyn teoriaan, jonka mukaan nastan massa vaikuttaa alhaisissa ajonopeuksissa kulumaan suhteellisesti enemmän kuin korkeissa.

5.4.2. Katupölymittaukset testiradalla

Renkaan tiestä irrottamien PM_{10} -hiukkasten määrää eri muuttujien funktiona on tutkittu laajasti Pohjoismaissa, koska katupöly on ollut tärkein asia määritettäessä nastarenkaiden käyttöä koskevia rajoituksia ja maksuja Ruotsissa ja Norjassa.

PM_{10} -hiukkasilla on päällysteen kulumisen lisäksi lukuisia muitakin lähteitä. Kupiaisen (2007, s. 10, 38) mukaan katupölyä syntyy päällysteen kulumisen lisäksi mm. hiekoitus-hiekasta, pakokaasuista, renkaista ja jarruista. Lisäksi hiukkaset, jotka ovat laskeutuneet tien pinnalle tai sen lähetyville, voivat nousta ilmaan uudelleen ajoneuvojen aiheuttamien ilmavirtojen tai renkaiden nostattamina (resuspensio).

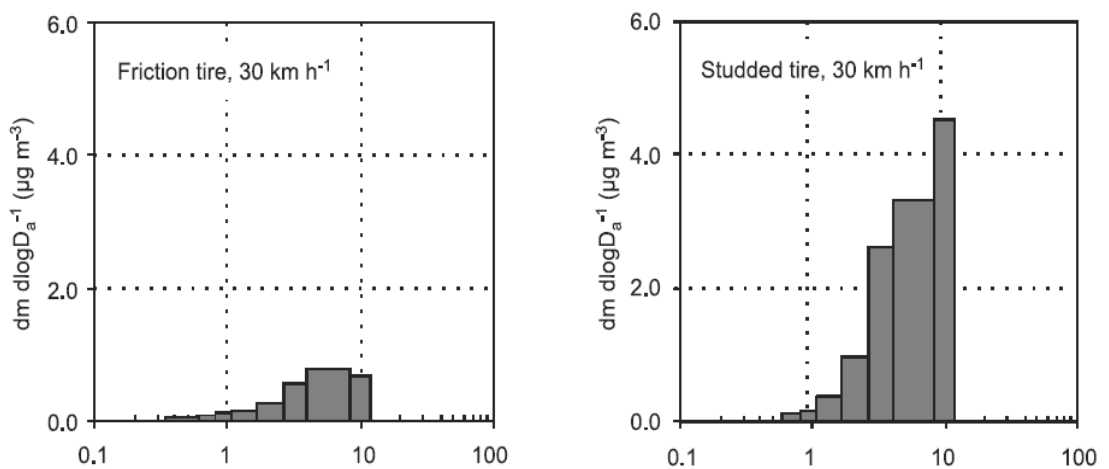
Kupiaisen kritisoiman aikaisempiin tutkimuksiin perustuvan arvion perusteella 30 % nastarengaskulumisen aiheuttamien partikkeleiden tilavuudesta olisi PM_{10} -hiukkasia. Aksnes (2009, s. 28–29) toteaa, että asfaltista irronneiden partikkeleiden kokojakauma on lähes kaikilla tutkimusmenetelmillä vastaava kuin VTI:n kulutusratakokeissa mitattu, mutta Micro-Deval- kiviainestestissä irronneet partikkelit olivat keskimäärin selvästi pienempiä kuin muilla menetelmillä. Micro-Deval –testissä PM_{10} -hiukkasten osuus kaikkien partikkeleiden tilavuudesta oli 60–80%, ja kaikilla muilla testimenetelmillä noin 40 %.

Kuten kappaleessa 4.1.1. on mainittu, liikenneympäristössä tehty katupölymittaus ei sovellu päällysteiden kulumisen tarkkaan arviointiin, koska liikenneympäristössä esiintyy lukuisia hyvin voimakkaita PM_{10} -hiukkasten määrään vaikuttavia tuntemattomia muuttujia. Sitä vastoin laboratoriossa, missä koe toistetaan esimerkiksi eri renkailla peräkkäin mahdollisimman samanlaisissa ja tunnetuissa oloissa, on katupölymittauksilla mahdollista nähdä ainakin kohtalaisen luotettavia trendejä renkaan vaikutuksista kulumiseen. Aksnes (2009, s. 26–27) esittää päällysteiden kulumisesta VTI:n ympyräratakokeilla seuraavat teoriat:

- 1) PM_{10} - hiukkaspitoisuus on ajonopeuksissa 30–70 km/h suoraan verrannollinen nastarenkaita käyttävien ajoneuvojen osuuteen
- 2) PM_{10} - hiukkaspitoisuus on ajonopeuksissa 20–70 km/h lähes suoraan verrannollinen myös ajonopeuteen

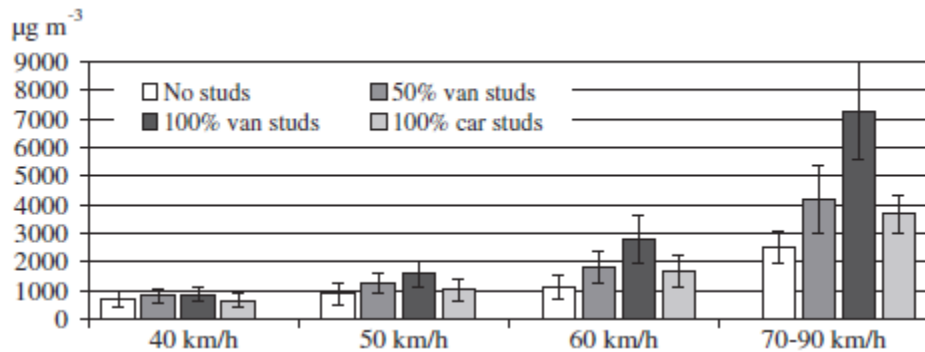
Yhdistämällä Aksnesin teorial 1 ja 2 Trögerin kiviainestestituloksiin Aksnes (2009, s. 26–30) pitää ilmeisenä, että laboratorio-oloissa (kuten VTI:n testiradalla) mitatun hiukkaspitoisuuden ja päällysteen kulumisen välillä on suora yhteys. On kuitenkin yllättävää, että VTI:n katupölymittauksissa käytettyjen ympyräkokeiden tulokset poikkeavat niin paljon niistä VTI:n kokeista, joihin Unhola (2004, s. 21) on viitannut kappaleessa 5.4.1. esitetyn kuvaajan mukaan. VTI:n katupölymittauksissa saadut tulokset ovat linjassa esimerkiksi Kupiaisen (2009, 2011) esittämien tulosten ja päätelmien kanssa, mutta vuonna 1995 tehdyn nastarengaskulutuskokeen käyttäytyminen alhaisissa nopeuksissa on jotain aivan muuta. Asian voivat osittain selittää esimerkiksi eri ympyräatakokeiden väliset erot radan kastelussa, käytettävissä testipintaprofiileissa ja testiradan akselien pyöräntulmissa.

Kuvan 22 partikkelijakaumista nähdään, että hiukkasten suuremman kokonaismassan lisäksi myös hiukkasten keskimääräinen koko on ollut suurempi nastarenkaita käytettäessä. Ajonopeuden kasvu vaikutti Kupiaisen testiratakokeissa vastaavalla tavalla, eli partikkelien koko kasvoi. Ilmiö perustuu siihen, että ajonopeuden ja nastavoimien kasvaessa nasta irrottaa päällysteen pinnasta suurempia hiukkasia. Tätä teoriaa tukevat myös Aksnesin (2009, s. 28) esittämät mittaustulokset, joissa nopeusrajoituksen alentaminen 80 km/h $\Rightarrow$ 60 km/h muutamilla Oslon seudun teillä vähensi mitattuja PM_{10} -hiukkaspitoisuuksia keskimäärin 35 %, mutta samaan aikaan muutokset $PM_{2,5}$ -hiukkaspitoisuuksissa olivat merkityksettömiä.

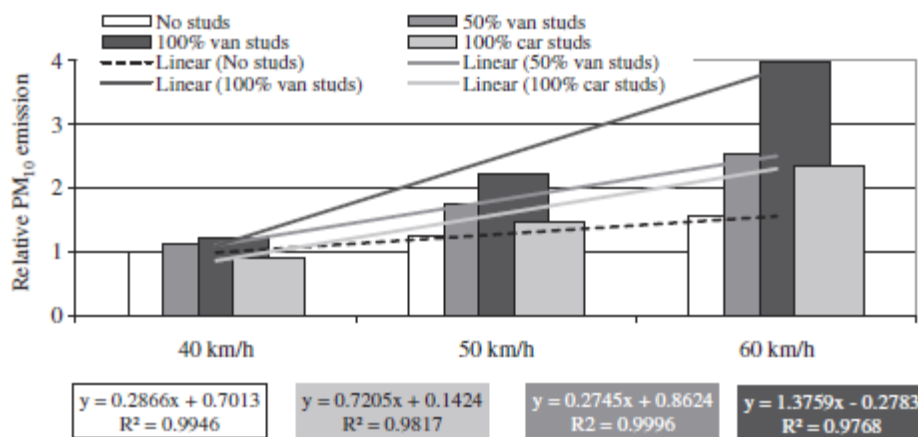


Kuva 22. Vasemmalla kitkarenkaan partikkelikokojakauma testiradalla tehdyissä kokeissa. Oikealla nastarenkaan vastaava jakauma. Ajonopeus 30 km/h. (Kupiainen 2007, s. 31)

Kuvista 23 ja 24 nähdään Kupiaisen ja Pirjolan (2011) tutkimustuloksia, joiden taustalla ollut tutkimusmenetelmä on esitelty sekä tutkimustuloksia nastan koon ja lukumäärän vaikutuksista kulumiseen arvioitu kappaleessa 4.1.1. Ajonopeuden vaikutus PM_{10} -hiukkaspitoisuuksiin on näissäkin kuvaajissa selvä, emissio kasvaa nopeuden kasvaessa kaikilla nastatyypeillä ja myös nastattomilla renkailla.



Kuva 23. PM_{10} -hiukkasten massa eri ajonopeuksilla ja nastoituksilla (Kupiainen & Pirjola 2011).



Kuva 24. Regressioyhtälöt PM_{10} -hiukkasten massan riippuvaisuudelle ajonopeudesta nastoitustyypeittäin (Kupiainen & Pirjola 2011).

5.5. Päälysteiden kulumismallit ja liikenneverkossa tehdyt uramittaukset

5.5.1. VTI:n päälysteiden kulumismalli ja Tukholman katujen kuluminen

VTI on päivittänyt 1990-luvulta alkaen päälysteiden kulumismallia (versio 3.2.03 esitelty Jacobson & Wagberg 2007), joka koostuu kolmesta osamallista (Jacobsson 2007, s.13):

1. Osamalli, joka laskee päälysteen kulumisen nastarenkaita käyttävien autojen lukumäärän perusteella

2. Osamalli, joka määrittää kulumisen jakautumisen ajokaistan leveydelle (kulumisprofiilin)
3. Osamalli, joka laskee päällysteen ylläpidon vuosikustannuksen ja päällysteen käyttöiän

Malli on rakennettu VTI:n ympyräatakokeiden perusteella, ja sen validoinnissa on käytetty liikenneympäristössä tehtyjä kulumismittauksia. Ensimmäinen validointi tehtiin talvella 1996/97, minkä jälkeen koko mallia on validoitu uudelleen päivitysten yhteydessä muutaman vuoden välein.

Jacobsson (2007) raportoi Tukholman seudulla talvella 2006/07 tehdyistä urasyvyysmittauksista sekä mitattujen urasyvyyksien yhteydestä VTI:n kulumismallilla arvioituihin tuloksiin. Jacobssonin mukaan mitattu maksimiurasyvyyden kasvu ja SPS-luku olivat Tukholman ohitus- ja sisääntuloteiden 70–110 km/h nopeusrajoitusalueilla yli kaksinkertaisia verrattuina kaupunkialueen 50 km/h nopeusrajoitusalueisiin.

Käyttäen Jacobssonin & Wågbergin päällysteiden kulumismallia (2007) voidaan osa Unholan (2004) ja Jacobsson (2007) tutkimustulosten eroista ajonopeuden vaikutuksista selittää sillä, että Tukholman kaupunkialueen 50 km/h nopeusrajoitusalueiden mittauskohteissa on käytetty kuulamylyllyarvoltaan (5) kestävämpää päällystettä kuin ohitus- ja sisääntuloteiden 70–110 km/h nopeusrajoitusalueilla (kuulamylyllyarvo 6–7). Jacobssonin & Wågbergin (2007) esittämä osamalli (kaava 5) kuulamylyllyarvolle urasyvyyden funktiona on voimassa kuulamylyllyarvon (KV) arvoilla 3-13:

$$KV = 5,8305 * urasyvyys - 2,0687 \quad (R^2 = 0,88) \Rightarrow \quad \text{(kaava 5.)}$$

$$urasyvyys = 0,1715 * KV + 0,355$$

johon sijoitettuna urasyvyyden suhde kuulamylyllyarvojen (KV) 5 ja 7 välillä on

$$urasyvyys(5) / urasyvyys(7) = \frac{5 * 0,1715 + 0,355}{7 * 0,1715 + 0,355} = 0,7795 \quad \text{(kaava 6.)}$$

Kuulamylyllyarvon vaikutus on korjattu taulukkoon 9 (s. 65) siten, että mittauskohteille, joiden kuulamylyllyarvo on suurempi kuin 5, on laitettu oikean puolimmaiseen sarakkeeseen SPS, joka vastaisi kohteen SPS-lukua kuulamylyllyarvolla 5. Päällysteen massatyypin kaikissa tässä työssä arvioiduissa Jacobssonin (2007) tutkimuksen mittauskohteissa on SMA 16, ja muut mittauskohteiden väliset päällysteominaisuuksien erot kuulamylyllyarvoa lukuun ottamatta ovat vähäisiä.

Taulukko 9. Tukholman katujen ja sisääntuloteiden urautuminen eri selittävien muuttujien vallitessa. (Jacobsson 2007)

Mittaus-piste	Liikenne-määrä (ajon/vrk)	Nopeus-rajoitus (km/h)	Massatyyppi, maksimiraekoko, kuulamyllyarvo	Maksimi-Urasyvyyden kasvu (mm)	SPS-luku	Kuula-mylly-arvolla korjattu SPS
4	37827	70	SMA 16, KK < 7	2,0	4,9	3,8
5	46709	90	SMA 16, KK < 7	2,8	5,5	4,3
7	40000	50	SMA 16, KK 5	1,0	2,4	2,4
8	40000	50	SMA 16, KK 5	0,9	1,8	1,8
10	23000	50	SMA 16, KK 5	0,5	1,6	1,6

Vaikka kuulamyllyarvo otetaan huomioon, on kulumisen 70–90 km/h nopeusrajoitusalueilla noin kaksinkertaista verrattuna 50 km/h nopeusrajoitusalueisiin. Nopeusrajoituksen lisäksi näiden tutkimustulosten arvioinnin yhteydessä voidaan esittää arvioita liikenteen todellisesta keskinopeudesta mittauskohteissa. Mittauskohteet 7, 8 ja 10 sijaitsevat Tukholman eteläisessä kantakaupungissa Södermalmilla hyvin vilkasliikenteisillä kaduilla. Helsingissä vastaavia liikennemääriä ja nopeusrajoituksia on esimerkiksi Helsinginkadulla Sturenkadun liittymän länsipuolella, ja Hellmanin (2010) liikenteen sujuvuusmittausten mukaan liikenteen todellinen keskinopeus edellä mainitussa mittauskohteessa oli noin 20 km/h. Vaikka Jacobssonin ja Wågbergin (2007) mukaan VTI:n kulumismallia käytetään vain väylillä, joissa liikkuminen on tasaisen sujuvaa, ja Tukholman pääkatujen liikennevaloilla olisi enemmän etuuksia kuin Helsinginkadulla, ei todellinen keskinopeus voi tuollaisilla liikennemäärillä nelikaistaisella kadulla nousta ruuhka-aikoina yli 30 km/h, millä on jo huomattava painoarvo koko vuorokauden liikenteen keskinopeutta laskettaessa.

Göranssonin VTI-julkaisussa (2009) tutkittiin vilkasliikenteisten teiden päällysteiden kulumista Tukholman seudulla talvina 2006/07 ja 2007/08. Molemmat talvet olivat keskimääräistä leudompia. Näiden talvien talvikuukausista kuukauden keskilämpötila Tukholmassa oli pakkasen puolella vain helmikuussa 2007. Päiviä, jolloin lämpötila pysyi koko vuorokauden pakkasen puolella, oli Tukholmassa 27 talvella 2006/07 ja 15 talvella 2007/08.

Tutkimuksessa mitattiin teiden urasyvyyden kehittymistä ja arvioitiin nastarenkain varustettujen autojen päällysteestä irrottamaa massaa kuudessa eri mittauspisteessä. Näiden mittauspisteiden KVL oli 31000–48000 ajon/vrk, josta henkilöautoliikenteen osuus noin 90 %. Kaikki mittaukset tehtiin kaksiajorataisilla teillä, joilla on kaksi

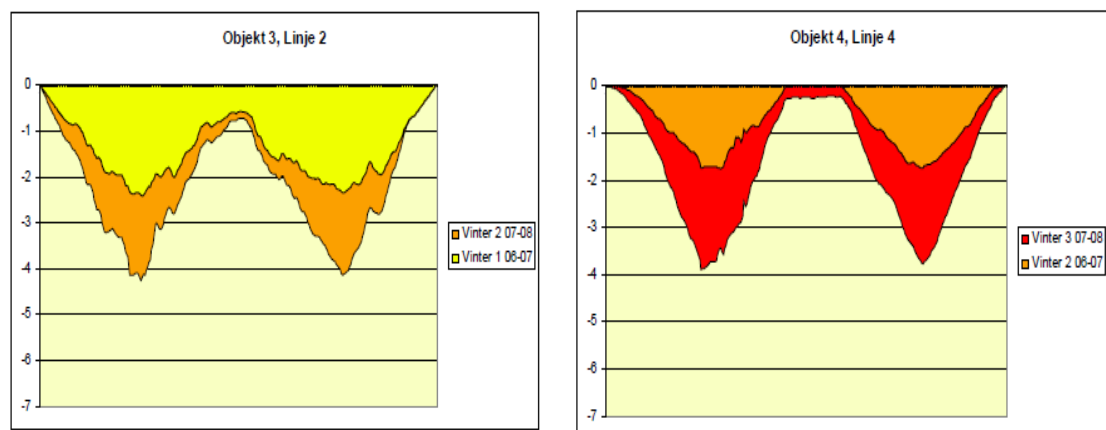
ajokaistaa ajosuuntaa kohti. Nopeusrajoitukset olivat 70, 90 ja 110 km/h. Tiet oli päällystetty vuosina 2004–2006, joten uusimmat päällysteet olivat talvella 2006/07 ensimmäistä vuotta käytössä ja vanhimmat talvella 2007/08 neljättä vuotta käytössä.

Tutkimustulokset olivat seuraavia:

- Nopeusrajoituksella ja teiden kulumisella on positiivinen korrelaatio
- Vuosina 2004–05 päällystetyt tiet kuluivat talvella 2007/08 16–20 % (SPS) ja 11–24 % (maksimiurasyvyys) enemmän kuin talvella 2006/07. Vuonna 2006 päällystetyt tiet kuluivat talvella 2006/07 39–86 % (SPS) ja 20–36 % (maksimiurasyvyys) enemmän kuin talvella 2007/08 (kuva 25)
 - > ks. kappale 3.3.1. Uuden päällysteen alku-urautuminen
- Päällysteiden kuluminen Tukholman seudulla on hieman lisääntynyt vuosituhatosen vaihteesta
- Nastarenkaiden käyttö on hieman vähentynyt viime vuosina

Vanhojen päällysteiden voimakkaampi kuluminen VTI:n tutkimuksessa talvella 2007/08 on osin yhteydessä talven leutouteen. Talvella 2007/08 on ollut enemmän päiviä, jolloin lämpötila on ollut osan vuorokaudesta tai koko vuorokauden nollan yläpuolella, mikä on aikaansaanut nastarengaskulumiselle alttiita paljaita ja märkiä tienpintoja.

Jacobsson (2007) vertasi myös liikenneympäristössä tehtyjen poikkiprofiilimittausten tuloksia VTI:n päällysteiden kulumismallilla tehtyihin ennusteisiin. Kulumismallin ennusteet pitivät paikkansa kiitettävästi 50 km/h nopeusrajoitusalueilla. Suurin ero ennustetun ja mitatun urasyvyyden välillä oli 0,1 mm. Jacobssonin ja Wågbergin (2007) mukaan VTI:n kulumismallissa käytetty suhteellinen kuluminen on 0,65 nopeusrajoituksen ollessa 50 km/h ja 0,90 nopeusrajoituksen ollessa 70 km/h.



Kuva 25. Vasemmalla vuonna 2006 päällystetyn mittauskohteen 3 (moottoritie E4, nopeusrajoitus 110 km/h vasemman ajokaistan kulumisprofiili talvina 2006/07 (ylempi käyrä) ja 2007/08 (alempi käyrä). Oikealla vuonna 2005 päällystetyn mittausosuuden (maantie 229, nopeusrajoitus 70 km/h) vastaavat profiilit.

Kulumismalli ennusti 70–110 km/h nopeusrajoitusalueilla keskimäärin todellista pienempiä urasyvyyskorsia. Kun alun perin käytetty ajokaistakohtainen liikenteen jakauma prosentteina (60/40 oikea/vasen) muutettiin arvoihin 70/30, ennusteen tarkkuus parani. Kaikkein lähimmäksi mitattuja urasyvyyskorsia malli osui, kun ajokaistakohtainen liikenteen jakauma oli 70/30, ja kuulamylyarvo selittävänä muuttujana korvattiin Prall-luvulla. Tämän perusteella Jacobsson päätteli, että mallinnuksessa käytetty ajokaistakohtainen liikennemäärä on ollut epätarkka, ja sisääntulo- ja ohitusteiden päällysteen kuulamylyarvo voi olla ilmoitettua suurempi.

VTI:n liikenneympäristössä tekemät mittaukset ja urasyvyysmalli osoittavat hyvin johdonmukaisesti sen, että päällysteiden kulumisen kaupungin katuverkossa alhaisella nopeusrajoitusalueella sijainneissa mittauspisteissä on ollut merkittävästi alhaisempaa kuin sisääntulo- ja ohitusteillä. Tämä tukee osaltaan muita tutkimustuloksia, joissa nastarenkaiden aiheuttama päällysteiden kulumisen alhaisissa nopeuksissa on vähäistä. Liikenneympäristössä tehdyille tutkimuksille, joissa päällysteen ja liikenteen taustamuuttujat tunnetaan ja on esitetty yksityiskohtaisesti, on annettava suuri painoarvo eri tutkimustuloksia arvioitaessa.

5.5.2. Koetietutkimuksia ja palvelutasomittauksia Suomessa

Suomessa rakennettiin 1990-luvulla mm. minikoetie valtatielle 1 Helsingin ja Espoon rajalla (Vuorinen et al. 1998), 14 ASTO-koeteitä (Kurki 1998) sekä useita katu-päällystetutkimuskohteita kaupunkialueille (Suomen Kuntaliitto & VTT Yhdyskuntatekniikka 1999).

Tässä kappaleessa käsitellään maantieliikenteessä tehtyjä tutkimuksia, koska ne soveltuvat hyvin empiiristen tutkimustulosten vertailukohteiksi arvioitaessa taajamien ja maanteiden urautumisen eroja.

Kurjen (1998) tutkimuksessa arvioitiin ajouran poikkipinta-alan (cm^2) suhdetta urasyvyyteen (mm) tien leveyden mukaan. Odotetusti kapealla tiellä urat keskittyvät kapealle alalle, jolloin urasyvyys suhteessa uran pinta-alaan on suurempi kuin leveällä tiellä. Tämä ilmiö tulee esille myös taajamaliikenteessä tämän tutkimuksen kuntotietoanalyysissa ja urasyvyysmittauksissa kappaleissa 6 ja 7.

Kurjen (1998) tutkimuksesta on myös saatavilla tietoa ajourien poikkipinta-alan muutoksista nastarenkaiden käyttöaikana koeteillä, joiden talvinopeusrajoitus oli 80 tai 100 km/h. Talvella 1996–97 AB20- ja SMA16- massatyypeillä päällystetyt vähäliikenteisimmät koetiet (KVL 4400–6600 ajon/vrk) kuluivat keskimäärin $15\text{--}30 \text{ cm}^2 / \text{talvi}$, ja vilkasliikenteisimmät yksiajorataiset koetiet (KVL 7700–11000 ajon/vrk) kuluivat keskimäärin $30\text{--}50 \text{ cm}^2 / \text{talvi}$ viimeisenä talvena ennen uudelleen päällystämistä (vuosina 1993–1997). Tutkimuksen aikaan liikenteessä oli vielä yleisesti

käytössä henkilöauton nastarenkaita, joiden nastojen massa, pistovoima ja lukumäärä ylittivät taulukossa 5 sivulla 45 esitetyt nykyiset määräykset. Toisaalta liikenteessä yleisesti olevat henkilöautot ovat muuttuneet tutkimuksen jälkeen huomattavasti painavammiksi (ks. kappale 4.1.3 ja Unhola 2004). Kokonaisuutena voidaan arvioida, että yhden nastarenkaita käyttävän henkilöauton aiheuttama päällysteiden kuluminen on ollut Kurjen tutkimuksissa vuonna 1993 noin 40 % voimakkaampaa ja 1997 noin 20 % voimakkaampaa kuin kuntotietoanalyysissa ja urasyvyysmittauksissa tutkittuina vuosina 2005–2012, jos muut muuttujat oletetaan vakioiksi. Toisaalta sisämaassa testattuja kohteita peitti 1990-luvun talvina lumi ja jää huomattavasti pidempiä aikoja kuin Helsingin vilkasliikenteisiä katuja 2000-luvun talvina.

Vuorinen et al. (1998) tutkivat Kurjen (1998) tutkimustuloksia hyödyntäen SMA-päällysteiden kestoikää (aika vuosina kun urasyvyys saavuttaa 15 mm) eri muotoluokan ja litteysluvun kiviaineksilla. Vilkasliikenteisillä (KVL 18000 ajon/vrk) teillä kestoikä oli 3–6 vuotta ja vähäliikenteisemmillä (KVL 7500 ajon/vrk) 10–15 vuotta. Tätä kestoikää vastaavaan urautumiseen oli laskettu pelkkä nastarengaskulumisen vaikutus

Tiehallinto (40/2005) tutki tilastollisilla tarkasteluilla tiestön urautumista sekä siihen vaikuttavia tekijöitä erilaisissa tiestön osaverkoissa sekä määrittäi edelleen erilaisia urautumismalleja. Tiehallinnon urautumismalleissa käytettiin kertoimena nopeusrajoitukselle (0,85, kun talvinopeus = 60 km/h; 1,00, kun talvinopeus = 80 km/h ja yksiajorataisella tiellä 100 km/h; 1,10, kun talvinopeus = 100 km/h kaksiajorataisella tiellä), mikä tarkoittaa, että mallien mukaan tie urautuisi 60 km/h nopeusrajoituksella 85 % urautumisesta 80 km/h nopeusrajoituksella, jos muut muuttujat pysyvät vakiona. Tiehallinnon urautumismalli ei arvioi urautumista alle 60 km/h nopeusrajoituksilla, mutta ainakin nopeusrajoituksilla 60–100 km/h Tiehallinto on arvioinut urautumisen olevan lähes suoraan verrannollista nopeusrajoitukseen.

Tiehallinto totesi tutkimustulostensa (40/2005) perusteella myös, ettei tien vaakageometrialla ollut merkittävää vaikutusta urautumisnopeuteen. Alle 10,5 m leveillä teillä urautumisnopeus kaarteissa oli 2–10 % alhaisempi kuin suorilla, minkä perusteella kaarreaajossa keskimäärin esiintyvät sivuvoimat eivät lisää nastan ja tienpinnan kosketuksen voimaa ja ajallista kestoja niin paljon, että se lisäisi päällysteen kulumista.

.

6. Kuntotietoanalyysi Helsingissä 2004–2011 mitatuista PTM-tuloksista

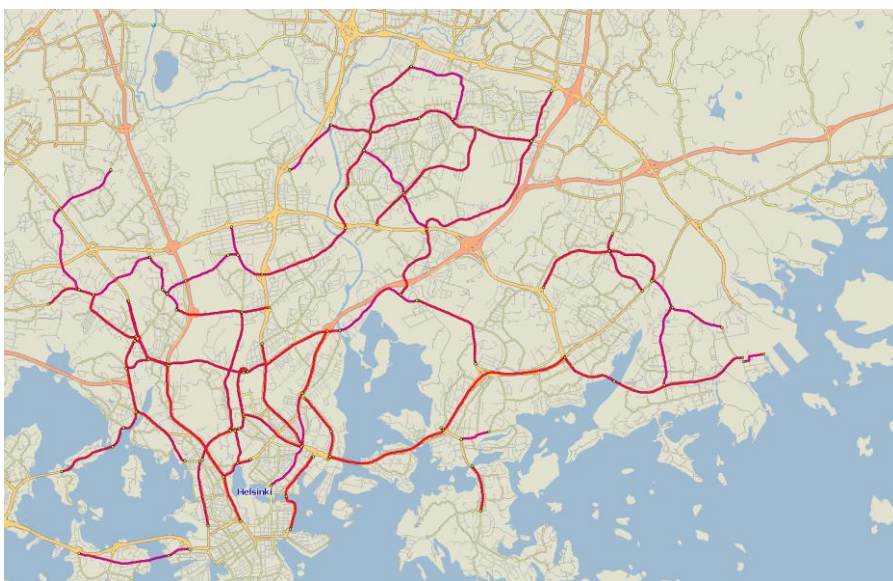
6.1. Kuntotietoanalyysin tavoitteet

Kuntotietoanalyysi tehtiin, jotta kirjallisuustutkimuksen tuloksille saataisiin tarkennusta, ja jotta kirjallisuuden perusteella esitettyjä teorioita eri muuttujien yhteydestä päällysteiden kulumiseen voitaisiin vahvistaa tai hylätä. Kuntotietoanalyysissä pyrittiin selvittämään tilastollisin menetelmin erityisesti liikenteellisten muuttujien vaikutusta päällysteiden urautumisnopeuteen. Lisäksi kuntotiedosta odotettiin olevan hyötyä arvioitaessa nastarengaskulumisen osuutta liikenteellisesti erilaisten katujen kokonaisurautumisesta.

6.2. Kuntotietoanalyysin aineisto

6.2.1. PTM-mitatut kadut

Kuntotietoanalyysissä analysoidut mittaukset on kerätty palvelutasomittausautolla tehdyistä PTM-mittauksista (liitteessä 14 PANK-5207 menetelmäkuvaus päällysteiden autolla tehtävistä mittauksista). Mittauksissa kaikilta kaduilta on mitattu urasyvyys vasemmasta ja oikeasta ajourasta, maksimiurasyvyys, epätasaisuusluku (IRI) ja sivukaltevuus. Vuosina 2004–2011 Helsingin kaupungin rakennusvirasto ja Destia tekivät näitä mittauksia Helsingin vilkasliikenteisillä kaduilla vuosittain 372–410 katukilometrillä (kuvassa 26 vuosina 2009–2010 mitatut kadut). Mittaukset on tehty joka vuosi alkusyksystä ennen nastarengaskauden alkua, kun pääosa kesän päällystystöistä on ollut valmiita.



Kuva 26. Vuosina 2009–2010 PTM-mittausohjelmaan kuuluneet kadut (Destia 2009).

6.2.2. Analysoitavien kohteiden valintakriteerit

Analyysia ei tehty kaikilta mittausohjelmaan kuuluneilta kaduilta, vaan siihen valittiin 13 yhteysväliä seuraavin perustein:

- Vähäliikenteisimmän analysoitavan yhteysvälin KVL enintään 8000 ajon/vrk. Urautumista ja sen nopeutta tarkastellaan eri liikennemääräluokissa, jotka muodostetaan PTM-mittaustietojen ja liikennemäärätietojen perusteella.
- Useita erilaisia nopeusrajoituksia vähintään välillä 30–70 km/h, myös liikenteen todellinen keskinopeus tiedettävä mahdollisimman useissa kohteissa.
- Vähintään yksi asfalttibetonilla (AB) päällystetty yhteysväli, jolle olemassa vertailukelpoinen kivimastiksiasfaltilla (SMA) päällystetty yhteysväli -> massatyypin vaikutus nastarengaskulumiseen kaupunkinopeuksissa.
- Vähintään osassa kohteista saatavilla tarkkaa tietoa raskaan liikenteen määristä ja osuuksista Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluviraston liikennesuunnitteluosaston (Hellman & Lilleberg 2011) liikennelaskelmista.
- Yksi tai useampia sellaisia yhteysvälejä, joissa hidastamaan ja pysähtymään joutuvien ajoneuvojen osuus tiettyjen paalujen kohdalla on korkea -> paikallaan olevan ja hitaasti liikkuvan massan aiheuttaman deformaation sekä ajoneuvon liiketilan muutosten vaikutus kulumiseen verrattuna paaluihin, joilla liikenteen nopeus yleensä tasainen.
- Eri variaatioita kaistojen lukumäärän sekä ajoradan ja -kaistan leveyden osalta -> liikenteen jakautuminen ja kanavoituminen ajoradan poikkileikkauksella.
- Päällysteen iän ja mittausjakson alussa olleen urasyvyyden huomioon ottaminen kulumisessa -> alku-urautuminen päällystysvuonna, urautumisen vakiintuminen, urasyvyyden kasvun kiihtyminen liikenteen keskittyessä jo syntyneisiin uriin.

6.2.3. Analysoitaviksi valitut kohteet

Taulukossa 10 sivulla 72 on esitelty kuntotietoanalyysiin valitut kohteet ajosuunnittain ja paaluväleittäin. Taulukon muiden pystysarakkeiden tiedot on kerätty seuraavasti:

- Nopeusrajoitus (km/h) Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirasto (2005). Keskinopeus ruuhka-aikoina ja päivällä ruuhka-aikojen ulkopuolella Hellmanin (2009) tutkimuksesta kelluvan auton menetelmällä. Keskinopeus ruuhka-aikoina on liikenteen keskinopeus klo 6:30–9 ja 15–18. Keskinopeus päivällä ruuhka-aikojen ulkopuolella on liikenteen keskinopeus klo 9–15. Jos mittauskohte ei ole kuulunut Hellmanin mittausohjelmaan, on liikenteen todellinen keskinopeus arvioitu käyttämällä apuna Hellmanin mittausohjelmassa olleiden nopeusrajoituksiltaan, liikennemääriltään ja välityskyvyiltään lähimmäs vastaavien yhteysvälien keskinopeustietoja.
- KVL (ajon/vrk) Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluviraston (2011) ilmoittamat liikennemäärät Helsingissä syyskuussa 2010.
- Raskas liikenne (%) Hellman & Lilleberg (2011) julkaisusta kerätyt raskaan liikenteen (kuorma-autot, ajoneuvoyhdistelmät, linja-autot) osuudet (%) KVL:sta mittauskohteissa. Jos mittauskohteesta ei ole ollut saatavilla em. dataa, on raskaan liikenteen osuus arvioitu käyttäen apuna toiminnalliselta luokituksestaan, joukkoliikenneolosuhteiltaan ja lähiseutujen elinkeinorakenteeltaan vastaavan tyyppisiä yhteysvälejä Hellmanin & Lillebergin julkaisussa.
- Päällysteen massatyyppi- ja päällystysvuositiedot hankittu Ismo Rantaselta Helsingin kaupungin rakennusvirastosta sähköpostitse 14.–16.9.2011

Kaduilta, joiden urasyvyyydet mitattiin laserprofilometrillä (kappale 7) syksyllä 2011 ja keväällä 2012, kuntotietoanalyysin havaintoihin otettiin mukaan vastaavat ajosuunnat ja paaluvälit kuin urasyvyysmittauksissa. Muilta kaduilla analysoitavaksi otettiin pääosin ajosuunta 1 koko kadun pituudelta. Niissä mittauskohteissa, joissa osalla kadun pituudelta oli tiedossa huomattavan suuri pysähtyvien, liikkeelle lähtevien ja hitaasti liikkuvien ajoneuvojen osuus, otettiin analyysiin mukaan sekä edellä mainitun kaltainen paaluväli että koko kadun pituus. Esimerkiksi Helsinginkadun ajosuunnassa 1 analyysiin otettiin koko Mannerheimintien ja Sturenkadun välisen katuosuuden lisäksi erillinen havaintoaineisto paaluväliltä 500–570 m (Vauhtitien liittymä, 20–40 % ajoneuvoista joutuu hidastamaan/pysähtymään ja lähtemään liikkeelle/kiihdyttämään) ja 850–915 m (viimeiset kymmenet metrit ennen Sturenkadun liittymää, yli 50 % ajoneuvoista joutuu liikkumaan hyvin hitaasti tai pysähtymään tällä paaluvälillä) tarkoituksena vertailla, kuinka hitaasti liikkuvat ja pysähtelevät ajoneuvot vaikuttavat urautumiseen verrattuna koko katuosuuden keskiarvoon.

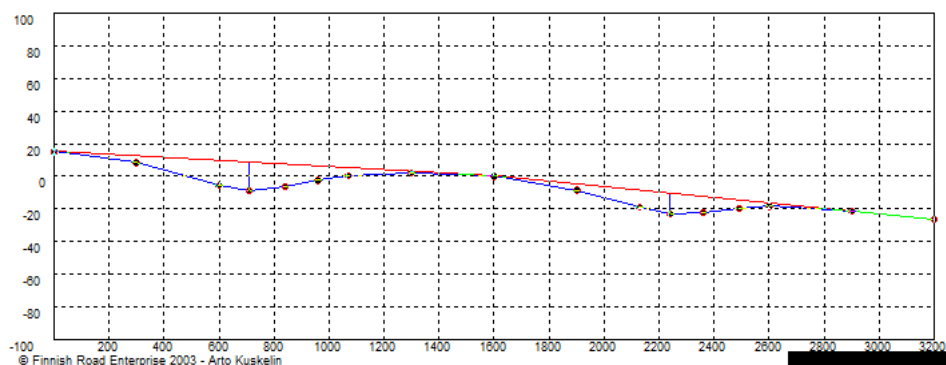
Taulukko 10. Kuntotietoanalyysiin valitut kohteet ja niiden tiedot

Kohde	Nopeusrajoitus (km/h) / Ruuhka keskinopeus / päivä keskinopeus	KVL (ajon/vrk)	Raskas liikenne (%)	Päällyste massa- tyyppi (pääll. vuosi)
Kuusisaarentie suunta 2, paalut 0–250 m	50 / 46 / 48	19500	4,0 (arvio)	SMA18 (2007)
Metsäläntie suunta 2, paalut 600–850 m	60 / 41 / 45	16700	10,8	SMA18 (2006)
Pirkkolantie suunta 1, paalut 250–500 m	50 / 48 (arvio)	8000	11,6	AB22 (2006)
Vauhtitie suunta 2, paalut 100–350 m	50 / 26 / 24	8000	4,0 (arvio)	AB16 (2011)
Veturitie suunta 2, paalut 2600– 2800 m	50 / 31 / 35	22000	3,8	SMA18 (2009)
Helsinginkatu suunta 1, koko katu, lisäksi erilliset mittaukset paalut 500– 570 m ja 850–915 m	50 / 18 / 18	38600	3,1	SMA18 (2009, suunta 1)
Lapinmäentie suunta 1, koko katu, lisäksi erillinen mittaus paalut 600–660 m	40 / 20 / 26	18200	1,5 (arvio)	SMA18 (2005, 2011)
Itäväylä suunta 1, Kulosaaren silta	70 / 61 / 65	56000	3,7	KBVA16 (kalasataman päässä suunta 1 2005, suunta 2 2006, itäpäässä uudempia osuuksia)
Kaupintie suunta 1, Lassilan keskus, paalut 1020–1470 m	30 / 20 (arvio)	12200	5,0 (arvio)	SMA16 (2008)
Lauttasaaren silta suunta 1, kaista 1	50 / 39 / 42	18600	8,5	KBVA16 (osa 2007, osa ei ollenkaan 2005 –10)
Malminkartanontie suunta 1, koko katu	40-50 / 30 (arvio)	10200	4,8	SMA16 (vihdintien puol. päässä 2009, muu ei 2005–10)
Aino Ackten tie suunta 1, koko katu	40 / 27 (arvio)	9500	9,0 (arvio)	SMA16 (ei 2005 –2010)

6.2.4. X-jakopisteohjelma

Destian kehittämä X-jakopisteohjelma esittää PTM-mittaustulokset numeerisesti ja mitatut tien poikkiprofiilit graafisesti. X-jakopisteohjelman esittämää dataa on käytetty arvioitaessa uran muotoa ja pinta-alaa. Kaikki X-jakopisteohjelmalla analysoitavista kohteista kerätyt poikkiprofiilit ovat liitteessä 5.

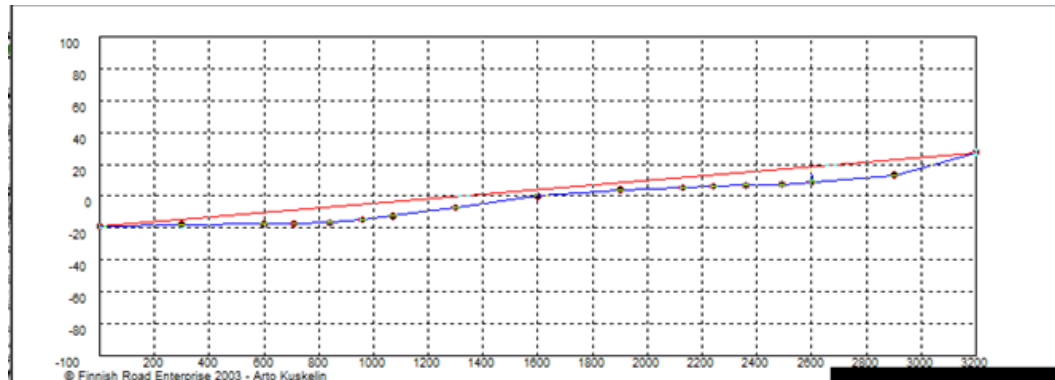
Esimerkiksi kuvassa 27 on Kuusisaarentien poikkiprofiili graafisesti. Kuusisaarentielle ominaisia urautumiseen ja uramuotoon vaikuttavia piirteitä ovat kapeat ajokaistat ja pientareet, tasainen ajonopeus ja keskinkertainen raskaan liikenteen osuus. Kapeat ajokaistat ja pientareet aiheuttavat liikenteen keskittymistä kapeisiin ajouriin, joten ajourat ovat muodoltaan verraten kapeat ja syvät. Vasemman ja oikean ajouran maksimiurasyvyyksien välinen raideleveys on noin 155 cm, mikä on lähempänä henkilö- ja pakettiauton kuin raskaan liikenteen raideleveyttä. Tasaisella nopeudella liikkuvan sekä harvoin hidastelevan ja pysähtelevän liikenteen takia deformaation osuus Kuusisaarentien urista ei ole kuvan mittauspisteessä merkittävä.



Kuva 27. X-jakopisteohjelman esittämä graafinen ajokaistan poikkiprofiili kohteesta Kuusisaarentie, Helsingin kunnanrajalta 300 m Munkkiniemen suuntaan, suunta 2, kaista 1, vuosi 2011.

Kuvassa 28 (s. 74) on Metsäläntien poikkiprofiili graafisesti. Metsäläntielle mittauspisteessä ominaisia urautumiseen ja uramuotoon vaikuttavia piirteitä ovat leveät ajokaistat ja pientareet, tasainen ajonopeus ja korkea raskaan liikenteen osuus. Leveät ajokaistat ja pientareet aiheuttavat liikenteen jakautumista tasaisemmin ajokaistan poikkileikkaukselle, jolloin liikenne ei keskity yhtä paljon kapeisiin ajouriin kuin kapeilla ajokaistoilla. Metsäläntien ajourat ovatkin muodoltaan hyvin matalat, leveät ja loivat. Vasemman ja oikean ajouran maksimiurasyvyyksien välinen raideleveys on noin 170 cm, mikä viittaa siihen, että raskaalla liikenteellä on ollut merkittävämpi osuus urien muodostumiseen kuin Kuusisaarentiellä. Metsäläntien X-jakopiste - poikkiprofiileista oli myös havaittavissa, että siirrettäessä mittauspistettä lähelle ML-

keskuksen tasoliittymää urautuminen on hyvin voimakasta hitaasti liikkuvien ja pysähtyneiden raskaiden ajoneuvojen aiheuttaman deformaation takia.



Kuva 28. X-jakopisteohjelman esittämä graafinen ajokaistan poikkiprofiili kohteesta Metsäläntie, ML-keskuksen liittymästä n. 300 m Hämeenlinnanväylän suuntaan, suunta 2, kaista 1, vuosi 2010.

Urasyyvyys määrittää vilkasliikenteisillä päällystetyillä teillä ja kaduilla suurimman osan päällysteen ylläpitotarpeesta, mutta uran pinta-ala päällystetyn ajoradan reunojen tasoon viritetyn ”langan” alapuolella on tärkeä muuttuja monesta muusta syystä: Nastarenkaiden päällysteen poikkipinta-alasta irrottama materiaali vaikuttaa suoraan katupölyn määrään. Myös kaikkia muita urautumismekanismeja tarkasteltaessa uran leveys ja pinta-ala ovat päällysteen urautumisen voimakkuutta arvioitaessa aivan yhtä relevantteja muuttujia kuin urasyyvyyskin, koska leveän ja matalan ajouran muodostuminen on voinut kuluttaa ja deformoida päällystettä määrällisesti enemmän kuin kapean ja syvän.

Esimerkiksi kuvissa 27 ja 28 Kuusisaarentien maksimiurasyyvyys on noin 18 mm ja Metsäläntien 10 mm. Kuitenkin urien poikkipinta-ala on graafisesti estimoimalla Kuusisaarentiellä noin 155 cm² ja Metsäläntiellä 180 cm², eli Metsäläntien urien pinta-ala on suurempi Kuusisaarentien, vaikka Kuusisaarentien maksimiurasyyvyys on 80 % suurempi kuin Metsäläntien.

Vertailemalla perättäisten vuosien X-jakopiste -poikkiprofiileja samoissa mittauspisteissä on tuloksena saatu urien poikkipinta-alan muutos.

X-jakopisteohjelman esittämät poikkiprofiilit kuntotietoanalyysin mittauskohdeista vuosina 2009–2011 ovat nähtävissä liitteessä 5.

6.3. Selittävien ja selitettävien muuttujien valinta aineistosta

Selitettävät muuttujat PTM-mittausohjelmasta mitatusta datasta:

Maksimiurasyvyyden muutos yhdessä vuodessa

Oikean ajouran urasyvyyden muutos yhdessä vuodessa

Vasemman ajouran urasyvyyden muutos yhdessä vuodessa

Selitettävä muuttuja X-jakopisteohjelmalla esitetystä datasta:

Ajourien poikkipinta-alan muutos yhdessä vuodessa

Selittäviä muuttujia haettiin joukosta:

Mittausvuodet

Mittauksen alku- ja päättymisvuosi, kuinka erot sää- ja kelioloissa eri mittausvuosina ovat vaikuttaneet urautumiseen.

Keskivuorokausiliikenne KVL (ajon/vrk)

Mittausosuuden molempien suuntien keskivuorokausiliikenteen (KVL, ajoneuvoa/vrk) oletettiin vaikuttavan urautumiseen siten, että KVL:n kasvaessa urautuminen lisääntyy.

Ajokaistakohtainen keskivuorokausiliikenne (ajon/vrk)

Mittauskohteessa olevan ajokaistakohtaisen keskivuorokausiliikenteen (KVL, ajoneuvoa/vrk) oletettiin vaikuttavan urautumiseen siten, että KVL:n kasvaessa urautuminen lisääntyy. Jos mittausosuudella on kaksi ajokaistaa samaan ajosuuntaan, on ajosuunnan KVL jaettu ajokaistoittain oikea/vasen 60/40, ellei liittyvän, ryhmittyvän ja kääntyvän liikenteen takia ole syytä olettaa muuta.

Nopeusrajoitus (km/h)

Nopeusrajoituksesta haettiin selitettä ajonopeuden vaikutuksesta urautumiseen.

Tasainen nopeus (dummy-tyyppinen muuttuja 0 tai 1)

Tilastoihin lisättiin yksinkertaistettu dummy-tyyppinen muuttuja ”tasainen nopeus”. Muuttuja saa arvon 1, jos valtaosa KVL:sta kulkee mittauskohteessa tasaisella ajonopeudella ilman pysähdyksiä tai voimakkaita jarrutuksia ja kiihdytyksiä. Muuttuja saa arvon 0, jos ajoneuvon liiketilan muutokset mittauskohteessa ovat yleisiä. Ennakko-

oletuksena muuttujalle on, että tasaisella nopeudella ajettaessa urasyvyyden muutos on vähäisempi kuin ajoneuvon liiketilan muuttuessa.

Liittymän lähellä (dummy-tyyppinen muuttuja 0 tai 1)

Tilastoihin lisättiin yksinkertaistettu dummy-tyyppinen muuttuja ”liittymän lähellä”. Muuttuja saa arvon 1, jos merkittävä liittymä vaikuttaa yli 50 % KVL:sta (ajonopeus, pysähdykset, käännökset, liiketilan muutokset) mittausosuudella tai enintään 100 m etäisyydellä siitä. Muuttuja saa arvon 0, jos edellä mainitut ehdot eivät täyty. Ennakko-oletuksena muuttujalle on, että liittymien lähellä urautuminen on voimakkaampaa kuin kauempana liittymistä.

Suuri pysähtymis-% (dummy-tyyppinen muuttuja 0 tai 1)

Tilastoihin lisättiin yksinkertaistettu dummy-tyyppinen muuttuja ”suuri pysähtymis-%”. Muuttuja saa arvon 1, jos yli 50 % KVL:sta joutuu pysähtymään mittauskohteessa liittymässä olevan väistämisvelvollisuuden tai punaisen liikennevalo-opastimen takia. Muuttuja saa arvon 0, jos edellä mainitut ehdot eivät täyty. Ennakko-oletuksena muuttujalle on, että suuri pysähtyvien ajoneuvojen osuus lisää urautumista.

Keskinopeus ruuhka (km/h)

Hellmanin (2009) tutkimusraportista kelluvan auton menetelmällä kerätyt liikennevirran keskinopeudet (km/h) mittauskohteissa ruuhka-aikoina (ma-pe klo 6:30–9 ja 15–18). Jos mittauskohteesta ei ole ollut saatavilla Hellmanin keräämää dataa, on keskinopeus arvioitu käyttäen apuna nopeusrajoitukseltaan ja liikenneoloiltaan vastaavan tyyppisiä yhteysvälejä Hellmanin raportissa. Muuttujaa on käytetty selittämään ajonopeuden vaikutusta päällysteen urautumiseen.

Keskinopeus päivä (km/h)

Hellmanin (2009) tutkimusraportista kelluvan auton menetelmällä kerätyt liikennevirran keskinopeudet (km/h) mittauskohteissa arkipäiväliikenteessä ruuhka-aikojen ulkopuolella (ma-pe klo 9-15). Jos mittauskohteesta ei ole ollut saatavilla Hellmanin keräämää dataa, on keskinopeus arvioitu käyttäen apuna nopeusrajoitukseltaan ja liikenneolosuhteiltaan vastaavan tyyppisiä yhteysvälejä Hellmanin raportissa. Muuttujaa käytetty selittämään ajonopeuden vaikutusta päällysteen urautumiseen.

Raskas liikenne -%

Hellmanin & Lillebergin (2011) julkaisusta kerätyt raskaan liikenteen (kuorma-autot, ajoneuvoyhdistelmät, linja-autot) osuudet (%) KVL:sta mittauskohteissa. Jos mittauskohteesta ei ole ollut saatavilla Hellmanin & Lillebergin keräämää dataa, on raskaan liikenteen osuus arvioitu käyttäen apuna toiminnalliselta luokitukseltaan, joukkoliikenneolosuhteiltaan ja lähiseutujen elinkeinorakenteeltaan vastaavan tyyppisiä yhteysvälejä Hellmanin & Lillebergin raportissa. Muuttujaa on käytetty selittämään

raskaan liikenteen osuuden vaikutusta päällysteen urautumiseen, mikä on olennainen tekijä arvioitaessa deformaation ja nastarengaskulumisen osuuksia urautumisesta.

Kaistojen lukumäärä / ajosuunta

Ajokaistojen lukumäärää ajosuuntaa kohti on käytetty malleissa, jotta selviäisi, onko sillä suoranaista yhteyttä urasyvyyden muutokseen.

Kaistan leveys (cm)

Ajokaistan leveyttä ajoratamaalausten välissä on käytetty arvioitaessa liikenteen keskittymistä ajoradan poikkileikkaukselle ja sen yhteyttä urasyvyyden kasvuun. Mm. Zubeck et al. (2004) ja Kurki (1998) ovat esittäneet, että liikenteen keskittyminen kapealle ajokaistalle samoihin ajouriin lisää urasyvyyden kasvua.

Päällysteen massatyypit

Mittauskohteissa käytetyn päällysteen massatyypit asetettiin tilastoihin numeeriseksi muuttujaksi: Kumibitumi-valuasfaltti (KBVA) = 1. Kivimastikiasfaltti (SMA) = 2. Asfalttibetoni (AB) = 3. Numerojärjestys on tämä, koska ennakko-oletuksena muiden liikenteellisten ja päällysteen rakenteen ominaisuuksien pysyessä vakiona KBVA:n urasyvyyden tulisi kasvaa näistä massatyypeistä vähiten ja AB:n eniten.

Max raekoko (mm)

Päällystemassan maksimiraekoon (mm) vaikutus päällysteen urasyvyyden muutokseen. Päällysteen kulutus- ja deformaatiokestävyyden tulisi kasvaa maksimiraekoon kasvaessa.

Bitumi

Mittauskohteissa käytetyn bitumin jäykkyydenluokitusta on käytetty selittävänä muuttujana, koska bitumin jäykkyydellä tulisi olla yhteys päällysteen deformaatiokestävyyteen.

Ura vasen alku, ura vasen loppu, ura oikea alku, ura oikea loppu, ura max alku, ura max loppu (mm)

Vasemman, oikean ja maksimiuran urasyvyys mittausjakson alussa tai lopussa voi selittää, onko liikenteen keskittyminen jo olemassa oleviin ajouriin vaikuttanut urautumiseen. Lisäksi näitä muuttujia on tarvittu suoraan määritettäessä urasyvyyden muutosta.

6.4. Lineaarinen regressioanalyysi kuntotiedosta

Regressioanalyysin (*regression analysis*) avulla tutkitaan yhden tai useamman selittävän muuttujan vaikutusta selitettävään muuttujaan. Sen avulla voidaan pyrkiä vastaamaan esimerkiksi siihen, vaikuttaako koulutuksen pituus saadun palkan suuruuteen ja jos vaikuttaa, niin kuinka voimakas tämä vaikutus on. Regressioanalyysin erityinen etu on, että siinä voidaan tutkia yhtä aikaa monen selittävän muuttujan vaikutusta selitettävään muuttujaan. Tällöin tulokset kertovat, mikä on yksittäisen selittävän muuttujan osuus silloin kun muiden vaikuttavien tekijöiden vaikutus selitettävään muuttujaan on otettu huomioon. Lineaarinen regressioanalyysi (*linear regression analysis*) on analyysi, jossa jatkuvien muuttujien välille etsitään lineaarinen yhteys. (Chatterjee et al. 2000)

Tässä tutkimuksessa kehitettiin yhden ja useamman muuttujan lineaarisia regressiomalleja Statistix-tilasto-ohjelmistolla.

Tärkeimpiä lineaarisen regressioanalyysin tunnuslukuja ovat: (Chatterjee et al. 2000)

Otoskoko	n	(mallissa analysoitujen havaintojen lukumäärä)
Vakiotermi	C	
Regressiokertoimet	a, b, ...	(kuinka selittävän muuttujan muutos vaikuttaa selitettävään muuttujaan)
Keskihajonta	σ	(regressiokertoimen keskihajonta)
Virhefunktio	ε	
Selitysaste	R^2	(kuinka suuren osan selitettävän muuttujan vaihtelusta selittävät muuttujat selittävät. Esim. $R^2 = 0,839$ => malli selittää 83,9 % selitettävän muuttujan vaihtelusta)
testisuure t	t	(suuri t:n arvo tarkoittaa, että selittävä muuttuja on tilastollisesti merkittävä)
p-arvo	p	(p-arvo ilmaisee millä todennäköisyydellä kertoimen poikkeama nolasta on sattuman aiheuttama. P:n arvolla $>0,05$ selittävä muuttuja on hylättävä, ellei muuttujaa ole erityisestä empiiriseen tietoon perustuvasta syystä pidettävä merkittävänä.)

Kuntotietoanalyysissa rakennettiin ja testattiin erilaisia lineaarisia regressiomalleja. Tavoitteena oli kehittää malli, joka selittäisi mahdollisimman suuren osan päällysteen urasyvyyden ja urien pinta-alan muutoksesta. Samassa yhteydessä tuli arvioida, kuinka voimakas tilastollinen yhteys eri selittäville muuttujilla on urautumiseen, ja voidaanko analyysin perusteella vahvistaa tai hylätä kirjallisuustutkimuksessa esitettyjä teorioita esimerkiksi ajonopeuden vaikutuksesta urautumiseen. Lineaariset regressiomallit ovat liitteessä 6 ja mallinnuksessa käytetty numeerinen katukuntotieto liitteessä 7.

7. Urasyyvyysmittaukset laserprofilometrillä Helsingissä 2011–12

7.1. Urasyyvyysmittausten tavoitteet

Tässä tutkimuksessa tehtiin syksyllä 2011 ja keväällä 2012 empiiriset urasyyvyysmittaukset laserprofilometrillä, jotta saataisiin vastaus seuraaviin tutkimuksen aikana tarkentuneisiin tutkimuskysymyksiin:

- Kuinka paljon päällysteiden havaitaan kuluneen talvirengaskaudella nopeusrajoituksen ollessa enintään 60 km/h, kun liikennemäärä, liikenteen jakauma ajoneuvotyypeittäin, ajonopeus ja päällystetyyppi tunnetaan
- Miten ajonopeus ja muut selittävät muuttujat selittävät urasyyvyysmittauksissa havaittua kulumista?
- Kuinka paljon nopeammin päällysteet urautuvat talvirengaskaudella muihin vuodenaikoihin verrattuna, ja mikä on talvirengaskauden kulumisen osuus koko vuoden urautumisesta?
- Kuinka paljon päällysteestä irtoaa materiaalia tienpinnasta empiirisesti mitattujen urien pinta-alamuutosten perusteella?
- Voidaanko nastarengaskulumista arvioida luotettavasti PTM-mittauksilla?

7.2. Mittausten toteutus ja mittausolot

7.2.1. Mittausaikojen ja -paikkojen valintaperusteet

Nastarenkaiden aiheuttaman päällysteiden kulumisen erottamiseksi muusta urautumisesta mittaukset täytyi tehdä valituista mittauskohteista ja -pisteistä vähintään kaksi kertaa: Ensimmäinen kerta syksyllä ennen nastarenkaiden käyttöaikaa ja toinen kerta keväällä nastarenkaiden käyttöajan jälkeen. Näiden mittaustulosten erotuksena saadaan urasyyvyden ja urien pinta-alan muutos mittauskohteissa.

Mittauksia ei kannattanut tehdä niin varhain syksyllä ja myöhään keväällä, että päällysteet olisivat voineet deformatua huomattavasti korkean lämpötilan vaikutuksesta. Laserprofilometrillä tehtävät mittaukset asettivat vaatimuksia myös mittausajankohdan sääolosuhteille, koska esimerkiksi märkää päällystettä ei voinut mitata sen lasersäteelle aiheuttamien mittaustulosta vääristävien heijastumien takia, ja myös pakkasen pelättiin aiheuttavan toimintahäiriöitä pienen sähkömoottorin ja kumikitkan varassa toimivalle mittauspäästä palkilla liikuttavalle mekanismille (kuva 29 sivulla 83, profilometrin tekniset tiedot liitteessä 13).

Neljä metriä pitkän laserprofilometrin asettaminen poikittain päällystetylle ajoradalle aiheuttaa merkittävää haittaa liikenteelle. Päällystetyn ajoradan, pientareen ja

ajokaistojen leveyksien mukaan vähintään yksi ajokaista, kapeilla kaduilla koko ajorata, on suljettava liikenteeltä mittauksen ajaksi. Koska urasyvyysmittauskohteiden joukossa oli myös hyvin vilkasliikenteisiä kaksikaistaisia katuja (KVL max 22000 ajon/vrk), ei mittauksia voitu missään tapauksessa tehdä ainakaan ruuhka-aikoina. Mittaukset päätettiin tehdä yöllä klo 22:00–06:00 välisenä aikana, koska tällöin mittausten liikenteelle aiheuttama haitta oli vähäisin.

Urasyyvyysmittauksiin valittujen mittauskohteiden tuli sisältää heterogeeninen otos liikennemääriä, nopeusrajoituksia, liikenteen todellisia keskinopeuksia ja päällysteen massatyyppejä. Myös eri variaatioita hyvin hitaasti liikkuvien, hidastavien, pysähtyvien, liikkeelle lähtevien ja kiihdyttävien ajoneuvojen osuuksista mittauspisteissä haluttiin sisällyttää mittauksiin. Urasyyvyysmittauksissa urautumiselle haetuista selittävästä muuttujista on kirjoitettu tarkemmin kappaleessa 7.2.3. Mittauskohteet kaduittain, ajosuunnittain ja paaluväleittäin on esitetty taulukossa 11 ja kartalla liitteessä 12. Muiden pystysarakkeiden tiedot ovat vastaavia kuin taulukossa 10 sivulla 72, ja yksityiskohtaisempi kuvaus pystysarakkeiden tiedoista ja lähteistä on kappaleessa 6.2.3. sivulla 71.

Taulukko 11. Urasyyvyysmittauksiin valitut kohteet ja niiden tiedot.

Kohde	Nopeusrajoitus (km/h) / Ruuhka keskinopeus / päivä keskinopeus	KVL (ajon/vrk)	Raskas liikenne (%)	Päällyste massatyyppi (pääll. vuosi)
Kuusisaarentie suunta 2, Helsingin rajalta paalut 0–250 m	50 / 46 / 48	19500	4 (arvio)	SMA18 (2007)
Meilahdentie , suunta 2	30 / 30 (arvio)	6500	1 (arvio)	AB16 (ennen 2005)
Metsäläntie suunta 2, ML-keskukselta paalut 600–850 m	60 / 41 / 45	16700	10,8	SMA18 (2006)
Pirkkolantie suunta 1, paalut 250–500 m	50 / 48 (arvio)	8000	11,6	AB22 (2006)
Vauhtitie suunta 2, 100–350 m	50 / 26 / 24	8000	4 (arvio)	AB16 (2011)
Veturitie suunta 2, paalut 2600– 2800 m	50 / 31 / 35	22000	3,8	SMA18 (2009)
Töölönkatu , suunta 2	30 / 18 / 21	6000	2 (arvio)	AB16 (ennen 2005)

Valittujen mittauskohteiden ominaisuuksien odotettiin tarkentavan tulosten analysointia seuraavasti:

Kuusisaarentie on hyvin vilkasliikenteinen katu, jossa liikenne sujuu mittauskohteen paaluvälillä yleensä tasaisella lähes nopeusrajoituksen mukaisella nopeudella. Kuusisaarentien ajokaistojen poikkileikkaukset ovat kapeita, minkä takia Kuusisaarentielle muodostuu kapeat ja syvät urat. Kuusisaarentien odotettiin edustavan mittauskohdetta, jossa nastarenkaiden aiheuttama urasyvyyden muutos yhdessä talvessa on huomattavan suuri.

Meilahdentie on vähäliikenteisempi AB-päällysteinen katu, jolla raskaan liikenteen osuus on vähäinen. Meilahdentien nopeusrajoitus on 30 km/h, joten se edustaa hyvin kulumista alhaisissa nopeuksissa. Meilahdentiellä on runsaasti hidastetöyssyjä ja suojateitä, minkä takia suuri osa Meilahdentietä ajavista kuljettajista jarruttaa ja kiihdyttää mittauskohteissa.

Metsäläntie on hyvin vilkasliikenteinen katu, jonka nopeusrajoitus on 60 km/h. Metsäläntiellä liikkuu hyvin paljon raskasta liikennettä ja erityisesti ajoneuvoyhdistelmiä, minkä takia deformaation arvioitiin aiheuttavan huomattavan osan Metsäläntien vuosittaisesta kokonaisurautumisesta Metsäläntien ajokaistat ovat leveät, jolloin ajourat eivät keskity kapealle alueelle. Metsäläntien liikenteestä oli saatavilla hyvin yksityiskohtaisia tietoja Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluviraston tutkimuksista (Hellman 2009, Hellman & Lilleberg 2011).

Pirkkolantie on vähäliikenteisempi AB-päällysteinen katu. Pirkkolantiellä ajaa huomattava määrä paikallisen poikittaisliikenteen busseja, minkä takia raskaan liikenteen osuus on korkea. Ajonopeudet Pirkkolantiellä mittauskohteessa ovat tasaisia ja lähellä nopeusrajoitusta. Pirkkolantien AB-päällysteen maksimiraekoko on harvinainen 22 mm. Pirkkolantien mittaustuloksista odotettiin vastausta sille, kuinka hyvin suurirakeinen AB-päällyste kestää kulumista, ja onko myös tasaisella nopeudella liikkuvan bussiliikenteen vaikutus deformaatioon merkittävä.

Vauhtitie on vähäliikenteisempi AB-päällysteinen katu, jonka nopeusrajoitus on 50 km/h, mutta liikenteen sujuvuusmittauksissa mitatut todelliset keskinopeudet huomattavasti tätä alhaisempia (Hellman 2009). Raskaan liikenteen osuus Vauhtitiellä on vähäinen. Vauhtitien mittaustuloksista odotettiin tietoja AB-päällysteen kulutuskestävyydestä tasaisella hyvin alhaisella nopeudella.

Veturitie on mittauskohteista kaikkein vilkasliikenteisin katu, jonka liikenteestä oli saatavilla hyvin yksityiskohtaisia tietoja Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluviraston tutkimuksista (Hellman 2009, Hellman & Lilleberg 2011). Veturitien mittaustuloksista haettiin lisää havaintoja SMA18 -päällysteen kulutuskestävyydelle hyvin vilkasliikenteisillä kaduilla. Veturitien mittauskohteessa oli myös

kaarre ja lähestyvä valo-ohjattu liittymä, mistä odotettiin tietoja ajoneuvon liiketilan lievien muutosten vaikutukselle kulumiseen.

Töölönkatu on vähäliikenteisempi AB-päällysteinen katu, jonka nopeusrajoitus on 30 km/h ja todelliset keskinopeudet huomattavasti tätä alhaisempia. Töölönkadun mittaustuloksista odotettiin lisätietoja sekä erittäin alhaisissa nopeuksissa kulumiselle että ajoneuvojen liiketilan muutosten vaikutuksille kulumiseen.

7.2.2. Mittausten tekeminen

Mittaukset tehtiin kuvan 29 mukaisella profilometrillä. Aalto-yliopiston siirrettävä laserprofilometri on mittalaite, jonka muodostavat noin neljä metriä pitkä palkki sekä palkin varassa sähkömoottorin liikuttamaan kelkkaan asennettu laserlaitteisto. Tuloksena saadaan pinnan profiili, joka myös tulostuu laitetta ohjaavan PC:n näytölle. Laserprofilometri soveltuu hyvin tarkkaan tien poikkileikkauksen urasyvyysmittaukseen, kun profilometrin molemmat päät saadaan tasaiselle alustalle, eikä mittausvälillä ole reunakiviä tai muita korokkeita. Laserprofilometrin tekniset tiedot ovat liitteessä 13.

Mitattavia suureita olivat kappaleissa 3.1.1. ja 6.2.4. käsitellyin tunnusluvuin vasemman ja oikean uran urasyvyys (mm) sekä lankamallin mukaisen kadun pintaan viritetyn kuvitteellisen langan alle jäävä pinta-ala.



Kuva 29. Aalto-yliopiston Tielaboratorion siirrettävä laserprofilometri (<http://civil.tkk.fi/fi/tutkimus/tietekniikka/tutkimus/tutkimuslaitteet/>)

Syksyn 2011 urasyvyysmittaukset tehtiin 5.10.2011 klo 22:00 – 6.10.2011 klo 03:30.

Mittausten aikaan oli puolipilvinen poutasää, päällyste kuiva ja lämpötila +5 ... +8 °C .

Kevään 2012 urasyvyysmittaukset tehtiin 19.4.2012 klo 22:00 – 20.4.2012 klo 03:00.

Mittausten aikaan oli pilvinen poutasää, päällyste kuiva ja lämpötila +2 ...+4 °C .

Kuusisaarentieltä, Meilahdentieltä ja Metsäläntieltä mitattiin viisi poikkiprofiilia, lopuista mittauskohteista neljä. Kahden profiilin välinen etäisyys mittauskohteissa oli 15–40 m. Syksyn urasyvyysmittauksissa laserprofilometrin jalkojen kohdat merkittiin asfalttiin maalilla ja nauloilla, koska laserprofilometri tuli asettaa kevään mittauksissa

mahdollisimman tarkasti samoihin kohtiin, jotta urautuminen pystyttiin määrittämään ilman mittauslaitteen sijainnista johtuvia virheitä.

Molemmissa mittauksissa laserprofilometristä tulostui laitetta ohjanneen tietokoneen näytölle odotetun ja virheettömän näköisiä profiileja, jotka ovat kokonaisuudessaan nähtävissä liitteessä 9. Ainoastaan Pirkkolantien mittauskohteessa syksyllä mitatun profiilin 4 kuvaajassa oli selvä mittausvirhettä osoittava piikki, joka on voinut johtua esimerkiksi lasersäteen virheellisestä heijastumisesta tai ajoradalla olleista epäpuhtauksista.

Syksyn mittauksissa asfalttiin tehdyt merkinnät olivat keväällä kuluneita ja heikosti erottuvia. Kaikista syksyllä mitatuista profiileista löytyi asfaltista vähintään laserprofilometrin toisen pään merkintä, mutta laitteen jalan ympärille syksyllä tehty maalaus oli kulunut kokonaan pois useissa mittauskohteissa. Tästä syystä laserprofilometriä ei voitu asettaa kaikissa profiileissa keväällä millimetrin tarkkuudella samaan paikkaan kuin syksyllä, vaan osassa kevään mittauksista laserprofilometri saattoi olla siirtynyt syksyn mittauksiin verrattuna enintään 10-20 mm ajoradan pituus- ja poikkisuunnassa. Lisäksi kevään mittauksissa varsinkin ajokaistojen oikeat reunat ja pientareet olivat paikoin paksun hiekoitushiekkakerroksen peitossa, mikä vaikutti osassa kevään mittauksista mittalaitteen mittausalueen ajosuunnassa oikean pään mittautuloksen pinnanmuotoon. Näiden tekijöiden vaikutusta tulosten luotettavuuteen pyrittiin vähentämään tarkastamalla profiilit yksitellen manuaalisesti, mistä on kirjoitettu liitteeseen 9 myös huomioita profiilikuvien alle.

7.2.3. Selitettävien ja selittävien muuttujien analysointi

Myös urasyvyysmittauksista tehtiin kuntotietanalyysin kaltainen lineaarinen regressioanalyysi (kappale 6.4.).

Selitettävänä muuttujana urasyvyysmittausten analysoinnissa käytettiin ensisijaisesti urien pinta-alamuutosta, koska kuntotietanalyysin ja kappaleessa 5.5.2. esitettyjen suomalaisten urautumismallien perusteella urien pinta-alamuutos kuvaisi kvantitatiivista urautumista ja kadun pinnasta irronneen kivi- ja sideaineen määrää relevantimmin kuin katujen ylläpitotarpeen kriteerinä yleisesti käytetty urasyvyys. Toisaalta X-jakopisteohjelmalla tehtyjen graafisten poikkiprofiilien (kappale 6.2.4.) mittautarkkuus ei mahdollistanut urien pinta-alamuutosten tarkkaa kvantitatiivista arviointia, minkä takia empiiristen lisätutkimusten kohdentaminen pinta-alamuutokseen oli perusteltua.

Muutamia tilastollisia malleja tehtiin myös selittämään vasemman tai oikean ajouran urasyvyyden muutoksia. Näiden tarkoituksena oli verrata urasyvyysmuutoksen käyttäytymistä selittävänä muuttujana urien pinta-alamuutokseen laserprofilometrin mittautulosten perusteella ja nastarengaskauden urasyvyyden muutosta selittävänä muuttujana verrattuna PTM-mitattuihin vuosittaisiin urasyvyysmuutoksiin.

Selittävät muuttujat valittiin käyttäen taustana kuntotieteanalyysiin valittuja kappaleessa 6.3. esiteltyjä selittäviä muuttujia. Kuntotieteanalyysissä heikosti selittäviksi havaittuja tai pelkkää nastarengaskulumista määritettäessä irrelevantteja muuttujia poistettiin, ja osaan muuttujista tehtiin yksinkertaistuksia ja päivityksiä. Jäljelle laserprofilometrin mittaustulosten tilastolliseen analyysiin jäivät seuraavat selittävät muuttujat:

Nopeusrajoitus (km/h), **KVL** (ajon/vrk), **urasyvyys vasen ura** mittaussjakson alussa (mm) ja **urasyvyys oikea ura** mittaussjakson alussa (mm) oletettiin toimiviksi nastarengaskulumisen osalta kuten kappaleessa 6.3. oli esitetty.

Massatyypistä, maksimiraekoosta ja ajoneuvon liiketilan muutoksesta tehtiin kuntotieteanalyysiin verrattuna selittävät muuttujat uusin parametrein:

Massatyypille ei valittu enää kulumisen oletetun järjestysluvun mukaista kokonaislukukerointa, vaan massatyypin suhteellinen kulumiskerroin saatiin käyttämällä Kurjen (1998) mukaan massatyypin kulumisen suhteena $SMA = 1,0$; $AB = 1,1$. Tämä käytetty suhdeluku on varovainen, ja esimerkiksi Tiehallinto (40/2005) esittää suhdeluvuksi $AB16$ –päällysteellä 1,46 vs. kaikilla SMA -päällysteillä 1,08, kun tyypillisen kuulamylllyarvon vaikutus on otettu huomioon.

Maksimiraekoolle (mm) ei valittu enää absoluuttista millimetrilukemaa, vaan Kurjen (1998) mukaan iteroiden $16\text{ mm} = 1,04$; $18\text{ mm} = 1,00$; $22\text{ mm} = 0,95$. Tiehallinnon (40/2005) tarkasteluissa myös maksimiraekoon vaikutukselle on esitetty suurempia painokertoimia, kun tyypillinen kuulamylllyarvo on huomioitu.

Keskinopeus määritettiin Hellmanin (2009) tutkimusten perusteella ainoastaan yhtenä koko vuorokautta koskevana keskinopeutena, koska ruuhka-ajan ja keskipäivän liikenteen keskinopeuksien ero selittävänä muuttujana oli kuntotieteanalyysissä häviävän pieni. Jos yksittäisten profiilien kohdalla mittaushetkeillä oli perusteltua syytä olettaa olevan poikkeavia keskinopeuksia, kuten hidastetöyssyjen, suojateiden tai valo-ohjattujen liittymien lähellä, voitiin yksittäisille profiileille asettaa mallissa korkeampia tai alhaisempia keskinopeuksia kuin mittaushetkellä keskimäärin.

Ajoneuvon liiketilan muutoksille ei valittu enää dummy-tyypistä muuttujaa (0 tai 1), vaan muuttuja sai arvoja 1-2 seuraavasti: Ajoneuvot ylittävät profiilin yleensä tasaisella nopeudella = 1,0. Kaarreajo tai rauhallinen ennakkoiva hidastus tai kiihdytys on tyypillistä profiilin ylityksille = 1,1. Suuri osa profiilin ylittävistä ajoneuvoista hidastaa tai kiihdyttää voimakkaasti = 1,5. Yli 50 % profiilin ylittävistä ajoneuvoista pysähtyy ja lähtee liikkeelle, tai niiden liiketila muuttuu muulla tavoin voimakkaasti = 2,0.

Urasyvyysmittaustulosten tilastollisessa analyysissä käytetty numeerinen data on kokonaisuudessaan liitteessä 10, ja Statistix –tilasto-ohjelmistolla tehdyt lineaariset regressiomallit liitteessä 11.

7.2.4. Nastarenkaiden käyttö ja talvisää Helsingissä talvella 2011–12

Prittinen (2011) selvitti kandidaatintyössään empiirisin kvantitatiivisin aineistonkeruumenetelmin, kuinka suuri osa Helsingin kantakaupungissa pysäköidyistä henkilö- ja pakettiautoista käyttää nastarenkaita. Tutkimuksen mukaan Helsingin kantakaupungissa helmikuussa 2011 oli henkilöautoissa nastarenkaita 76 % ja kitkarenkaita 24 %. Pakettiautoissa vastaavat osuudet ovat 80,3 % ja 19,7 %. Kitkarenkaiden käyttö on Helsingissä yleisempää kuin Suomessa keskimäärin. Malmivuo et al. (2010) mukaan koko Suomessa henkilöautoissa nastattomien talvirenkaiden osuus oli pysynyt jokseenkin samana vuodesta 2001 vuoteen 2010 (11,8 → 12,3 %), mutta pakettiautoissa nastattomien renkaiden osuus oli vähentynyt (6,2 % → 3,1 %). Valtakunnallisten nastaja kitkarenkaiden käytön kehityksen perusteella voidaan olettaa, että keskimääräinen nastarenkaita käyttävien henkilö- ja pakettiautojen osuus vuosina 2005–2012 olisi ollut Helsingissä keskellä talvea ja talvirengaspakon ollessa voimassa lähes vastaava kuin Prittisen tutkimuksessa.

Syksyllä ja keväällä, kun talvirengaspakko ei ole voimassa ja ollaan lähellä nastarenkaiden sallitun käyttöajan rajoja, osa nastarenkaita talvirenkainaan käyttävistä autoilijoista ajaa kesärenkailla ja osa talvirenkailla. Renkaiden kausivaihdon ajankohtaan vaikuttavat etenkin sää- ja keliolot, nastarenkaiden käyttöä koskevat määräykset sekä autoilijoiden liikkumistarpeet ja asenteet. Tarkkaa tilastoa esimerkiksi siitä, kuinka suuri osa nastarenkaita talvella käyttävistä Helsingissä ajavista autoilijoista oli vaihtanut talvirenkaat marraskuun 2011 alkuun mennessä, ei ollut saatavilla.

Syksyn 2011 urasyvyysmittaukset tehtiin niin hyvissä ajoin ennen talviolosuhteiden alkua (5.–6.10.2011), että vain erittäin pienen osan (< 1 %) autoilijoista voidaan arvioida käyttäneen nastarenkaita Helsingissä syksyllä ennen mittausajankohtaa. Kevään 2012 urasyvyysmittaukset tehtiin puolestaan 19.–20.4.2012 eli kolme vuorokautta sen jälkeen, kun nastarenkaat olisi viimeistään pitänyt vaihtaa pois 2. pääsiäispäivän jälkeisenä maanantaina 16.4.2012.

Vuoden 2011 loppu oli Helsingissä lauha (Ilmatieteen laitos 12/2011), eikä liikenteessä esiintynyt säännöllisiä ja pitkäaikaisia talvioloja ennen vuodenvaihdetta. Terminen talvi Helsingin Kaisaniemessä alkoi Ilmatieteen laitoksen mukaan vasta 6.1.2012. Tämä aiheutti toisaalta sen, että useat autoilijat viivyttivät nastarenkaiden vaihtoa lähelle talvirengaspakon alkua 1.12. Syksyn 2011 urasyvyysmittausten jälkeen lokamarraskuussa 2011 nastarenkaita Helsingissä käyttäneiden henkilö- ja pakettiautojen osuus oli näin alhaisempi kuin Prittisen (2011) tutkimuksessa, jonka tulosten mukaisesti nastarenkaiden käytön oletetaan kasvaneen vasta joulukuussa 2011. Toisaalta nastarenkaiden vaikutus päällysteiden kulumiseen yhteisvaikutuksessa ilmastollisten tekijöiden kanssa oli erityisen voimakasta marras–joulukuussa 2011, kun tiet ja kadut olivat jatkuvasti paljaita ja suureksi osaksi märkiä.

Tammikuun 2012 keskilämpötila Helsingin Kaisaniemessä oli $-3,4^{\circ}\text{C}$ (keskiarvo 1981-2010 $-3,9^{\circ}\text{C}$) ja helmikuun $-6,8^{\circ}\text{C}$ (keskiarvo 1981-2010 $-4,7^{\circ}\text{C}$). Tammikuun 2012 alku oli selvästi keskimääräistä leudompi ja loppu hieman keskimääräistä kylmempi. Helmikuun 2012 alku oli selvästi keskimääräistä kylmempi, ja kuun lopun lämpötilat olivat lähellä ajankohdan pitkäaikaisia keskiarvoja. (Ilmatieteen laitos 1/2012 ja 2/2012) Lämpötila ilmastollisena tekijänä ei vaikuttanut nastarengaskulumiseen poikkeuksellisesti tammi-helmikuussa 2012. Lukuun ottamatta helmikuun alun kovien pakkasten jaksoa, jolloin ajouriltaan paljaat vilkasliikenteiset kadut altistuivat kulumiselle bitumin haurastuttua pakkasen vaikutuksesta, olivat alkuvuoden lämpötilat nastarengaskulumisen näkökulmasta arvioiden keskimääräiset.

Tammi- ja helmikuu 2012 olivat Helsingissä poikkeuksellisen sateisia ja runsaslumisia. Säännöllinen ja runsas lumisade kompensoi keskitalvella pakkasen vaikutusta päällysteiden kulumiseen, koska vilkasliikenteisetkin kadut pysyivät huomattavan pitkiä aikoja lumi- ja jääpolanteisina siten, etteivät nastat iskeneet suoraan paljaaseen asfalttiin.

Maaliskuu 2012 oli Helsingin Kaisaniemessä selvästi keskimääräistä leudompi (keskilämpötila $0,8^{\circ}\text{C}$ vrt. keskiarvo 1981-2012 $-1,3^{\circ}\text{C}$). Terminen kevät alkoi Helsingissä jo 10.3.2012. (Ilmatieteen laitos 3/2012) Tämä aiheutti sen, että katujen ajokaistat alkoivat olla varsinkin päivisin sulia jo ennen maaliskuun puoliväliä, minkä jälkeen nastarenkaita käytettiin yleisesti vielä toista kuukautta. Paljaat sekä sateista, suolauksesta ja sulamisvesistä märät päällysteet altistuivat maaliskuussa nastarengaskulumiselle huomattavasti keskimääräistä enemmän.

Koska huhtikuun 2012 alkupuolella oli vielä esiintynyt talvisia ajo-oloja eteläisintä Suomea myöten (Ilmatieteen laitos 4/2012), ja poliisikin tiedotti autoilijoita olemaan kiirehtimättä kesärenkaiden vaihtoon, ei läheskään kaikkia Helsingissä liikkuneita nastarenkaita ollut vaihdettu pois kevään urasyvyysmittauksiin mennessä. Voidaan arvioida, että vähintään kolmannes nastarenkaita Helsingissä käyttäneistä autoista, eli hieman yli neljännes kaikista Helsingissä liikkuneista henkilö- ja pakettiautoista käytti nastarenkaita vielä kevään urasyvyysmittausten aikaan. Huhtikuun alun 2012 takatalven vuoksi kesärenkaiden vaihtosesonki alkoi Helsingissä vasta pääsiäisen jälkeen 10.4.2012, joten enemmistö ennen urasyvyysmittauksia nastarenkaista kesärenkaisiin vaihtaneista autoilijoista oli ehtinyt ajaa kesärenkailla enintään alle kaksi viikkoa. Kokonaisuutena talven 2011–12 nastarenkaiden käyttösuuksia suhteessa renkaiden kausivaihdon ajankohtiin ja ilmastollisten tekijöiden kvalitatiivista vaikutusta lyhemmissä jaksoissa on arvioitu taulukossa 12 (s. 88).

Taulukko 12. Arvioitu nastarenkaita käyttäneiden henkilö- ja pakettiautojen osuus ja ilmastollisten tekijöiden vaikutus kulumiseen talvella 2011–12 Helsingissä, talvi pilkottuna useampaan enintään kalenterikuukauden mittaiseen jaksoon.

Ajanjakso	Nastarengas-%	Ilmastollisten tekijöiden vaikutus kulumiseen
6.10.–15.10.2011	5	Tienpinnat paljaat, kuluminen voimakasta
15.10.–31.10.2011	25	Tienpinnat paljaat, kuluminen voimakasta
1.11.–15.11.2011	45	Tienpinnat paljaat, kuluminen voimakasta
16.11.–30.11.2011	60	Tienpinnat paljaat, kuluminen voimakasta
1.12.–31.12.2011	76	Tienpinnat paljaat, kuluminen voimakasta
1.1.–15.1.2012	76	Tienpinnat lumiset ja jäiset, heikkoa pakkasta, kuluminen vähäistä
16.1.–31.1.2012	76	Tienpinnat lumiset ja jäiset, keskimääräistä pakkasta, kuluminen vähäistä
1.2.–15.2.2012	76	Tienpinnat lumiset ja jäiset, kireää pakkasta, kuluminen keskimääräistä
16.2.–29.2.2012	76	Tienpinnat lumiset ja jäiset, heikkoa pakkasta, kuluminen vähäistä
1.3.–15.3.2012	70	Tienpinnat osin lumiset ja jäiset, heikkoa pakkasta, kuluminen keskimääräistä
15.3.–31.3.2012	65	Tienpinnat paljaat, kuluminen voimakasta
1.4.–10.4.2012	55	Tienpinnat paljaat, kuluminen voimakasta
10.4.–19.4.2012	37	Tienpinnat paljaat, kuluminen voimakasta

Taulukossa 13 (s. 89) on arvioitu nastarenkaita käyttävien ajoneuvojen yliajokertojen lukumäärä mittauskohteittain syksyn 2011 ja kevään 2012 mittausten välissä. Arviot ovat tehty seuraavin perustein:

- Kaikkien ajoneuvojen yliajokerrat vuorokaudessa = KVL / 2 (ei syytä olettaa muita painokertoimia mittauskohteissa ajosuunnittain, ja kaikissa mittauskohteissa vain yksi ajokaista ajosuuntaa kohti).

- Nastarenkaita käyttävien ajoneuvojen yliajokerrat vuorokaudessa = $(KVL / 2) * (1 - \text{raskaan liikenteen osuus}) * \text{taulukon 12 nastarengas- \% ajanjaksoa kohti}$. Esim. Kuusisaarentiellä aikana 6.10.–15.10.2011 arvioidaan tapahtuneen $(19500 / 2) * (1 - 0,04) * 0,05 = 468$ yliajokertaa vuorokaudessa.
- Nastarenkaita käyttävien ajoneuvojen yliajokerrat taulukossa 12 esitettyä ajanjaksoa kohti = nastarenkaita käyttävien ajoneuvojen ylityskerrat / vrk * ajanjakson pituus (vrk). Esim. Kuusisaarentiellä 6.10.–15.10.2011 arvioidaan tapahtuneen yhteensä 468 yliajokertaa / vrk * 10 vrk = 4680 yliajokertaa.
- Nastarenkaita käyttävien ajoneuvojen yliajokerrat mittausten välissä laskettu laskemalla yliajokerrat taulukossa 12 esitetyin ajanjaksoittain yhteen.

Taulukko 13. Nastarenkaita käyttäneiden ajoneuvojen arvioidut yliajokerrat mittauskohteittain aikana 6.10.2011–19.4.2012.

Mittauskohde	Yliajokerrat nastarenkain
Kuusisaarentie	1 120 000
Meilahdentie	385 000
Pirkkolantie	422 000
Metsäläntie	890 000
Veturitie	1 270 000
Vauhtitie	460 000
Töölönkatu	352 000

Verrattaessa talven 2011–12 ilmastotilastoja kuntotieteanalyysissä analysoitujen mittausajankohdten väliin talviin on talvea 2011–12 pidettävä huomattavasti keskimääräistä pahempaa talvena nastarenkaiden aiheuttamaan päällysteiden kulumiseen vaikuttavien tekijöiden osalta. Kuntotieteanalyysissä tutkituista ajankohdista ainoastaan ennätysellisen lauha talvi 2007–08 oli pahempi kuin talvi 2011–12. Talven 2011–12 suurin kulumista Helsingissä lisännyt yksittäinen ilmastollinen tekijä oli termisen talven lyhyys. Tienpinnat olivat paljaita ja usein märkiä urasyvyysmittausten välisestä 6,5 kuukauden ajanjaksosta alkutalvesta yhtäjaksoisesti lähes kolme kuukautta ja loppupalvestakin yhtäjaksoisesti 1,5 kuukautta sellaisina aikoina, kun nastarenkaita käytettiin yleisesti. Näiden sulien jaksojen väliin jäänyt kahden kuukauden mittainen runsasluminen talvi, jolloin tiet ja kadut olivat osin lumi- ja jääpeitteisiä, ei riittänyt kompensoimaan sulan ajan vaikutusta kulumiseen.

8. Tutkimustulokset

8.1. Kirjallisuustutkimuksen tulokset

8.1.1. Päällysteiden urautumista taajamissa selittävät havaitut muuttujat

Taajamanopeuksissa urautumista tapahtuu kaikilla samoilla mekanismeilla, joita on aiemmin tutkittu enemmän maantienopeuksissa. Koska liikenneympäristöt ovat erilaisia, ovat eri urautumismekanismien merkitys ja niiden suhteellinen osuus kokonaisurautumisesta osin erilaisia. Taulukossa 14 on eritelty edellä mainittujen keskeisten muuttujien syitä.

Taulukko 14. Päällysteiden urautumismekanismeihin vaikuttavien muuttujien keskeiset erot taajamanopeuksissa ja -liikenteessä verrattuna maantieliikenteeseen. Merkkien selitykset: (-) Taajamissa pienempi kuin maanteillä. (+) Taajamissa suurempi kuin maanteillä. (=) Taajamissa ja maanteillä yhtä suurta. (-/+) Vaikutus vähäinen. (--/++) Vaikutus kohtalainen. (---/+++) Vaikutus suuri.

Urautumismekanismi	Muuttuja	Selite	Vaikutus
Nastarengaskuluminen	Henkilö- ja pakettiauto-liikenne	Ajonopeus (--)	Nastaisku ja pistovoima (---)
			Nastan hiertopituus (+)
			Kokonaiskuluminen (--)
		Liikennemäärä (+)	Kuluminen (+)
		Liiketilän muutokset (+++)	Kuluminen (++)
	Rengas	Nastojen lukumäärä	Vaikutus pienempi kuin maantienopeuksissa
		Nastojen massa	Vaikutus suurempi kuin maantienopeuksissa
		Renkaan profiilisuhde	Vaikutus vähintään yhtä suuri kuin maantienopeuksissa
	Väylän ja päällysteen ominaisuudet	Päällystetyyppi (=)	Kuluminen ja deformaatio (=)
		Melua vaimentava päällyste (+)	Kuluminen ja deformaatio (+)
		Liikenteen kanavoituminen (+)	Kuluminen ja deformaatio (+)
		Liittymien ja pysähdysten lkm (+++)	Kuluminen (++) deformaatio (+++)
Deformaatio kulutuskerroksessa ja uuden päällysteen alkutiivistyminen. Osa deformaatiosta vaikuttaa myös syvemmällä tien rakennekerroksissa	Kuorma-autoliikenne	Ajonopeus (--)	Deformaatio (++)
		Liikennemäärä huoltoajo (++)	Deformaatio (++)
		Liikennemäärä läpiajo (--)	Deformaatio (--)
		Ajoneuvojen massa (--)	Deformaatio (--)
		Pysähtyneet ja hitaasti liikkuvat ajoneuvot (+++)	Deformaatio (+++)
	Linja-autoliikenne	Ajonopeus (--)	Deformaatio (++)
		Liikennemäärä (++)	Deformaatio (++)
		Ajoneuvojen massa (=)	Deformaatio (=)
		Pysähtyneet ja hitaasti liikkuvat ajoneuvot (+++)	Deformaatio (+++)

8.1.2. Nastarenkaiden kulutusvaikutus taajamissa

Liikenneympäristössä tehdyt urasyvyysmittaukset, useiden tutkijoiden tekemät katupölymittaukset sekä renkaiden profiilisuhteen madaltumiseen liittyvä teoria nastaискun muodosta alhaisissa nopeuksissa tukevat sitä, että nastarenkaiden päällysteitä kuluttava vaikutus taajamanopeuksissa on aiemmin tutkittua vähäisempää. Tämän perusteella nastarengaskuluminen ei vastoin Unholan (2004) yliajokoetuloksia ole minimissään ajonopeuksilla 60–80 km/h, vaan kuluminen vähenee ajonopeuden funktiona myös tätä alhaisemmilla nopeuksilla.

Edellä mainitun perusteella tutkimuskysymyksissä asetettua hypoteesia ei vahvisteta. Kirjallisuustutkimuksen perusteella hypoteesi voidaan vähintään vahvasti kyseenalaistaa seuraavasti:

Nastarenkaiden päällysteitä kuluttava vaikutus kasvaa selvästi ajonopeuden kasvaessa kaikilla nopeusalueilla. Nastan hiertokomponentti voi alhaisilla nopeuksilla olla tietyillä tutkimusmenetelmillä mitattuna ja osassa liikennetilanteita niin suuri, että mitattu kuluminen on kasvanut ajonopeuden laskiessa.

Alla on eritelty tarkemmin perusteita hypoteesin vahvaan kyseenalaistamiseen.

Miksi nastarenkaiden päällysteitä kuluttava vaikutus myös alhaisissa nopeuksissa kasvaa ajonopeuden kasvaessa? Miksi jotkut aikaisemmat tutkimukset ovat väittäneet muuta?

Nastasta tienpintaan kohdistuvat voimat

Suurin osa liikkuvan renkaan, nastan ja tienpinnan välisistä voimista on verrannollisia ajonopeuteen – joko sen ensimmäiseen tai toiseen potenssiin. Täten kuluminen alhaisissa nopeuksissa on vähäistä.

Renkaiden muuttuminen matalaprofiilisemmiksi

Suuri osa aikaisemmista nastarengaskulumista koskevista tutkimuksista Suomessa ja Pohjoismaissa on tehty aikana, jolloin myydyimpien ja liikenteessä yleisimpien henkilöautomallien talvirengaskokojen profiilisuhde oli 70–82. Yleisimpien talvirengaskokojen profiilisuhde 2010-luvulla on 50–65. Mitä matalampi renkaan profiilisuhde on, sitä alhaisemmassa nopeudessa nastan tiekosketus muuttuu hiertävästä iskumaiseksi. Tämä on vähentänyt liikenteessä olevien nastarenkaiden hiertovaikutusta taajamanopeuksissa.

Nastojen massa

Uusiin henkilöauton renkaisiin on saanut 1990-luvulta alkaen asentaa enintään 1,1 g painavat nastat. Kupiaisen (2011) katupölymittausten mukaan tällainen nasta alkaa vaikuttaa katupölyn muodostumiseen ajonopeudesta 50 km/h ylöspäin. Painavammat

nastat lisäävät katupölyn muodostumista jo tätä alhaisemissa nopeuksissa. Tästä voidaan päätellä, että siirtyminen kevyempiin nastoihin on vähentänyt päällysteiden kulumista alhaisissa nopeuksissa suhteellisesti vähintään yhtä paljon kuin maantienopeuksissa.

Katupölymittaukset

Vaikka liikenneympäristössä tapahtuva pölymittaus on epäluotettava päällysteen kulumisen mittaamenetelmä, voi laboratorio-oloissa tapahtuvaa pölymittausta käyttää osoittamaan ainakin päällysteen kulumisen trendejä, kun taustamuuttajat tiedetään. Kaikissa laboratorio-oloissa tehdyissä katupölymittauksissa hiukkasia muodostui vähiten alhaisimmilla testatuilla ajonopeuksilla ja eniten korkeimmilla testatuilla ajonopeuksilla. Alle 30–40 km/h ajonopeuksissa nastarenkaiden vaikutus hiukkasten muodostumiseen oli vähäinen verrattuna suurempiin nopeuksiin.

Yliajo- ja ratakulumaa mittaavien tutkimusmenetelmien epävarmuus alhaisissa nopeuksissa

VTI:n kulutusradan pienisäteisen kaarreajon jatkuva suuri luisto sekä VTT:n yliajokokeiden kulutuskoekappaleiden märkä ja sahattu pinta voivat kasvattaa nastan tiekosketuksen hiertokomponenttia ja saada kulumisen alhaisissa nopeuksissa näyttämään todellista suuremmalta.

Urasyvyysmittaukset liikenneympäristössä Tukholmassa

VTI:n todellisessa liikenneympäristössä Tukholmassa tekemät urasyvyysmittaukset osoittavat, että urasyvyyden kasvu ja ominaisurautuminen nopeusrajoitusalueella 50 km/h sijainneissa mittauspisteissä on ollut selvästi alhaisempaa kuin korkeammilla nopeusrajoitusalueilla.

Mitä epävarmuustekijöitä jäi mahdollistamaan sen, että nastarenskaat kuluttaisivatkin päällysteitä voimakkaasti myös alhaisissa ajonopeuksissa?

Nastajäljen syvyys ja nastaiskun irrottaman materiaalin massa

Tässä työssä esitetty teoria matalaprofiilisten renkaiden vähäisestä hiertovaikutuksesta taajamissa ei pysty poissulkemaan sitä mahdollisuutta, että matalaprofiilisen renkaan pinta-alaltaan pieni nastajälki on vastaavasti syvempi, ja materiaalia päällysteen pinnasta irtoaa yhtä paljon tai enemmän kuin korkeaprofiilisen renkaan hiertävämmästä nastajäljestä.

Nastan dynaamisen pistovoiman ja hierron tuntemattomat muuttujat

Nastan dynaamista pistovoimaa ja hierron komponentteja ei ole tutkittu perusteellisesti Anssi Lampisen väitöskirjatutkimuksen jälkeen. Koska renkaat ja nastat ovat tuon ajan jälkeen kehittyneet merkittävästi, ei Lampisen tutkimustuloksia voi käyttää sellaisinaan asian osoittamiseksi tässä tutkimuksessa. Kuinka voimakkaasti yksi nasta pistää tienpintaa ajettaessa 100 km/h tasaisella asfaltilla? Kuinka pitkän matkan sama nasta

hiertää, kun ajonopeus on 30 km/h ja kiihtyvyys $1,8 \text{ m/s}^2$? Tästä tutkimuksesta ei ole saatavilla näihin kysymyksiin kvantitatiivisia vastauksia.

Yliajo- ja ratakulumaa mittaavien tutkimusmenetelmien kritiikin oikeellisuus

VTI:n kulutusradan jatkuva luisto voi myös vaikuttaa kaikkien nopeusalueiden mittaustuloksiin tasapuolisesti tai liioitella suurilla nopeuksilla mitattua kulumaa. Märän ja urille sahatun kulutuskoeakappaleen kulumisesta voidaan myös esittää hypoteeseja, jotka tukisivatkin VTT:n yliajokokeiden koepalan suhteettoman nopeaa kulumista korkeissa nopeuksissa. Esitetty kritiikki tutkimusmenetelmien epävarmuudesta ei ole fakta, vaan yksi mahdollinen epäily ja selitys, joka voidaan edelleen vahvistaa tai hylätä.

8.1.3. Deformaatio taajamissa

Deformaatiota ja deformaation näköisiä urautumismekanismeja tapahtuu mekaanisesti useilla eri tavoilla tien ja kadun kaikissa rakennekerroksissa. Näiden mekanismien erottaminen toisistaan on vaikeaa, ja useissa tutkimuskohteissa ei ole saatavilla taustatietoa läheskään kaikista deformaatioon vaikuttavista taustamuuttujista.

Joustavalla päällysrakenteella päällystetyn tien deformaatio on pääasiallinen urautumismekanismi useissa taajamaliikenteelle tyypillisissä oloissa. Jos katua ajaa edes muutama säännöllinen bussilinja päivittäin, ilmenee selvää deformaatiourautumista sellaisissa kohdissa, joissa pysähtymään johtuvien bussien osuus on suuri. Jos raskaiden ajoneuvojen, erityisesti raskaimpien ajoneuvoyhdistelmien, osuus kadun tai ajokaistan KVL:sta nousee 10 prosentin tuntumaan tai yli, kasvaa urasyvyys lämpimänä vuodenaikana enemmän kuin talvirengaskaudella yleensä myös sellaisissa mittauspisteissä, joissa pysähtymään joutuvien ajoneuvojen osuus ei ole suuri. Mitä alhaisempia liikenteen keskinopeus sekä suurempia pysähtymään joutuvien ja hitaasti liikkuvien ajoneuvojen osuudet ovat, sitä vähäisempi raskaan liikenteen osuus riittää nostamaan deformaation pääasialliseksi urautumismekanismiksi.

8.2. Kuntotietoanalyysin tulokset

8.2.1. Maksimiurasyvyyden muutoksen analysointi

P-arvon mukaan maksimiurasyvyyden kasvua selittävät parhaiten erillisissä yhden muuttujan malleissa olevat raskaan liikenteen osuus ja ajokaistan leveys. Toisen selittävän muuttujan lisääminen malliin voi nostaa mallin selityssastetta, mutta tällöin toista selittävää muuttujaa ei voida pitää tilastollisesti merkittävänä. Koko ajoradan keskivuorokausiliikenne ja keskinopeudet tai nopeusrajoitus ovat myös yhdessä tilastollisesti lievästi selittäviä muuttujia. Taulukossa 15 on esitetty maksimiurasyvyyttä parhaiten selittävien yhden muuttujan mallien tunnusluvut selittävän muuttujan mukaan. Taulukossa 16 on esitetty maksimiurasyvyyttä parhaiten selittävien kahden muuttujan mallien tunnusluvut selittävien muuttujien mukaan. Liian korkeat p-arvot ($>0,05$) on merkitty taulukoihin punaisella.

Taulukko 15 . PTM-mittaustulosten maksimiurasyvyyden muutoksille korkeimman selityssasteen antaneiden yhden selittävän muuttujan mallien tunnusluvut.

Muuttuja	Selityssaste R^2	t-arvo	p-arvo
Ajokaistan leveys	0,18	-2,75	0,0094
Raskaan liikenteen osuus	0,16	-2,54	0,016
Mittausvuosi	0,11	2,03	0,050
KVL koko ajoradalla	0,09	1,82	0,077

Muut kuin taulukossa 15 mainitut yhden selittävän muuttujan mallit olivat selityssasteeltaan ja t-arvoltaan niin alhaisia ja p-arvoltaan korkeita, ettei niissä käytettyjen muuttujien voida katsoa selittävän lainkaan maksimiurasyvyyden muutosta.

Taulukko 16. PTM-mittaustulosten maksimiurasyvyyden muutoksille korkeimman selityssasteen antaneiden kahden selittävän muuttujan mallien tunnusluvut.

Muuttujat	Selityssaste R^2	t-arvo	p-arvo
Keskinopeus ruuhka-aikoina; KVL	0,23	Keskinopeus ruuhka-aikoina -2,47; KVL 2,71	Keskinopeus ruuhka-aikoina 0,019; KVL 0,010
Nopeusrajoitus; KVL	0,23	Nopeusrajoitus -2,71; KVL 3,13	Nopeusrajoitus 0,018; KVL 0,0036

Muut kuin taulukossa 16 mainitut kahden selittävän muuttujan mallit sisälsivät joko p-arvoltaan aivan liian korkeita muuttujia tai olivat selitysasteiltaan niin alhaisia, ettei niiden voida katsoa selittävän luotettavasti maksimiurasyvyyden muutosta.

8.2.2. Vasemman tai oikean ajouran urasyvyyden muutoksen analysointi

Myös vasemman ja oikean ajouran urasyvyyden muutoksista tehtiin lineaarisia regressiomalleja. Näihin malleihin oli tutkimusta tehdessä käytettävissä lähtötietoja ainoastaan vuosilta 2005–2007, koska vuoden 2008 PTM-mittaustulostiedoissa oli ilmoitettu urasyvyyksistä ainoastaan maksimiurasyvyys. Vasemman ja oikean uran urasyvyysmuutoksista odotettiin tutkimukseen mahdollisia lisätietoja sellaisista mittauspisteistä, joissa esimerkiksi liikenne olisi jostakin syystä keskittynyt toiseen ajouraan toisen ajouran kasvun ollessa selvästi hajanaisempaa. Taulukossa 17 on esitetty vasemman uran urasyvyyden muutosta parhaiten selittävien mallien selittävät muuttujat ja tärkeimmät tunnusluvut. Taulukossa 18 sivulla 96 on selitetty oikean uran urasyvyyden muutosta parhaiten selittävien mallien selittävät muuttujat ja tärkeimmät tunnusluvut.

Taulukko 17. PTM-mittaustulosten vasemman ajouran urasyvyyden muutokselle korkeimman selitysasteen antaneiden mallien tunnusluvut.

Muuttuja(t)	Selitysaste R^2	t-arvo	p-arvo
KVL; nopeusrajoitus	0,21	KVL 2,08; nopeusrajoitus -1,52	KVL 0,054; nopeusrajoitus 0,15
Ajokaistan leveys; raskaan liikenteen osuus; ajokaistakohtainen KVL	0,28	Ajokaistan leveys - 0,88; raskaan liikenteen osuus - 0,04; ajokaistakohtainen KVL 1,49	Ajokaistan leveys 0,39; raskaan liikenteen osuus 0,96; ajokaistakohtainen KVL 0,16

Kuten taulukosta 17 on nähtävillä, ei vasemman ajouran urasyvyydelle onnistuttu rakentamaan havaintojen ja käytettyjen selittävien muuttujien perusteella yhtään hyväksyttävän luotettavaa lineaarista regressiomallia, vaan kaikkien käytettyjen selittävien muuttujien p-arvot olivat liian korkeita.

Kaikkien maksimiurasyvyyden sekä vasemman ja oikean ajouran urasyvyyden muutosten selittämistä varten rakennettujen mallien tulokset Statistix:illa tehdyssä muodossa ovat liitteessä 6.

Taulukko 18. PTM-mittau tulosten oikean ajouran urasyvyyden muutokselle korkeimman selityssasteen antaneiden mallien tunnusluvut.

Muuttuja(t)	Selityssaste R^2	t-arvo	p-arvo
Ajokaistan leveys; raskaan liikenteen osuus	0,69	Ajokaistan leveys - 5,72; raskaan liikenteen osuus 3,61	Ajokaistan leveys 0,00; raskaan liikenteen osuus 0,0024
Ajokaistan leveys; raskaan liikenteen osuus; ajokaistakohtainen KVL	0,80	Ajokaistan leveys - 6,41; raskaan liikenteen osuus 4,31; ajokaistakohtainen KVL 2,78	Ajokaistan leveys 0,00; raskaan liikenteen osuus 0,0006; ajokaistakohtainen KVL 0,0139
Ajokaistakohtainen KVL; keskinopeus	0,43	Ajokaistakohtainen KVL 2,60; keskinopeus -2,44	Ajokaistakohtainen KVL 0,0193; keskinopeus 0,0268

8.2.3. Urien poikkipinta-alan muutoksen analysointi

Urien poikkipinta-alan muutoksille ei saatu X-jakopisteohjelmalla kerätyistä tiedoista rakennettua yhtään sellaista lineaarista regressiomallia, jonka selittävien muuttujien p-arvo olisi ollut $< 0,05$. X-jakopisteohjelman poikkiprofiilien mallinnuksessa käytetyt tunnusluvut on esitetty profiilikuvien yhteydessä liitteessä 5 ja rakennetut lineaariset regressiomallit (6 kpl) liitteen 6 viimeisessä osassa. Lähimmäksi hyväksyttävää selittävää muuttujaa saatiin ajokaistakohtainen KVL, ($R^2 = 0,35$, $p = 0,09$).

Jos urien massamääräinen kuluminen ja poikkipinta-alan muutos pysyvät vakioina ajokaista leveyden muuttuessa, on ajokaistan leveys kääntäen verrannollinen urasyvyyden muutokseen. Ajokaistan leveyden ja ajourien poikkipinta-alan muutosten välillä ei havaittu lainkaan tilastollista yhteyttä.

Urien poikkipinta-alan vuosittaista muutosta analysoitaessa käytettyjen havaintojen vähäisyys (kahdelle perättäiselle vuodelle samasta mittauskohteesta, josta muut liitteen 7 mukaiset taustatiedot myös vuosilta 2009–11 olivat olemassa, $n = 9$) vaikutti todennäköisesti mallien heikkoon selityssasteeseen ja runsaisiin virhemahdollisuuksiin. Myös profiilien graafinen ja numeerinen epätarkkuus verrattuna laserprofilometrillä mitattuihin profiileihin sekä profiilikuvan sattumanvarainen sijainti ajoradan poikkileikkauksessa vaikuttivat huomattavasti analyysissä käytettyjen tulosten tarkkuuteen ja luotettavuuteen. Edellä mainittujen epävarmuuksien takia urien poikkipinta-alan muutosta analysoitaessa on otettu myöhemmin tässä tutkimuksessa huomioon vain kappaleessa 8.3.2. esitetyt laserprofilometrimittauksiin perustuvat tulokset.

8.3. Urasyvyyssmittausten tulokset

8.3.1. Urasyvyyden muutokset

Taulukossa 19 on esitetty vasemman ja oikean ajouran urasyvyydet syksyllä 2011 ja keväällä 2012, sekä edellä mainittujen urasyvyyksien muutokset mittausten välillä. Mittaustulokset on esitetty mittaushaaroissa mitattujen profiilien urasyvyyksien keskiarvoina. Urasyvyyssmittausten tulokset yksittäisten profiilien osalta on esitetty liitteessä 8 ja profiilikuvat tunnuslukuineen liitteessä 9.

Taulukko 19. Urasyvyyden muutokset poikkiprofiilien urasyvyyksien keskiarvoista laskettuna mittaushaaroissa 5./6.10.2011 – 19./20.4.2012.

Kohde	Vasemman uran urasyvyys syksy 2011 (mm)	Vasemman uran urasyvyys kevät 2012 (mm)	Vas. uran urasyvyys muutos (mm)	Oikean uran urasyvyys syksy 2011 (mm)	Oikean uran urasyvyys kevät 2012 (mm)	Oikean uran urasyvyys muutos (mm)
Kuusisaarentie suunta 2, paalut 0–250 m	17.0	19.6	2.6	15.9	18.3	2.4
Meilahdentie, suunta 2	7.3	8.9	1.6	6.5	7.4	1.0
Metsäläntie suunta 2, paalut 600–850 m	14.5	15.8	1.3	11.1	12.4	1.3
Pirkkolantie suunta 1, paalut 250–500 m	5.5	6.6	1.1	5.4	6.8	1.4
Vauhtitie suunta 2, paalut 100–350 m	2.7	3.2	0.6	2.3	2.7	0.4
Veturitie suunta 2, paalut 2600–2800 m	7.3	8.7	1.4	4.0	5.1	1.0
Töölönkatu, suunta 1	2.4	2.6	0.2	5.7	5.9	0.2

Kappaleessa 7.2.3. esiteltyjen urasyvyysmittaustuloksista kerättyjen urasyvyyksien muutoksia parhaiten selittävien lineaaristen regressiomallien tunnusluvut ovat taulukossa 20. Urasyvyysmittaustulosten tilastollisessa analyysissä käytetty numeerinen data on kokonaisuudessaan liitteessä 10, ja Statistix –tilasto-ohjelmistolla tehdyt lineaariset regressiomallit ovat liitteessä 11. Vasemman ja oikean uran urasyvyyden muutokset toimivat selittävinä muuttujina näissä malleissa keskenään hyvin samalla tavalla, eikä niiden muutosta selittävien muuttujien tunnusluvuissa ollut merkittäviä eroja riippumatta siitä, kumman ajouran syvyyden muutosta täytyi selittää.

Taulukko 20. Laserprofilometrillä mitatun vasemman ja oikean ajouran urasyvyyden muutokselle korkeimman selityssasteen antaneiden mallien tunnusluvut.

Muuttuja	Selitysaste R²	t-arvo	p-arvo
Vasemman ajouran urasyvyyden muutos / Liikenteen keskinopeus	0,21	2,81	0,0087
Vasemman ajouran urasyvyyden muutos / KVL	0,23	2,95	0,0062
Oikean ajouran urasyvyyden muutos / liikenteen keskinopeus ja ajoneuvon liiketilan muutokset	0,34	Liikenteen keskinopeus 3,72; ajoneuvon liiketilan muutokset 2,23	Liikenteen keskinopeus 0,0009; ajoneuvon liiketilan muutokset 0,034

8.3.2. Urien poikkipinta-alan muutos

Taulukossa 21 sivulla 100 on esitetty molempien ajourien yhteenlaskettu poikkipinta-ala syksyllä 2011 ja keväällä 2012, sekä edellä mainittujen pinta-alojen muutokset mittausten välillä. Mittaustulokset on esitetty mittaushetkellä mitattujen profiilien urasyvyyksien keskiarvoina. Urasyvyysmittausten tulokset yksittäisten profiilien osalta on esitetty liitteessä 8 ja profiilikuvat tunnuslukuineen liitteessä 9. Taulukon 21 oikean puolimmaisessa sarakkeessa on lisäksi esitetty ominaisurautumisen tunnuslukuna urien pinta-alamuutos ajokaistalla olevan profiilin ylittänyttä KVL:n 1000 ajoneuvoa kohti, sekä urasyvyysmittausten välillä kappaleessa 7.2.4. ja taulukossa 13 (s. 89) esitetyn arvion mukaisesti profiilin ylittänyttä nastarenkain varustettua 100 000 ajoneuvoa kohti.

Kappaleessa 7.2.3. esiteltyjen urasyvyysmittaustuloksista kerättyjen urien poikkipinta-alojen muutoksia parhaiten selittävien lineaaristen regressiomallien tunnusluvut ovat taulukossa 22 sivulla 100. Urasyvyysmittaustulosten tilastollisessa analyysissä käytetty numeerinen data on kokonaisuudessaan liitteessä 10, ja Statistix –tilasto-ohjelmistolla tehdyt lineaariset regressiomallit ovat liitteessä 11.

Taulukko 21. Urien poikkipinta-alan muutokset poikkiprofiilien urien pinta-alan keskiarvoista laskettuna mittauskohteissa 5./6.10.2011 – 19./20.4.2012.

Kohde	Urien poikkipinta-ala syksy 2011 (cm ²)	Urien poikkipinta-ala kevät 2012 (cm ²)	Urien poikkipinta-alan muutos (cm ²)	Pinta-alamuutos / KVL:n 1000 ajon/vrk (cm ²) / mittausten välillä profiilin ylittänyttä nastarenkain varustettua 100 000 ajoneuvoa kohti
Kuusisaarentie suunta 2, paalut 0–250 m	169.8	191.7	21.8	1.12 / 1.95
Meilahdentie, suunta 2	92.3	107.0	14.7	2.33 / 3.82
Metsäläntie suunta 2, paalut 600–850 m	173.3	192.3	19.0	1.01 / 2.13
Pirkkolantie suunta 1, paalut 250–500 m	80.4	101.7	15.2	1.79 / 3.61
Vauhtitie suunta 2, paalut 100–350 m	24.0	29.5	5.5	0.66 / 1.19
Veturitie suunta 2, paalut 2600–2800 m	80.8	105.5	24.7	1.10 / 1.95
Töölönkatu, suunta 1	38.2	42.0	3.8	0.63 / 1.07

Urien poikkipinta-aloihin liittyvien laskutoimitusten yhteydessä vertailtiin myös mitattujen urien poikkipinta-alojen suhdetta urasyvyyksiin eri mittauskohteiden, mittausmenetelmien ja aiempien suomalaisten uramallien välillä. Taulukossa 23 sivulla 101 esitetyn muuttujien vertailun tavoitteena oli arvioida, onko urien pinta-ala selitettävissä yksinomaan kadun leveydellä ja urasyvyydellä, ja onko edellä mainittujen muuttujien keskinäisessä riippuvuudessa ja niiden perusteella saatujen tulosten tarkkuudessa ja luotettavuudessa eroja eri mittaus- ja arviontimenetelmien sekä liikenneympäristöjen välillä.

Taulukko 22. Laserprofilometrillä mitattujen urien pinta-alojen muutoksille korkeimman selityssasteen antaneiden mallien tunnusluvut.

Muuttuja	Selityssaste R^2	t-arvo	p-arvo
Liikenteen keskinopeus	0,33	3,82	0,0007
KVL	0,31	3,62	0,0011
Liikenteen keskinopeus; KVL	0,41	Liikenteen keskinopeus 2,16; KVL 1,89	Liikenteen keskinopeus 0,039; KVL 0,069
Liikenteen keskinopeus; uran pinta-ala mittausjakson alussa	0,43	Liikenteen keskinopeus 2,22; uran pinta-ala mittausjakson alussa 2,14	Liikenteen keskinopeus 0,035; uran pinta-ala mittausjakson alussa 0,041
Päällysteen maksimiraekoko; KVL	0,49	Päällysteen maksimiraekoko - 3,10 ; KVL 2,90	Päällysteen maksimiraekoko 0,0043; KVL 0,0072
Liikenteen keskinopeus; ajoneuvon liiketilan muutokset	0,51	Liikenteen keskinopeus 5,30; ajoneuvon liiketilan muutokset 3,17	Liikenteen keskinopeus 0; ajoneuvon liiketilan muutokset 0,0037

Taulukon 22 alimmalla rivillä olevien selittävien muuttujien liikenteen keskinopeus ja ajoneuvon liiketilan muutokset perusteella voidaan selittää ajourien poikki-pinta-alan muutosta parhaiten kaikista tutkituista malleista. Kyseinen malli voidaan esittää muodossa:

$$\text{Ajouran poikki-pinta-alan muutos (cm}^2\text{)} = -38,52 + 0,833 * \text{liikenteen keskinopeus (km/h)} + 21,18 * \text{ajoneuvon liiketilan muutokset (min. 1, jos liikenne tasaisella nopeudella; max 2, jos yli 50 \% ajoneuvoista pysähtyy ja lähtee liikkeelle tai kiihdyttää tai hidastaa voimakkaasti);}$$

$$R^2 = 0,51$$

(kaava 7.)

Kaavan 7 mukaan urien poikki-pinta-alan muutos havaintoaineistossa talven 2011–12 aikana on esimerkiksi kasvanut $0,833 \text{ cm}^2$ liikenteen keskinopeuden kasvaessa 1 km/h ja kasvanut $0,1 * 21,18 = 2,118 \text{ cm}^2$, jos ajoneuvon liiketilan muutoksen kerroin on kasvanut 1 -> 1,1 eli tasaisesta nopeudesta kaarreajoon tai rauhallisen ennakoiviin nopeuden muutoksiin. Kyseinen malli selittää 51 % ajourien poikki-pinta-alan muutoksesta.

Taulukossa 23 laserprofilometrimittauksia koskevat tiedot ovat syksyn 2011 profiilien keskiarvoja mittauskohteittain. PTM- ja X-jakopistedata on otettu Kuusisaarentieltä vuodelta 2011, ja Metsäläntieltä sekä Vauhtitieltä vuodelta 2010. Jos laserprofilometrin mittauskohteista ei ollut saatavilla joko PTM- tai X-jakopistedataa, ovat kyseisen kohteen tiedot niissä pystysarakkeissa tyhjiä.

Taulukko 23. Ajourien poikkipinta-alan ja urasyvyyden suhde mittauskohteittain eri menetelmillä ja taulukon 24 (s. 102) urautumismallin kaavoin laskettuna.

Kohde	max urasyvyys laserprofilo- metri (mm)	urien pinta- ala laserprofilo- metri (cm ²)	Pinta-ala / max urasyvyys laserprofilo- metri	max urasyvyys PTM (mm)	Urien pinta-ala X- jakopiste (cm ²)	Pinta-ala - X-jako- piste / max urasyvyys PTM	Kadun leveys (m)	Laskennallinen urasyvyys profilometrillä mitatusta pinta-alasta Tielaitoksen kaavalla	Laskennallinen urasyvyys PTM- mitatusta pinta- alasta Tielaitoksen kaavalla
Kuusisaarentie	17	169.8	10.0	18	154.5	8.6	< 8,5	9.06	7.97
Meilandentie	7.3	92.3	12.6				< 8,5	3.55	
Pirkkolantie	5.5	80.4	14.6				8,5-10	-1.84	
Metsäläntie	14.5	173.3	12.0	10.5	179.5	17.1	8,5-10	6.42	6.98
Veturitie	7.3	80.8	11.1				< 8,5	2.74	
Vauhtitie	2.7	24	8.9	6.5	59	9.1	< 8,5	-1.30	1.19
Töölönkatu	2.4	38.2	15.9				< 8,5	-0.29	

Taulukosta 23 havaitaan, että uran poikkipinta-ala neliösenttimetreinä on laserprofilometrillä mitattuna ollut tyypillisesti 10–15 kertaa maksimiurasyvyys millimetreinä. Suurin hajonta sekä kyseisen suhdeluvun maksimi- ja minimiarvot ovat liittyneet havaintoihin, joissa maksimiurasyvyys on ollut hyvin pieni. Näissä tapauksissa mittauslaitteen ja mittausaineiston käsittelyn tarkkuuteen on myös liittynyt suhteellisesti eniten epävarmuutta.

PTM-mittauksista ja X-jakopisteohjelmasta laskettu poikkipinta-alan suhde maksimiurasyvyyteen sisältää huomattavasti enemmän hajontaa kuin vastaava tunnusluku laserprofilometrimittauksista. Myös PTM- ja X-jakopistedatan havaintojen lukumäärä on taulukon 23 kohteissa hyvin vähäinen.

Taulukon 24 (s. 102) mukaiset Tiehallinnon laskukaavat antavat urasyvyydelle poikkipinta-alan funktiona selvästi liian alhaisia arvoja. Useimmat mittauskohteiden kadut ovat selvästi kapeampia kuin Tiehallinnon kapeimpien teiden kaavan sovellusalueen yläraja 8,5 m, joten kaava ei mahdollisesti toimi sellaisenaan esimerkiksi 6,5 m leveillä kaduilla. Lisäksi kaupunkiympäristölle tyypilliset ajokaistan ja ajoradan reunat, kuten kevyen liikenteen väylät ja reunakivet, ohjaavat autoilijoita suhteellisesti enemmän samoihin kapeisiin ajouriin kuin maantienympäristölle tyypilliset pientareet. Tästä on pääteltävissä, että ajourat laserprofilometrillä mitattuina Helsingin kaduilla ovat suhteessa poikkipinta-alaan keskimäärin huomattavasti syvempiä kuin maanteillä Tiehallinnon urautumismallien mukaan.

Taulukko 24. Kulumisuran suhde kulumispinta-alaan tielaitoksen urautumismallin kaavoilla (Kurki 1998).

Tien leveys (tyyppi)	kaava	kaava nro
< 8,5 m	kulumisura = 0,071 * PA - 3	1
8,5 m – 10 m	kulumisura = 0,089 * PA - 9	2
> 12 m	kulumisura = 0,077 * PA - 8	3
moottoritie (oikea kaista)	kulumisura = 0,075 * PA - 1,5	4

PA = kulumispinta-ala (cm^2)

9. Tutkimustulosten arviointi

9.1. Päällysteiden urautumista taajamissa selittävät havaitut muuttujat

Urien poikkipinta-alan muutos on relevantein selitettävä muuttuja arvioitaessa kvantitatiivista kulumisen massamäärää ja kulumisen aiheuttamaa katupölyä. Maksimiurasyvyys ja sen muutos ovat urasyvyysmittauksissa erittäin yleisesti käytettyjä ja katujen ylläpitotarpeen perusteella ensiarvoisen tärkeitä tunnuslukuja, mutta ne eivät kuitenkaan selitä urien poikkipinta-alan muutosta luotettavasti. Suurimpana syynä näiden selitettävien muuttujien keskinäiseen asetelmaan on, että ajokaistan leveys on kääntäen verrannollinen maksimiurasyvyyden muutokselle, jos urien poikkipinta-alan muutos pysyy vakiona.

Laserprofilometrin mittaustulosten perusteella rakennettujen lineaaristen regressiomallien mukaan urien poikkipinta-alan muutosta selittää parhaiten malli, jonka kaksi selittävää muuttujaa ovat liikenteen keskinopeus ja ajoneuvon liiketilan muutokset. Tässä mallissa molempien selittävien muuttujien regressiokerroin on positiivinen, eli molemmat selittävät muuttujat ovat suoraan verrannollisia urien poikkipinta-alan muutokseen. Samaa mittausten menetelmää ja selitettävää muuttujaa käytettäessä myös ajoradan molempien suuntien keskivuorokausiliikenne ja päällysteen maksimiraekoko olivat tilastollisesti merkittäviä selittäviä muuttujia.

Päällysteen massatyypillä ei ollut odotettua yhteyttä mitattuun kulumiseen. SMA-päällysteiset vilkasliikenteiset kadut kuluivat laserprofilometrimittausten välissä hyvin tasaisesti, mutta AB-päällysteisiltä kaduilta mitattiin sekä selvästi pienin että selvästi suurin suhteellinen kuluma keskivuorokausiliikennettä ja nastarenkain varustettujen ajoneuvojen yliajokertoja kohti. Yhtenä syynä AB-päällysteiden kulumisen suureen hajontaan voidaan pitää sitä, että mm. ajonopeudessa oli AB-päällystetyissä kohteissa paljon suurempaa hajontaa kuin SMA-päällystetyissä kohteissa.

Laserprofilometrin mittaustulosten perusteella rakennettujen lineaaristen regressiomallien mukaan maksimiurasyvyyden muutosta selittivät parhaiten liikenteen keskinopeus, KVL ja ajoneuvon liiketilan muutokset. Kyseisten selittävien muuttujien regressiokertoimet olivat positiivisia myös näissä malleissa, mutta mallien selitysasteet jäivät huomattavasti alhaisemmiksi kuin urien poikkipinta-alan muutosta selittävien mallien. Tästä voidaan päätellä, että liikenteen keskinopeus, ajoneuvon liiketilan muutokset ja keskivuorokausiliikenne ovat suoraan verrannollisia nastarenkaiden aiheuttamaan päällysteiden kulumiseen, jota voidaan selittää luotettavammin urien poikkipinta-alan muutoksella kuin maksimiurasyvyyden muutoksella.

Kerran vuodessa mitattujen PTM-mittaustulosten urasyvyysä analysoitaessa ei onnistuttu rakentamaan mallia, joka selittäisi luotettavasti nastarengaskulumisen. Korkeimman selitysasteen PTM-datasta antoivat sellaiset mallit, joiden selitettävänä muuttujana oli käytetty oikean ajouran urasyvyyden muutosta. Selittäviä muuttujia

näissä malleissa olivat positiivisella regressiokertoimella ajokaistakohtainen KVL ja raskaan liikenteen osuus, sekä negatiivisella regressiokertoimella liikenteen keskinopeus ja ajokaistan leveys. Korkean selityssasteen keskittyminen oikean ajouran urasyvyyden muutosta selittäneisiin malleihin voi mahdollisesti johtua siitä, että raskaiden ajoneuvojen oikean puolen renkaat olisivat keskittyneet samoihin ajouriin lähelle ajokaistan oikeaa reunaa kapeilla ajokaistoilla, joilla liikenne liikkuu hitaasti tai pysähtelee, ja eri ajoneuvojen vasemman puolen renkaiden keskittymisessä vasempaan ajouraan olisi ollut enemmän hajontaa. Mainittujen selittävien muuttujien käyttäytyminen ja regressiokertoimien etumerkit viittaavat siihen, että kyseiset mallit selittäisivät deformaatiourautumista enemmän kuin nastarengaskulumista.

X-jakopisteohjelman poikkiprofiileista määritetystä urien poikkipinta-alasta muutoksineen ei saatu tarkkoja vastauksia tutkimuskysymyksiin. Havaintojen vähäisyys, tutkimus-menetelmän puutteellinen soveltuvuus alkuperäisen käyttötarkoituksensa ulkopuolelle sekä mittausten tekeminen vain kerran vuodessa vaikuttivat X-jakopisteohjelman tulosten luotettavuuteen nastarengaskulumisen arvioimisessa.

Myös päällysteen kulutuskerroksen käyttöikää sekä talven 2011–12 kulumisen osuutta tähänastisen käyttöiän urautumisesta ja uudelleen päällystämistä edellyttävästä urasyvyydestä arvioitiin urasyvyysmittausten perusteella. Vuonna 2007 päällystetty Kuusisaarentie ja vuonna 2006 päällystetty Metsäläntie olivat mittauskohteissa niin urautuneita keväällä 2012, että ne täytyy päällystää uudelleen kesän 2012 aikana. Kuusisaarentien päällyste on siis urautunut viidessä vuodessa käyttöikänsä päähän, ja Metsäläntiellä vastaava aika on ollut kuusi vuotta. Nastarengaskulumisen kannalta vaikean talven 2011–12 aikana Kuusisaarentien maksimiurasyvyys kasvoi 2,6 mm, eli noin 13,5 % kevään 2012 maksimiurasyvyydestä ja ylläpitotarpeen määrittävästä urasyvyydestä. Vastaavana aikana Metsäläntien maksimiurasyvyys kasvoi 1,3 mm, eli noin 8,2 % kevään 2012 maksimiurasyvyydestä ja ylläpitotarpeen määrittävästä urasyvyydestä. Jos kulumisen ja maksimiurasyvyyden muutos olisi joka vuosi tasaista, tästä voitaisiin päätellä, että Kuusisaarentien urautumisesta noin 2/3 ja Metsäläntien urautumisesta alle 50 % johtuisi nastarengaskulumisesta. Tämän perusteella ei kuitenkaan voida tehdä kvantitatiivisia arvioita kulumisen osuudesta kokonaisurautumisesta, koska talvi 2011–12 oli nastarengaskulumisen kannalta vaikeampi kuin talvet vuosina 2006–12 keskimäärin.

Muissa empiiristen urasyvyysmittausten mittauskohteissa päällysteellä oli vielä hyvin käyttöikää jäljellä keväällä 2012. Vuonna 2009 päällystetty Veturitie oli urautunut noin 50 % ylläpitotarpeen määrittävästä maksimiurasyvyydestä, ja vuonna 2006 tai aikaisemmin päällystetyt vähäliikenteisemmät AB-päällysteiset kohteet olivat myöskin enintään päällysteen kulutuskerroksen elinkaaren puolivälissä. Veturitien maksimiurasyvyyden muutos talven 2011–12 aikana, samoin kuin yhden talven perusteella laskettu kulumisen osuus ylläpitotarpeen määrittävästä maksimiurasyvyydestä ja kulumisen osuus kokonaisurautumisesta, olivat erittäin lähellä

Metsäläntien tuloksista tehtyjä arvioita. Vuonna 2011 päällystetyn Vauhtitien päällysteeseen päällystysvuonna tiivistyneet alku-urat olivat lähes ennallaan talven jäljiltä, joten kyseisen uuden AB-päällysteen kulumisen ensimmäisenä talvena oli erittäin vähäistä. Talven 2011–12 sääolosuhteiden perusteella voimakasta nastarengaskulumista kuvaa hyvin se, että esimerkiksi vuonna 2006 päällystetyn Pirkkolantien kevään 2012 maksimiurasyvyydestä noin 20 % oli muodostunut kulumisesta talvella 2011–12, ja ennen vuotta 2005 päällystetyllä Meilahdentiellä vastaava suhdeluku oli 18 %.

9.2. Urasyvyyssmittaustulosten arviointi mittauskohteittain

Urasyvyyssmittausten tuloksista tehtiin myös päätelmät, kuinka eri mittauskohteista saadut mittaustulokset selittivät kappaleessa 7.2.1. kohteen valintaperusteena ollutta odotettua kontribuutiota, ja mitä nastarengaskaiden aiheuttamasta kulumisesta voitiin päätellä yksittäisen mittauskohteen tai poikkiprofiilin perusteella. Myös liitteessä 9 on esitetty arvioita joidenkin mitattujen poikkiprofiilien muotoon, ominaisuuksiin ja muutoksiin profiilikuvien alla.

Kuusisaarentien maksimiurasyvyyden muutos oli mittauskohteista ylivoimaisesti suurin, vaikka urien poikkipinta-alan muutos oli vastaavan suuruista kuin muilla mitatuilla SMA-päällysteisillä vilkasliikenteisillä kaduilla. Tämä vastasi odotuksia, joiden perusteella Kuusisaarentielle muodostuisi nopeasti kapeat ja syvät urat ajokaistojen kapean poikkileikkauksen takia. Kuusisaarentiellä mitatut profiilit olivat kauttaaltaan hyvälaatuisia, ja urien syvyydet sekä pinta-alat molemmissa mittauksissa olivat suhteellisen lähellä toisiaan eri profiilien välillä. Ainoastaan profiilin 3 oikean ajouran urasyvyyden muutos oli huomattavan vähäinen verrattuna muihin profiileihin, mikä ei kuitenkaan vaikuttanut voimakkaasti urien poikkipinta-alamuutoksen keskiarvoon. Kokonaisuutena Kuusisaarentien mittaustuloksia on pidettävä luotettavina ja informatiivisina.

Meilahdentie kului nopeusrajoitukseen ja liikennemäärään verrattuna yllättävän paljon. Eri profiilien mittaustulosten välillä oli voimakasta hajontaa. Merkittävänä syynä tähän oli, että kolme mitattua profiilia viidestä liittyi keskenään erilaisiin ajoneuvon liiketilan muutoksiin, ja vain kaksi viimeistä profiilia oli yleisesti tasaisella ajonopeudella ylitettävistä poikkileikkauksista. Meilahdentien profiili 1 kului mittausten välillä erittäin vähän, mikä voi liittyä siihen, että juuri ennen hidastetöyssyä sijaitseva poikkileikkaus ylitetään keskimäärin tasaisella alhaisella nopeudella, koska kuljettajat ovat ehtineet jo hidastaa ennakoivasti ennen sitä. Siksi ei ajoneuvon liiketilan muutosten kulumista lisäävä vaikutus tullut esille profiilissa 1. Profiilit 2 ja 3 voivat olla kuluneet voimakkaasti kiihdyttävien ajoneuvojen takia. Profiilin 4 vasemman ajouran urasyvyyden muutos oli hyvin suuri, vaikka profiili sijaitsi yleisesti tasaisella nopeudella ylitettävällä poikkileikkauksella. Todennäköisesti profiilin 4 vasemman ajouran kasvu ei johdu pelkästä nastarengaskulumisesta, vaan kyseessä voi olla myös

mittavirhe tai nastarengaskulumisesta riippumattomasta syystä tapahtunut painuma. Jäljelle tasaisen ajonopeuden kulumista ilman todennäköisiä karkeita virhetekijöitä edustamaan jäi ainoastaan profiili 5. Meilahdentiellä mitattujen profiilien lukumäärä oli riittämätön, ja toisen yleisesti tasaisella nopeudella ylitettävän profiilin mittausta voidaan tulkita epäonnistuneeksi. Meilahdentien mittaustulosten ei voida katsoa kuvaavan luotettavasti ajonopeuden ja massatyypin vaikutusta kulumiseen.

Metsäläntien ajourien syvyydet kasvoivat liikennemääriin ja nopeusrajoitukseen verrattuna maltillisesti, mutta urien poikkipinta-alan muutos oli vastaavan suuruista kuin muilla mitatuilla vilkasliikenteisillä SMA-päällysteisillä kaduilla. Tämä tukee teoriaa, jonka mukaan liikenteen jakautuminen tasaisesti leveään ajokaistalle poikkileikkaukselle aiheuttaa leveät ja matalat ajourat. Metsäläntien profiileissa 2 ja 3 oli lievästi poikkeavaa mittauserätarkkuutta, syynä mahdollisesti mittauslaitteen sijoittamisessa ilmenneet puutteet. Urasyvyyden ja urien poikkipinta-alan muutokset poikkesivat toisistaan eri profiilien välillä kuitenkin melko vähän. Kokonaisuutena Metsäläntien mittaustuloksia on pidettävä luotettavina ja informatiivisina.

Pirkkolantien kulumisen oli nopeusrajoitukseen, liikennemäärään ja AB-päällysteen maksimiraekokoon verrattuna odotettua voimakkaampaa. Profiilin 4 mittauksen epäonnistuminen syksyllä vaikutti urasyvyyden ja urien pinta-alan muutoksen mittaustulokseen niin voimakkaasti, että profiili 4 päätettiin jättää huomiotta laskettaessa Pirkkolantien urautumisen tunnuslukujen keskiarvoja. Jäljelle jäi vain kolme profiilia, joiden mittaustulokset olivat varsin lähellä toisiaan. Suhteellisen voimakkaan kulumisen syitä voivat mahdollisesti olla, että 50 km/h nopeusrajoituksesta huolimatta todelliset ajonopeudet Pirkkolantien mittaustuloksissa ovat väylän geometrian, ruuhkattomuuden sekä liittymätiheyden ja -tyypin takia vähintään yhtä korkeita kuin mitatuissa kohteissa, joiden nopeusrajoitus on 60 km/h, ja että AB22-päällyste ei kestäisi nastarengaskulutusta niin hyvin kuin suuren maksimiraekoon perusteella voisi olettaa.

Vauhtitien uuden AB16-päällysteen kulumisen oli vähäistä sekä absoluuttisesti että suhteellisesti kaikilla tunnusluvuilla. Mittaustulokset eri profiilien välillä olivat lähellä toisiaan. Vauhtitien mittaustulosten perusteella voidaan varauksin konfirmoida teoria, jonka mukaan myös AB-päällyste voisi kestää hyvin nastarengaskulutusta tasaisella alhaisella nopeudella. Toisaalta mittaustulosten perusteella voidaan kyseenalaistaa uuden päällysteen nopea kulumisen päällystyksen jälkeisenä ensimmäisenä talvena.

Veturitien kulumisen oli urien poikkipinta-alan muutoksella mitattuna vastaavan suuruista kuin muilla SMA-päällysteisillä kaduilla. Maksimiurasyvyyden muutos oli pinta-alamuutokseen, erittäin korkeaan liikennemäärään ja suhteellisen kapeisiin ajokaistoihin verrattuna yllättävän alhainen. Veturitien päällyste vaikuttaisi saavuttavan liikennemääriin verrattuna korkean kestävän 60 km/h nopeusrajoituksesta huolimatta. Todennäköisenä syynä tähän on, että Hellmanin (2009) tutkimuksessa mitattu liikenteen toteutunut keskinopeus mittaustuloksissa on ruuhkautumisherkkyiden takia vain 31–35

km/h. Jyrkässä kaarteessa mitattu profiili 1 ei kulunut enempää kuin suoralla katuosuudella mitatut profiilit. Kokonaisuutena Veturitien mittaustuloksia on pidettävä melko luotettavina ja informatiivisina.

Töölönkatu ei kulunut käytännössä lainkaan niiden profiilien (2 ja 3) poikkileikkauksilta, jotka ylitetään yleisesti tasaisella hyvin alhaisella ajonopeudella. Kuluminen oli havaittavampaa profiileissa 1 ja 4, koska ne liittyivät yleisiin ajoneuvon liiketilan muutoksiin suojatien, pyörätaskun ja valo-ohjatun liittymän edessä. Vuonna 2011 rakennetun pyöräkaistan takia osa Töölönkadulla mitatuista profiileista oli erikoisen muotoisia. Kokonaisuutena Töölönkadun mittaustuloksia ajonopeuden ja ajoneuvon liiketilan muutosten vaikutuksista kulumiseen ei voida pitää täysin luotettavina, koska profiileja oli yhteensä vain neljä, ja ne oli mitattu ajonopeuden muutosten osalta keskenään erilaisista poikkileikkauksista.

9.3. Onko urautuminen taajama- ja maantienopeuksien välillä erilaista?

Tutkimustulosten perusteella taajamaliikenteessä ja -nopeuksissa ei ole olemassa mitään sellaista urautumismekanismia, joka ei voisi esiintyä myös maantieliikenteessä. Toisaalta kaikki taajamien ulkopuolella urautumista aiheuttavat tekijät aiheuttavat urautumista myös taajamissa. Eri urautumismekanismien kvalitatiivinen suhteellinen osuus taajama- ja maantieliikenteen välillä eroaa toisistaan taulukossa 14 sivulla 90 esitetyn tavoin.

PTM-mittausten ja empiiristen urasyvyysmittausten tuloksista on tehtävissä päätelmät, jotka vahvistavat seuraavia kirjallisuuteen perustuvia teorioita tai tuovat esille urautumisen ilmiöitä, joita ei ollut käsitelty kirjallisuustutkimuksessa:

- Urautuminen keskittyy taajamissa selvästi kapeampiin ajouriin kuin maanteillä. Syynä tähän voi olla se, että kaupunkitilassa ja taajamanopeuksilla ajokaistat ovat usein selvästi kapeampia kuin korkeiden nopeusrajoitusten maanteillä. Myös kaupunkiväylien ajokaistojen reunoilla tyypillisesti esiintyvät kevyen liikenteen väylät ja reunakivet vaikuttavat autoilijoiden ajolinjoihin.
- Taajamaväylillä, joilla raskaan liikenteen ja erityisesti ajoneuvoyhdistelmien osuus on huomattavasti keskimääräistä korkeampi, deformaatio on suurin yksittäinen urautumiseen vaikuttava tekijä myös sellaisissa kohteissa, joissa liikenne ei yleensä pysähdy eikä liiku erittäin alhaisella nopeudella.
- Liittymäalueilla olevat syvemmät urat johtuvat ensisijaisesti deformaatiosta. Ajoneuvon liiketilan muutosten vaikutus nastarengaskulumiseen voi urasyvyysmittausten perusteella olla odotettua pienempi. Mittauspisteissä, joissa pysähtyvien ja liikkeelle lähtevien tai voimakkaasti kiihdyttävien/hidastavien ajoneuvojen osuus oli yli 50 %, kuluminen oli noin kaksinkertaista verrattuna

tasaiseen 30–40 km/h ajonopeuteen ja lähes yhtä suurta kuin tasaisella 60 km/h ajonopeudella.

- Päällysteen maksimiurasyvyys kasvoi 1990-luvun kotimaisissa urautumis-tutkimuksissa maantienopeuksilla KVL:aa kohti yhdessä talvessa noin 50–150 % enemmän kuin tässä tutkimuksessa Helsingin kaduilla tehdyissä urasyvyysmittauksissa. Vastaavissa tutkimuksissa urien poikkipinta-alan muutos maanteilla oli 80–200 % suurempi kuin taajamanopeuksissa. Tutkimusten aikaan päällysteiden kulumisen arvioidaan olleen ajoneuvo- ja rengasteknisten muuttujien suhteen 20–40 % voimakkaampaa kuin 2010-luvulla. Vastapainoksi aikaisemmissa mittauksissa haja-asutusalueilla ja sisämaassa tutkitut valtatiet ovat olleet lumi- ja jääpeitteisiä huomattavasti suuremman osan talvesta kuin Helsingin vilkasliikenteiset kadut talvella 2011–12, mikä on kompensoinut ajoneuvo- ja rengastekijöiden vaikutusta.

9.4. Tulosten luotettavuus ja yleistettävyys

Tutkimustulosten perusteella voidaan arvioida luotettavasti ja tehdä yleistys, että nastarenkaiden vaikutus päällysteiden kulumiseen on jokseenkin suoraan verrannollinen ajonopeuteen myös alle 60 km/h nopeuksissa. Täten päällysteiden kulumisen taajamanopeuksissa on myös huomattavasti vähäisempää kuin maantienopeuksissa, esimerkiksi 80 km/h nopeudella ajettaessa tiet kuluisivat noin 100 % nopeammin kuin kadut 40 km/h nopeudella ajettaessa. Laserprofilometrillä tehdyissä urasyvyysmittauksissa ilmastolliset ja tien pinnan tilaan liittyvät mittausolosuhteet mittaushetken välillä olivat tämän yleistyksen tekemiseksi riittävän lähellä toisiaan, ja urautumiseen vaikuttavat liikenteelliset taustatekijät olivat tiedossa riittävän yksityiskohtaisesti.

Tutkimustulosten perusteella voidaan tehdä suuntaa-antavia arvioita nastarenkaiden aiheuttaman kulumisen vaikutuksesta päällysteen käyttöikäen ja osuudesta kokonaisurautumiseen. Jotta nämä arviot olisivat tarkkoja ja luotettavia, pitäisi urasyvyysmittaukset tehdä täsmälleen samoista mittaushetkistä kaksi kertaa vuodessa useana peräkkäisenä vuotena, koska ilmastollisten tekijöiden vaikutusta eri urautumismekanismiin täytyisi pystyä tarkastelemaan samoissa mittaushetkissä pidemmällä aikavälillä kuin yhtenä talvena.

Laserprofilometrillä tehdyissä urasyvyysmittauksissa otoskoko oli riittämätön osassa mittaushetkistä. Jos samasta mittaushetkestä mitattiin viisi profiilia sellaisista paikoista, jotka liikenne ylittää yleensä tasaisella nopeudella, oli otoskoko kohteessa tasaisella nopeudella ajettaessa ilmenevän nastarengaskulumisen määrittämiseksi riittävä. Jälkikäteen tulosten luotettavuutta heikentäväksi tekijäksi havaittiin, että osasta kohteita mitattujen 4–5 poikkiprofiilin joukossa oli tarkoituksella 1–3 sellaista profiilia, joita liikenne ei ylittänyt yleensä tasaisella

nopeudella. Viimeksi mainittujen profiilien tarkoituksena oli etsiä eroja nastarenkaiden aiheuttamalle kulumiselle ajoneuvon liiketilan muutosten ja tasaisen ajonopeuden välillä. Kyseisiä eroja löytyikin kvalitatiivisesti tyydyttävällä tarkkuudella, mutta jos tällaisissa mittauskohteissa esiintyi selvää hajontaa tai mittausvirhe yhdessäkin jäljelle jääneessä tasaisella nopeudella ylitetyssä profiilissa, alkoi mittauskohteen tulosten tilastollinen merkittävyys heikentyä, kuten tapahtui Meilahdentien mittaustulosten kohdalla. Tulosten luotettavuuden parantamiseksi kohteissa, joissa haluttiin tutkia ajoneuvon liiketilan muutosten vaikutusta, olisi pitänyt mitata enemmän profiileja sekä tasaisella nopeudella että liittymien, hidastetöyssyjen ja suojateiden vaikutuspiirissä.

Kerran vuodessa tehtävien PTM-mittausten avulla ei voida luotettavasti vastata tutkimuskysymyksiin. Osittain tässä tutkimuksessa analysoitujen PTM-mittaus-tulosten selittävyttä heikensi myös se, että ilmeisesti jotkin nastarengaskulumista selittämään valitut muuttujat olivat koko vuoden urautumista tarkasteltaessa toistensa komplementteja: Esimerkiksi ajonopeuden kasvu yleensä lisää nastarengaskulumista ja vähentää deformaatiota.

Jotta PTM-mittaustuloksista voitaisiin luotettavasti arvioida nastarenkaiden vaikutusta päällysteiden kulumiseen, tulisi mittaukset tehdä kaksi kertaa vuodessa vastaavina vuodenaikoina kuin tässä tutkimuksessa tehdyt empiiriset urasyvyysmittaukset laserprofilometrillä. Siinäkin tapauksessa PTM-mittaus soveltuu parhaiten kulumisen arvioimiseen urasyvyyden muutosten keskiarvoina väylä- ja verkkotasolla, koska yksittäisten profiilien mittauksissa PTM-mittausten tarkkuus ja toistettavuus ovat selvästi heikompia kuin laserprofilometrimittausten.

9.5. Tulosten arviointi nastarenkaiden käytön rajoittamistarpeen kannalta

Nastarenkaiden käytön rajoittaminen taajamanopeuksissa vähentäisi kulumisen aiheuttamaa päällysteiden ylläpitotarvetta selvästi vähemmän kuin yhtä suuri vähennys nastarenkaita käyttävien ajoneuvojen lukumäärässä yhtä vilkkaasti liikennöidyllä maantiellä. Päällysteen ylläpitotarpeen määrittävä urasyvyys kasvaa taajamissa urien poikkipinta-alaan ja massamääräiseen kulumiseen verrattuna urien kapean poikkileikkauksen takia huomattavasti nopeammin kuin maanteilla, minkä ajonopeuteen verrannollisten nastan päällystettä vahingoittavien voima-komponenttien alhaisuus taajamanopeuksissa kompensoi.

Jos suurissa kaupungeissa kuten Helsingissä päädyttäisiin rajoittamaan nastarenkaiden käyttöä käyttäen perusteena kulumisen aiheuttamaan päällysteiden ylläpitotarvetta, saataisiin rajoituksista merkittävin hyöty väylillä, joiden nopeusrajoitus on vähintään 60 km/h tai päällyste liikennemelua alentava. Myös väylillä, joissa liikenne keskittyy ajoradan geometrian tai poikkileikkauksen takia

poikkeuksellisen voimakkaasti kapeisiin ajouriin, voitaisiin saavuttaa merkittäviä säästöjä päällysteiden ylläpitokustannuksissa rajoittamalla nastarenkaiden käyttöä.

Kirjallisuustutkimuksen tulosten perusteella LVM asetuksen 466/2009 mukaisesti nastarengasmääräykseen siirtyminen on vähentänyt päällysteiden kulumista maantienopeuksissa suhteellisesti enemmän kuin taajamanopeuksissa, koska nastojen lukumäärä vaikuttaa kulumiseen enemmän korkeissa ajonopeuksissa. Päällysteiden kuluminen taajamissa vähenisi nastojen ja nastarenkaiden ominaisuuksiin kohdistuvien määräysten suhteellisesti enemmän, jos nastojen massa kohdistuvia määräyksiä tiukennettaisiin.

Päällysteiden massamääräisen kulumisen ja oletettavasti päällysteen pinnasta emissoituvan katupölyn määrä on lähes suoraan verrannollinen ajonopeuteen myös taajamanopeuksissa. Tästä syystä nastarengaskulumisen aiheuttamalle pölyllekin joutuvat eniten altistuneiksi ne ihmiset, joiden säännöllinen asuin- tai olinpaikka on lähellä vilkasliikenteistä maantietä, jonka nopeusrajoitus on korkea.

Yleistettäessä katupölyongelmaa yksilöiden näkökulmasta yhteiskunnalliseksi ongelmaksi on nastarenkaiden aiheuttama katupöly suurin ongelma taajamissa kahdestakin syystä: Kaupunkien kaduilla katupölyn lähteiden välittömässä läheisyydessä asuu ja liikkuu maantieympäristöön verrattuna moninkertainen määrä katupölylle altistuvia ihmisiä, ja taajamanopeuksissa liukkaudentorjunnassa käytetään yleisesti hiekoitushiekkaa, joka moninkertaistaa katupölyn vaikutuksen sekä suoranaisesti pölyämällä että hiekkapaperiefektin kautta.

Tässä tutkimuksessa tehtyjen urasyvyysmittaustulosten mukaan ajourien poikkipinta-ala kasvoi nastarenkaiden vaikutuksesta talven 2011–12 aikana eri mittauskohteissa 3,8–24,7 cm²/ ajokaista. Jos kadun pinnassa olevan asfaltin kulutuskerroksen ominaistilavuuspaino on noin 2,5 Mg/m³, kuluisi päällystettä tutkimustulosten perusteella esimerkiksi yhden kilometrin matkalta Kuusisaarentieltä molemmista ajosuunnista, kun yhden ajosuunnan pinta-alamuutos on 21,8 cm²:

$$2 * 1000m * 21,8 * 10^{-4} m^2 * 2,5 Mg / m^3 = 1090 \text{ kg}; \quad (\text{kaava 8.})$$

missä

2 = ajosuuntien lukumäärä

1000 m = ajomatka

21,8*10⁻⁴ m² = yhden ajosuunnan pinta-alamuutos neliömetreinä

2,5 Mg/m³ = asfaltin kulutuskerroksen ominaistilavuuspaino

Jos 30 % nastarenkaan kuluttamasta kiviaineksesta ja mastiksista on PM₁₀ -hiukkasia, muodostuisi yhden talven aikana kaavan 8 esimerkkitapauksessa 327 kg PM₁₀-hiukkasia yhtä Kuusisaarentien katukilometriä kohti.

On selvää, että jos edellä esitetyllä tavalla katukilometriltä muodostuvat PM_{10} -hiukkaset pääsisivät kokonaisuudessaan hengitysilmaan, olisivat hiukkaspitoisuudet haitallisen korkeita myös pitkälle aikavälille ja suureen ilmatilaan jaettuina. Tässä tutkimuksessa ei oteta kantaa siihen, kuinka hyvin arvio 30 % nastarenkaiden kuluttamien partikkeleiden yhteydestä PM_{10} määrään pitää paikkansa, ja kuinka suuri osa näistä partikkeleista pääsee hengitysilmaan. On kuitenkin syytä olettaa, että Ruotsin ja Norjan nastarengasrajoituksissa perusteena käytetty katupölyongelma olisi päällysteiden kulumisen seurauksista relevantimpi indikaattori rajoitusten asettamiselle kuin tämän tutkimuksen taustana esitetty katujen ylläpitotarve.

10. Yhteenveto ja suositukset

10.1. Yhteenveto

Tie- ja katupäällysteisiin muodostuvat ajourat aiheuttavat välitöntä haittaa liikenneturvallisuudelle ja liikenteen käyttäjien kokemalle väylän palvelutasolle. Vilkasliikenteisillä teillä ja kaduilla päällysteen käyttöiän määrittää tavanomaisesti se, että ajouran syvyys saavuttaa toimenpiderajan. Sekä urasyvyydellä että urien poikkipinta-alalla mitattava urautuminen on taajamissa yhtä monen tekijän summa kuin maanteillä, vaikka urautumismekanismien keskinäiset osuudet kokonaisurautumisesta ovat eri liikenneympäristöissä erilaisia. Nastarenkaiden aiheuttaman kulumisen määrän ja osuuden erottaminen kaikkien urautumismekanismien aiheuttamasta kokonaisurautumisesta vaatii laaja-alaisia taustatietoja liikenteen ja väylän ominaisuuksista sekä tutkimusten aikaan vallinneista ilmasto-oloista.

Nastarenkaisiin kohdistuvilla määräyksillä pyritään vähentämään nastarenkaiden käytöstä aiheutuvia haittoja, joista tunnetuimpia ovat päällysteiden kulumisen ja Pohjoismaissa paljon esillä ollut katupöly. LVM asetuksen 466/2009 mukaisilla nastarengasmääräyksillä on pyritty vähentämään liikenteessä olevien autojen massan ja rengaskokoon sidotun nastamäärän kasvun aiheuttamaa päällysteiden kulumisen lisääntymistä. Tutkimuksen kirjallisuusosion perusteella nastarengasmääräysten uudistaminen on vähentänyt kulumista maanteillä suhteellisesti enemmän kuin taajamissa, koska LVM 466/2009 asetuksella tarkemmin rajoitetun nastojen lukumäärän on arvioitu vaikuttavan kulumiseen enemmän korkeissa ajonopeuksissa, ja nastojen sallittu paino säilyi määräysten uudistuksessa ennallaan.

Nastarenkaat kuluttavat päällysteitä taajamanopeuksissa vähemmän kuin maanteillä, koska ylivoimaisesti suurin osa nastan tiekosketuksen päällystettä vahingoittavista komponenteista perustuu ajonopeuden neliöön verrannolliseen liike-energiaan tai ajonopeuteen suoraan verrannolliseen liikemäärään. Taajamissa muodostuu silti useisiin paikkoihin syviä ajouria lähes yhtä lyhyessä ajassa kuin maanteillä, koska päällysteen deformaatio on voimakasta kohteissa, joissa raskaat ajoneuvot liikkuvat hitaasti ja pysähtelevät. Myös taajamille ja alhaisten nopeusrajoitusten väylille tyypillisistä kapeista ajokaistoista, reunakivistä ja kevyen liikenteen järjestelyistä johtuva liikenteen keskittyminen samoihin kapeisiin ajouriin lisää urasyvyyden muutoksesta mitattavaa urautumista taajamissa, vaikka päällysteen kvantitatiivinen massamääräinen kulumisen onkin suhteellisesti huomattavasti vähäisempää kuin maanteillä.

Urien poikkipinta-ala havaittiin empiirisissä urasyvyysmittauksissa paremmin kulumista selittäväksi muuttujaksi kuin urasyvyyden muutos. Laserprofilometrillä mitattujen mittaustulosten perusteella rakennetuissa lineaarisissa regressiomalleissa urien poikkipinta-alan muutosta selittivät parhaiten liikenteen keskinopeus, keskivuorokausiliikenne ja ajoneuvon liiketilän muutokset, jotka olivat kaikki suoraan verrannollisia päällysteen kulumiseen. Päällystekiviaineksen maksimiraekoko oli

lievästi kääntäen verrannollinen mitattuun kulumiseen, mutta sitä vastoin päällysteen massatyypillä ei ollut selvää yhteyttä kulumiseen. Jälkimmäistä on pidettävä yllätyksenä, sillä SMA-päällysteet on kehitetty nimenomaan nastarengaskulutusta hyvin kestäviksi, ja aikaisemmissa kotimaisissa tutkimuksissa ja urautumismalleissa oli saatu selviä eroja eri massatyyppien kulumisen välillä. Toisaalta mittauskohteiden vähäisyys ja AB-päällystettyjen mittauskohteiden mittaustulosten suuri hajonta estävät aikaisemmin massatyyppin vaikutuksesta kulumiseen esitettyjen tulosten kyseenalaistamisen.

Koska tutkimuksessa tehtiin empiirisiä mittauksia vain yhtenä syksynä ja keväänä, ei tulosten perusteella voida tehdä luotettavaa kvantitatiivista arviota siitä, kuinka suuri osa eri mittauskohteiden vuosittaisesta tai elinkaaren aikaisesta kokonaisurautumisesta on peräisin nastarenkaiden aiheuttamasta kulumisesta. Tämän arvioimiseksi mittaukset tulisi tehdä samoista mittauskohteista useana vuonna peräkkäin, jotta ilmastollisten tekijöiden vaikutusta urautumiseen eri vuodenaikoina pystyttäisiin vertailemaan. Kvalitatiivisesti voidaan arvioida, että tämän tutkimuksen empiiristen urasyvyysmittausten välissä ollut talvi 2011–12 oli Helsingissä nastarengaskulumisen kannalta huomattavasti keskimääräistä vaikeampi, joten on arvioitavissa, että suhteellisesti eniten nastarengaskulumisesta urautuvien katujen vuosittaisesta kokonaisurautumisesta noin 2/3 aiheutuisi nastarenkaista. Kaduilla, joilla deformaatio on raskaan liikenteen määrän takia voimakasta, on nastarengaskulumisen osuus vuosittaisesta kokonaisurautumisesta selvästi alle 50 %.

Osassa aikaisempia tutkimuksia esitetty teoria nastan hiertovaikutuksen aiheuttaman kulumisen lisääntymisestä alhaisissa nopeuksissa voidaan kyseenalaistaa tämän tutkimuksen empiirisen osion tulosten perusteella. Mahdollisia syitä tähän voivat olla liikenteessä yleisesti käytettävien nastarenkaiden muuttuminen matalaprofiilisemmiksi, nastojen painon vähenemisen vaikutus kulumiseen alhaisissa nopeuksissa sekä laboratorio-oloissa testipalojen ylityksissä ilmenevien kulumiskomponenttien eriytyminen todellisesta liikenneympäristöstä satojen tuhansien ylityskertojen ja nastarengaskauden vaihtelevien sääolosuhteiden aikana.

10.2. Toimenpide-ehdotukset ja jatkotutkimustarve

Tutkimuksen perusteella suositellaan, että lisäselvitykset nastarenkaiden käytön rajoittamisesta kaupunkiseuduilla tulee päällysteiden ylläpitotarve perusteena ensisijaisesti kohdistaa sellaisiin toimenpiteisiin, joilla suurin vähennys nastarenkaita käyttävässä liikenteessä tapahtuisi väylillä, joiden nopeusrajoitus on vähintään 60 km/h tai päällyste liikennemelua alentava. Nastarenkaiden käytön vähentäminen edellä mainituilla väylillä vähentäisi päällysteiden kulumista merkittävästi, koska ajonopeuden kasvu lisää nastarengaskulumista, ja useat liikennemelua alentavat päällysteet kestävät nastarengaskulumista tavanomaista heikommin alhaisissa ajonopeuksissa. Jos NASTA-

tutkimusohjelmaan liittyvien ilmanlaatututkimusten perusteella päädytään harkitsemaan nastarenkaiden käytön rajoittamista Helsingissä katupölyn takia, voi tässä tutkimuksessa esitettyä teoriaa päällysteen massamääräisestä kulumisesta katukilometriä ja liikennemäärää kohti arvioida uudelleen eri asiayhteydessä.

Tutkimuksen perusteella suositellaan tehtäväksi seuraavia jatkotutkimuksia:

1. Jotta nastarenkaiden aiheuttaman kulumisen osuus katujen urautumisesta voidaan määrittää tarkemmin, tulisi urasyvyysmittauksia Helsingin kaduilla jatkaa kaksi kertaa vuodessa vähintään kahden vuoden ajan. Tämä vähentäisi havaintojen lukumäärästä ja ilmastollisten tekijöiden vuosittaisesta vaihtelusta johtuvaa tulosten tilastollista epävarmuutta.
2. Kevyempien nastojen ja liukuasteiden tutkimus- ja kehitystyötä tulee jatkaa. Nastan massa voi vaikuttaa kulumiseen taajamanopeuksissa suhteellisesti enemmän kuin maantienopeuksissa.
3. Liikenneympäristössä ja laboratoriossa tapahtuvien urautumis- ja kulumismittausten painopistettä tulee siirtää nopeusalueelle 0–60 km/h. Laboratoriomittauksia tulee suorittaa myös vaihtoehtoisilla mittausten menetelmillä, joilla voidaan arvioida kastellulla radalla tehtyjen yliajo- ja ympyräatakokeiden luotettavuutta, ja jotka validoidaan liikenneympäristössä tapahtuvien vertailumittauksin.
4. Nastarenkaita käyttävän ajoneuvon liiketilan muutosten vaikutusta päällysteiden kulumiseen tulee tutkia lisää. Tämän määrittämiseksi tarvitaan yksittäisen ajoneuvon aiheuttama suhteellinen kuluma erilaisilla pitkittäis- ja sivuttaiskiihtyvyyden arvoilla. Liikennevirran aiheuttaman kuluma voidaan arvioida esimerkiksi simuloimalla hidastavien, pysähtyvien ja kiihdyttävien autojen osuus risteysalueella sekä validoimalla malli liikenneympäristössä tehtävin mittauksin.
5. Tutkia, kuinka renkaan pintapaineen suuruus ja pintapainejakauma vaikuttavat kosketusalalla olevan nastan pistovoimaan ja liikkeeseen. Nastaiskukokeessa syntyneitä nastajälkiä tulisi tutkia kolmiulotteisesti mittaamalla jäljen syvyys ja yhden nastaiskun irrottama materiaalin määrä eri hiertopituuksilla ja iskujäljen pinta-aloilla.
6. Nastarenkaat kuluttavat myös tiemerkintöjä, joiden informaatioarvo taajamissa on suuri. Nastarenkaiden vaikutusta tiemerkintöjen kulumiseen ja ylläpito-tarpeeseen on syytä tutkia sekä laboratorio-oloissa että liikenteessä.

11. Lähteet

Adlercreuz, O. Fler dubbdäcksförbud att vänta. Teknikens Värld 15.07.2011. [Verkkolehti] <http://www.teknikensvarld.se/nyheter/110715-dubbdacksforbud/index.xml> [sivulla käyty 18.8.2011]

Aksnes, J. 2009. Environmentally Friendly Pavements Final report. Statens Vegvesen Teknologirapport nr. 2578. Statens Vegvesen, Oslo, Norway.

Amundsen, A. og Rydningen, U. 2002. 80 % piggfritt i Drammen innen 2004? Resultater fra en spørreundersøkelse i Drammen, og 5 nabokommuner. Oslo, Transportøkonomisk institutt. TØI rapport 570/2002.

Autoliitto. Nastarenkaiden käyttö Euroopassa. <http://www.veronmaksajat.fi/File/37040548-ae6e-4dd4-9e91ce510cc723b8/Euroopan%20nastarengass%C3%A4%C3%A4nn%C3%B6t.pdf> [sivulla käyty 3.8.2011]

Belt, J., Ehrola, E., Lämsä, V. P., Savolainen, M. 2002. Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto. Tiehallinnon selvityksiä 15/2002. 72 s. ISBN 951-726-881-5, ISSN 1457-9871, TIEH 3200747.

Berg, T. 2008 Sju år med piggdekkgebyr. Trondheim Kommune miljøenheten.

Chatterjee, S.; Hadi, A.; and Price, B. "Simple Linear Regression." Ch. 2 in *Regression Analysis by Example, 3rd ed.* New York: Wiley, pp. 21-50, 2000.

Destia. 2009. Helsingin kaupungin asfalttipäällysteiden kuntomittauspalvelut 2009-2011.

European Tyre School. 1999. Module 10 - Truck tyre behavior in use and testing methods. Nokian Tyres plc., Finland. https://www.tut.fi/plastics/tyreschool/moduulit/moduuli_10/index.html [sivulla käyty 29.8.2011]

Fridstrøm, L. 2000. Piggfrie dekk i de største byene. Oslo, Transportøkonomisk institutt. TØI rapport 493/2000.

Frith, D., Morian, D., Saboundjian, S., Stoffels, S. 2004. Hard Aggregate Resistance to Studded Tires - Alaskan Experience. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1874, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2004, pp. 19-28. ISSN 0361-1981.

Garba, R. 2002. Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures. Department of Road and Railway Engineering, Norwegian University of Science and Technology NTNU.

Göransson, N-G. 2009. Beläggningsslitage vintern 2007/2008 på högtrafikerade vägar i Stockholmsområdet. VTI notat 2-2009, Linköping, Sverige.

Hellman, T. 2009. Liikenteen sujuvuus Helsingissä vuonna 2009. Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston julkaisuja 2009:7

Hellman, T., Lilleberg, I. 2011. Liikenteen kehitys Helsingissä vuonna 2010. Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston julkaisuja 2011:2

Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirasto. 2005. Nopeusrajoitukset Helsingissä. Helsinki suunnittelee 2005:7. ISSN 0787-9075.

Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirasto. 2011. Liikennemäärät Helsingin pääkatuverkossa syyskuu 2010,. <http://www.hel2.fi/ksv/Aineistot/Liikennesuunnittelu/Liikennetutkimus/Liikennemaarat.pdf> [sivulla käyty 15.6.2011]

Helsingin kaupungin Rakennusviraston julkaisut. 2008. Melua vaimentavien päällysteiden käyttö Helsingin kaupungin katuverkolla. Katu- ja puisto-osasto, Helsinki.

Ilmatieteen laitos. 12/2011-4/2012. Ilmastokatsaukset joulukuu 2011 - huhtikuu 2012. ISSN 1239-0291.

Jacobson, T. 2007 Undersökning av beläggningsslitage vintern 2006/2007 i Stockholm. VTI notat 23-2007, Stockholm, Sverige.

Jacobson, T., Wiklund, M., Wågberg, L., Öberg, G. 2005. Prediction models for pavement wear and associated costs. Winter tyres – traffic safety. Linköping, Sverige. VTI publikationer 366A. ISSN 1102-626X.

Jacobson, T., Wågberg, L. 2007. Utveckling och uppgradering av prognosmodell för beläggningsslitage från dubbade däck samt en kunskapsöversikt över inverkande faktorer, VTI-notat 7/2007, Linköping, Sverige.

Kelkka, M., Hyyppä, I., Raitanen, N., Sainio, P., Valtonen, J. 2003. Hiljaiset päällysteet – tuotevaatimukset ja mittarit. Teknillisen korkeakoulun tielaboratorion julkaisuja. TKK-TIE-A-55.

Kilaeski, W. P., Mannering, Fred L., Washburn, Scott S. 2004. Principles of Highway Eng-ineering and Traffic Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 3. ed. USA. ISBN 0-471-47256-5.

Koisaari T. & Tuononen A. 2010. Ajoneuvon dynamiikka osa 1: rengas. Espoo Otaniemi, autolaboratorio konetekniikan osasto. TKK. ISBN 978-951-9155-25-8.

Kupiainen, K.J. 2009. Road dust from pavement wear and traction sanding. Finnish Environment Institute, Finland, Helsinki. ISBN 978-952-11-2555-3.

Kupiainen, K.J., Pirjola, L. 2011. Vehicle non-exhaust emissions from the tyre-road interface – effect of stud properties, traction sanding and resuspension. *Atmospheric Environment* 45 (2011), s. 4141-4146.

Kurki, T. 1998. Asfalttipäällysteiden urautumisen mallintaminen. ASTO-koeteiden tulosten 1990-1997 analysointi. Tielaitoksen selvityksiä 13/1998. ISBN 951-726-419-4.

Laaksonen, R., Törnqvist, J. 2004. Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa. Tiehallinnon selvityksiä 57/2004.

Lampinen, A. 1993. Kestopäällysteiden urautuminen, TKK-DISS-870 Espoo, VTT 1993. VTT julkaisuja, ISSN 1235-0613.

Liikenneministeriön asetus (1256/1992) ajoneuvojen rakenteesta ja varusteista. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1992/19921256> [sivulla käyty 29.8.2011]

Liikenneministeriön asetus (304/1996) ajoneuvojen rakenteesta ja varusteista annetun asetuksen 37 ja 38 §:n muuttamisesta. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1996/19960304> [sivulla käyty 29.8.2011]

Liikenne- ja viestintäministeriön asetus (408/2003) ajoneuvon renkaiden nastoista. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2003/20030408> [sivulla käyty 29.8.2011]

Liikenne- ja viestintäministeriön asetus (466/2009) ajoneuvon renkaiden nastoista annetun liikenne- ja viestintäministeriön asetuksen muuttamisesta. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090466> [sivulla käyty 29.8.2011]

Liikennevirasto tiedote 24.3.2011. Tieliikenteen suoritteet 2010.

Lopez A., Steen R. Prediction of tyre/road contact stress distributions. DCT report, Eindhoven University of Technology. Eindhoven, August 2007. DCT 2007.106

Lämsä, V. P. 2005. SOP teiden ylläpito. Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito – tutkimusohjelma, Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 39/2005.

Malkki M., Niemi J., Lounasheimo J., Myllynen M., Julkunen A., Loukkola K. 2010. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2009. HSY Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä.

Malmivuo, M., Luoma, J., Pullinen, M. 2010. *Talvirenkaiden kunnan kehittyminen 2001-2010*. [Verkkodokumentti]. VTT Tiedotteita 2554. 41 + 11 s. [sivulla käyty

7.10.2011]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2554.pdf>. ISSN 1235-0605 (painettu). ISBN 978-951-38-7657-9 (painettu).

Milliken, W. & Milliken, D. 1995. Race Car Vehicle Dynamics. SAE Publications R-146, Warrendale, US. ISBN 978-1560915263

Nordström, O., Wallman, C-G., Wiklund, M., Wrestling, P., Öberg, G. 2000. Tunga fordons däckanvändning effekter vid is/snöväglag. VTI meddelande 884, Linköping, Sverige. ISSN 0347-6049.

Prittinen, P. 2011. Nastarenkaiden käyttö Helsingin kantakaupungissa. Kandidaatintyö, Aalto-yliopisto Insinööritieteiden korkeakoulu.

Päällystealan neuvottelukunta PANK. 2000. Asfalttinormit 2000.

Päällystealan neuvottelukunta PANK. 2008. Asfalttinormit 2008.

Repo, H. 2006. Betonitiet jäivät Suomessa kokeiluksi. Tekniikka ja talous -lehti 17.8.2006. Talentum, Helsinki. ISSN 0785-997X.

Sainio, S. 2011. Asfalttipäällysteiden alku-urautuminen. Diplomityö, Aalto-yliopisto Insinööritieteiden korkeakoulu.

Salaani, M.K. 2009. Analytical analysis of tyre forces as a function of normal pressure distributions. Int. J. Heavy Vehicle Systems, Vol. 16, Nos. 1/2, 2009. ISSN 1744-232X

Salen, J. 2009 Förslag på regleringar för begränsning avdubbdäcksanvändning. Redovisning av uppdrag. Stockholms Stad Trafikkontoret.

Solla, A., Unhola, T., Vesala, H. 2004. Nastarens kuluttavuus yliajokokeessa ja imurimenetelmällä. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 12/2004, Helsinki 2004. ISBN 951-723-878-9.

Suomen Kuntaliitto & VTT Yhdyskuntatekniikka. 1999. Katupäällystetutkimukset 1999 – koekohteiden seuranta. Katurakenteet ja -päällysteet –tutkimusohjelma.

Svensson, B. 2010. Nu gäller dubbdäckförbud. Göteborgs-Posten 1.10.2010, <http://www.gp.se/nyheter/goteborg/1.458935-nu-galler-dubbdacksforbud> [sivulla käyty 18.8.2011]

Thom, N. 2008. Principles of Pavement Engineering, Thomas Telford Publishing, UK. ISBN 978-0-7277-3480-8.

Tiehallinto. 2009. Nopeusrajoitukset, suunnitteluvaiheen ohjaus. ISBN 978-952-221-276-4.

Tiehallinto. 2005. Ura- ja sivukaltevuustunnusluvun määrittäminen kuntovastuurakkaan. Tiehallinto, Asiantuntijapalvelut. Tiehallinnon selvityksiä 40/2005. ISBN-951-803-542-3.

Tiehallinto. 2005. Tieomaisuuden yhtenäinen kuntoluokitus. Tiehallinto, Asiantuntijapalvelut. Tiehallinnon selvityksiä 57/2005, ISBN 951-803-617-9

Tielaitos. 1997. Päällysteiden suunnittelu. Helsinki, Oy Edita Ab. 46 s. + liitt. 1s.

Tielaitos. 2000. Asfalttipäällysteiden deformatumisen vähentäminen. Tielaitoksen selvityksiä 36/2000.

Unhola, T. 2008. Nastojen ja nastarenkaiden hyväksymisvaatimusten muutostarpeet. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 51/2008, Helsinki 2008. ISBN 978-952-201-653-9.

Unhola, T. 2004. Nastarenkaiden kuluttavuus. Ajoneuvotekijöiden vaikutus. Yliajokoe. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 72/2004, Helsinki 2004. ISBN 978-952-201-228-9.

Vestola, E., Pohjanne, P., Carpen, L., Kaunisto, T., Ahlroos, T. 2006. Kalsiumkloridin käytön sivuvaikutukset. Tiehallinnon selvityksiä 38/2006.

Villiers, C., Roque, R., Dietrich, B. 2005. Interpretation of transverse profiles to determine the source of rutting within an asphalt pavement system. Transportation Research Record Issue 1905, 2005, pp. 73-81. ISSN 0361-1981.

VTT. 1987. Nastan muodon ja painon vaikutus tien päällysteen kulumiseen. VTT Tie- ja liikennelaboratorio tutkimusselostus 624, 1987

Vuorinen, J., Kurki, T., Alkio, R. 1998. Kiviaineksen raemuodon vaikutus SMA-päällysteen kulutuskestävyyteen. Tielaitoksen selvityksiä 37/1998. ISBN 951-726-259-3.

White, T. D. et al. 2002. Contributions of pavement structural layers to rutting of hot mix asphalt pavements. Washington (DC), National Academy Press. ISSN 0077-5614.

Williams, R. I. T. 1986. Cement-treated Pavements Materials, Design and Construction. Elsevier Applied Science Publishers, UK. ISBN 1-85166-018-6.

Zubeck, H., Aleshire, L., Harvey, S., Porhola, S., Larson, E. 2004. Socio-Economic Effects of Studded Tires Use in Alaska – Final Report. University of Anchorage, Alaska

LIITTEET

LIITE 1.

Table 1
Average test results, standard deviation and studded to studless ratio (S/N) by test track section, speed and tyre.

Test tyre (% of studs in place)	# of studs per tyre	Test section	Driving speed of the measurement vehicle							
			Speed 40 km h ⁻¹		Speed 50 km h ⁻¹		Speed 60 km h ⁻¹		Speed 70–90 km h ⁻¹	
			PM ₁₀ [µg m ⁻³] ^a	S/N ^b	PM ₁₀ [µg m ⁻³] ^a	S/N ^b	PM ₁₀ [µg m ⁻³] ^a	S/N ^b	PM ₁₀ (µg m ⁻³)	S/N ^b
Reference tyre (No studs)	0	Straight stretch 1	650 (209)		884 (383)		1097 (390)		2574 (492)	
		Curve 1	560 (146)		730 (180)		961 (204)		2132 (614)	
		Straight stretch 2	498 (144)		682 (157)		907 (372)		2437 (816)	
		Curve 2	1033 (251)		1224 (348)		1460 (529)		2769 (580)	
Studded tyre (50% van studs)	55	Straight stretch 1	726 (168)	1.12	1229 (164)	1.39	1652 (408)	1.51	3559 (759)	1.38
		Curve 1	697 (252)	1.24	1106 (86)	1.52	1668 (384)	1.74	3890 (1273)	1.82
		Straight stretch 2	630 (126)	1.26	968 (155)	1.42	1540 (184)	1.70	4505 (1354)	1.85
		Curve 2	1099 (181)	1.06	1619 (285)	1.32	2305 (732)	1.58	4165 (667)	1.50
Studded tyre (100% van studs)	110	Straight stretch 1	687 (170)	1.06	1222 (316)	1.38	2652 (436)	2.42	5796 (1460)	2.25
		Curve 1	770 (71)	1.37	1497 (201)	2.05	2573 (139)	2.68	5961 (1723)	2.80
		Straight stretch 2	848 (114)	1.70	1391 (155)	2.04	2247 (390)	2.48	7911 (1764)	3.25
		Curve 2	1057 (263)	1.02	2101 (408)	1.32	4032 (656)	2.76	7862 (882)	2.84
Studded tyre (100% light weight studs)	110	Straight stretch 1	609 (207)	0.94	994 (261)	1.12	1512 (329)	1.38	3069 (585)	1.19
		Curve 1	507 (204)	0.91	807 (134)	1.11	1459 (196)	1.52	3821 (891)	1.79
		Straight stretch 2	494 (126)	0.99	770 (206)	1.13	1281 (212)	1.41	3856 (633)	1.58
		Curve 2	903 (206)	0.87	1495 (284)	1.22	2406 (480)	1.65	3889 (317)	1.40

^a Standard deviation in brackets.

^b Studded tyre to studless tyre ratio.

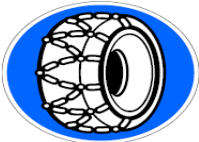
PM₁₀-hiukkasten massa eri ajonopeuksilla ja nastoituksilla (Kupiainen & Pirjola 2011)

LIITE 2.

Autoliitto, Nastarenkaiden käyttö Euroopassa

(<http://www.veronmaksajat.fi/File/37040548-ae6e-4dd4-9e91-ce510cc723b8/Euroopan%20nastarengass%C3%A4%C3%A4nn%C3%B6t.pdf>), sivulla käyty 3.8.2011

NASTARENKAIDEN KÄYTTÖ EUROOPASSA				
				
MAA	KIEL- LETTY	SALLITTU	KÄYTTÖAIKA	NOP.RAJOITUS NASTOILLA km/h tai muu erityismääräys
ALANKOMAAT	x			Lumiketjujen käyttö kielletty.
ANDORRA	x		1.11.-30.5.	Talvella lumiketjut pakko olla mukana autossa.
BELGIA		Alle 3,5 t ajoneuvoille	1.11.-31.3.	60 maanteilla ja 90 mo-tiellä, takalasiin laitettava nopeusmerkki "60" (merkin halkaisija 21 cm).
BULGARIA	x			Mahdoll. Lumiketjupakko. Osoitetaan liikennemerkein. Max. Nopeus 50 km/h.
ESPANJA	x			Lumiketjujen käyttö sallittu. Max.nopeus 50 km/h
IRLANTI	x			Lumiketjujen käyttö kielletty.
ISLANTI		x	1.11.-15.4. (tarkka aika vaihtelee vuodesta toiseen.)	Lumiketjut sallittu
ISO-BRITANNIA		*)		Tien pintaa ei saa vahingoittaa.
ITALIA		Alle 3,5 t ajoneuvoille	15.11.-15.3.	90 km/h maantiet ja 120 km/h mo-tiet. Takarenkaissa roiskeläppäpakko italialaisille, ulkomaalaisille suositus. Aostassa oltava joko talvirenkaat tai lumiketjut 15.10.-15.4. Lumiketjuilla max. nopeus 50 km/h
ITÄVALTA		Vain teräsvyörenkaissa ajoneuvoissa alle 3,5 t. Jos vetoautossa on nastarenkaat, myös perävaunussa on oltava nastarenkaat.	1.10.-31.5. (Huomioi paikalliset erityismääräykset, jotka voivat pidentää ajankohtaa)	80 maantiet ja 100 mo-tiet, auton takaosassa oltava hyväksytty nastarengasmerkki, jonka saa mm. ÖAMTC:ltä. Mahdoll. lumiketjupakko, jos ajaa kesärenkailla. Alle 3,5 t ajon. talvirengaspakko 1.11.-15.4., jos tiellä on lunta tai jäätä. Renkaissa oltava merkintä M+S tai M&S (min. 4 mm). Yli 3,5 t. ajon. talvirengaspakko vähint. vetoakselilla 15.11.-15.3., vaikka tiellä ei olisi lunta eikä jäätä. HUOM! Mikäli vuokraa auton, on kuljettajan vastuulla tarkastaa, että autossa on keliolosuhteisiin nähden oikeat renkaat.
KREIKKA		*)		Jos jäätä tai lunta, saa käyttää lumiketjuja Max. nopeus 50 km/h
KROATIA	x			Talvivarustus suositus 1.11.-30.4. Talvivarustukseksi katsotaan: joko talvirenkaat kaikissa pyörissä tai lumiketjut vetäviin pyöriin. Renkaissa oltava merkintä M+S. Lumiketjut pakollinen varuste talvella Likan ja Gorski Kotarin alueilla.
LATVIA		x	1.10.-30.4.	Talvirenkaat pakolliset 1.12.-1.3. alle 3,5 t ajon.
LIETTUA		x	1.11.-1.4.	Talvirenkaat pakolliset 1.11.-1.4.
LUXEMBURG		Alle 3,5 ajoneuvoille ja linja-autoille.	1.12.-31.3.	60 maantiet ja 90 mo-tiet, takalasiin nopeusmerkki "60", mustat numerot valk. taustalla, merkin halkaisija väh. 21 cm
MAKEDONIA	x			Taajamien ulkopuolella ajalla 15.11.-15.3. oltava varusteina: joko vyörenkaat kaikissa pyörissä tai talvirenkaat vetävissä pyörissä; jos alla on kesärenkaat, pitää olla lumiketjut mukana vetäviin pyöriin. Raskailla ajoneuvoilla oltava lisäksi mukana lumilapio. Lumiketjuilla max.nopeus 70 km/h.
MONTENEGRO	x			Mahdoll. lumiketjupakko.

NORJA			1.11.-1. pääsiäisen jälkeinen sunnuntai (Pohjoisessa alkaen 15.10.)	Yli 3,5 t ajoneuvoilla lumiketjut on pakko olla mukana talvella. Tarkistuksia rajoilla. Bergenissa, Oslolla ja Trondheimissa nastarengasmaksut alle 3,5 t ajoneuvoilta. 30 NOK/vrk, 1200 NOK/kausi. Yksi tarra voimassa kaikissa kolmessa kaupungissa. Tarra laitettava tuulilasiin.
PORTUGALI	x			Lumiketjuja saa käyttää tarvittaessa.
PUOLA	x			Lumiketjuja saa käyttää vain, jos tiellä on lunta.
RANSKA		Alle 3,5 t ajoneuvoille	30.10.2010-27.3.2011 Eli 1.11. edeltävästä lauantaista maalis-kuun viimeiseen sunnuntaihin	Enintään 90 km/h. Ranskalaisautoilla oltava takana nopeusmerkki "90" - ulkomaalaisille ei merkkipakkoa, mutta nopeatrajoitusta on noudatettava. Mahdoll. lumiketjupakko.
ROMANIA	x			Lumiketjusuositus vuoristossa.
RUOTSI		x	1.10.-15.4.	Talvirengaspakko 1.12.-31.3. alle 3,5 t ajoneuvoille, koskee myös ulkomaalaisia ajoneuvoja. Kunnat/kaupungit saavat kieltää nastarengaskäytön ajamisen tietyillä teillä/kaduilla, esim. Tukholman Hornsgatanilla nastarengaskielto. Lumiketjuja saa käyttää tarvittaessa.
SAKSA	x			Autossa oltava talvivarustus, jos keli on talvinen. (mm. renkaissa merkintä M+S tai lumihiutale.) Mahdollinen lumiketjupakko. Nopeus max. 50 km/h. Jos autoilla tavataan kesärenkailla lumiselta tai jäisel-tä tieltä, seurausena on 20 euron ranhaistumaksu. Jos kesärenkasaautoilla tukkii liikenteen esim. juuttu-malla kiinni makeen, seurausena on 40 euron sakko ja yksi rangaistuspiste.
SERBIA	x			Talvella kelin vaatiessa pitää olla varusteina joko vyörenkaat kaikissa pyörissä tai talvirenkaat vetävissä pyörissä; jos alla on kesärenkaat, pitää olla lumiketjut mukana vetäviin pyöriin. Raskailla ajoneuvoilla oltava lisäksi mukana lumilapio.
SLOVAKIA	x			Alle 3,5 t autoille talvirenkaat (M+S) pakol-liset, jos tiellä on lumi- tai jääkerros. Yli 3,5 t kuorma-autoille talvirenkaat pakolliset 15.11.-31.3. tieolosuhteista riippumatta. Lumiketjujen käyttö sallittu, jos tien pinnalla lunta tai jaata.
SLOVENIA	x			Jos keli on talvinen (lumisade, musta jää ...) 15.11.-15.3. oltava joko talvirenkaat (M+S) kaikissa pyörissä, tai jos alla on kesärenkaat, mukana pitää olla lumiketjut, joilla max.nopeus 50 km/h.
SUOMI		x	1.11.-31.3. tai 1. maanantai pääsiäisen jäl-keen (myöhempi ajankohdista)	Talvirengaspakko 1.12.-28./29.2.
SVEITSI		Alle 7 t ajoneuvoille, mutta moottoreilla ajokieltoja!	1.11.-30.4.	80 km/h yleisrajoitus. Takalasiin laitettava irrotettava nopeusmerkki "80" Mahdollinen lumiketjupakko.
TANSKA		x	1.11.-15.4.	Lumiketjuja saa käyttää, mutta tien pintaa ei saa vahingoittaa.
TSEKKI	x			Talvella (1.11.-30.4.) talvivarustus pakollinen teillä, jotka viitoitettu merkillä, jossa auton ja lumihiutaleen symbolit. Talvivarustukseksi hyväksytään: alle 3,5 t ajoneuvoilla talvirenkaat ja yli 3,5 t ajoneuvoilla talvirenkaat vetäviin pyöriin tai lumiketjut. Talvirenkaat ovat pakolliset mm. D1-moottoriteillä valilla Praha-Brno. Lumiketjupakko, jos valkoisin kirjaimin lukee
				sinisellä taustalla sana "SNEHOVÉRETEZY".
TURKKI	x			
UKRAINA		x		
UNKARI	x			Mahdollinen lumiketjupakko.
VALKO-VENÄJÄ		x		Nastarengasmerkki takalasiin.
VENÄJÄ		x		Nastarengasmerkki takalasiin.
VIRO		x	1.10.-1.5.	Talvirengaspakko 1.12.-1.3. Paikan päällä olevat keliolosuhteet kannattaa varmistaa matkustettaessa Viroom loka-huhtikuussa
*) = maan lainsäädännössä ei ole lainkaan nastarengasmääräyksiä HUOM! Monissa maissa lumiketjut ovat pakolliset, jos liikennemerkki niin osoittaa. Renkaiden minimiurasyvyys vaihtelee 3 mm-6 mm. Autoliitto - Asiantuntijapalvelut - Matkailu				

LIITE 3.

Päällysteen urautumiseen vaikuttavat tekijät. Taulukon pohjana Lampisen (1993, s.137) yhteenveto.

Muuttuja	Selite	Huom
Liikenne	Liikenteen määrä	Nastarengaskausi
	Liikenteen koostumus	Ajoneuvotyypeittäin
	Nastarenkaiden käyttöaste	
	Ajonopeus	
	Ajotapahtuma	Liiketilän muutos
	Nastarenkaiden käyttöaika	
Ilmasto	Lämpötila	Talvi, kesäkuu
	Pinnan tila	Märkä, kuiva
	Suolaustarve	Kelitieto, lämpötila, pinnan tila
	Sääolot	
Ajoneuvo	Ajoneuvotyyppi	Henkilö/pakettiauto, linja/kuorma-auto (+pv)
	Nastarenkaiden lkm	
	Jousitusgeometria	Aurauskulma ym.
	Pyöräkuorma	
Rengas	Tyyppi	Kesä/talvi, nasta/kitka
	Nastojen lukumäärä	
	Rengaspaine	
	Jousivakio	Kokoonpuristuma
	Kosketuspinta	Ala, muoto
	Halkaisija	Vierintäsäde
	Profiili	Leveys, jäykkyys
Nasta	Koko, paino ja muoto	
	Pistovoima	Staattinen ja dynaaminen
	Ulkonema	
Päällyste	Tyyppi	AB, SMA, muut
	Koostumus	
	Sideaineen ominaisuudet	
	Kiviaines	Lujuus, raekäyrä
	Stabiliteetti	Plastinen deformaatio
	Ikä	Ominaismuutokset
Liikenneympäristö	Tien geometria	Sivu- ja pituus- kaltevuus, kaarteisuus
	Poikkileikkaus	
	Ajo-olosuhteet	Palvelutaso, välityskyky
	Nopeusrajoitus	
	Nopeusvaihtelut	Toteutunut nopeus

LIITE 4.

Liikenne- ja viestintäministeriön asetus 408/2003 ajoneuvon renkaiden nastoista

5 §

Henkilöautonrenkaan nastan pistovoiman mitta

1. Henkilöautonrenkaan nastan pistovoima mitataan nastan ollessa asennettuna kahta yleistä merkkiä edustavaan talvirenkaaseen, jotka on suunniteltu mittauksen kohteena olevan kokoisille nastoille. Tutkimuslaitos valitsee molemmista rengasmerkeistä mittaukseen kaksi rengasta siten, että toinen näistä on kantavuudeltaan enintään 500 kg ja toinen yli 500 kg. Kantavuudeltaan enintään 500 kg:n rengas valitaan kokovaihtoehtoista: 155/80R13 tai 175/65R14. Kantavuudeltaan yli 500 kg:n rengas valitaan kokovaihtoehtoista: 185/65R14, 175/80R14 tai 195/65R15. Renkaat toimitetaan tutkimuslaitokselle normin mukaisille vanteille asennettuina. Testattavien renkaiden tulee olla vähintään 2 viikkoa vanhoja.

2. Mittaus suoritetaan seuraavin edellytyksin:

- a) nastojen ulkonema mitataan ennen pistovoiman mittausta; ulkoneman tulee olla $1,2 \pm 0,1$ mm;
- b) renkaan ilmanpaineen tulee olla 200 kPa; 31.12.2004 saakka kuitenkin 180 kPa;
- c) tutkimuslaitos suorittaa tai valvoo mitattavien nastojen asennuksen;
- d) mittaus suoritetaan aikaisintaan yhden ja viimeistään kahden vrk:n kuluttua nastoituksesta;
- e) mittauslämpötila on 20 ± 2 °C;
- f) kulutuspinnan kummaltakin reunalta mitataan 10 peräkkäistä nastaa, jos ei ole erityistä syytä mitata nastoja laajemmalta alueelta.

3. Mittaus suoritetaan seuraavalla tavalla:

- a) pyörään kohdistetaan kuormitus, jonka suuruus on 70 % renkaan kantavuudesta;
- b) kuormituksen suunta on yhdensuuntainen nastan kautta kulkevan pyörän säteen kanssa ja kohtisuoraan tienpintaa kuvaavaa tasoa vasten;
- c) mittaus suoritetaan staattisena nasta painuneena renkaan kulutuspinnan tasolle, mittaussuuntana kuormituksen suunta.

4. Pistovoimaksi katsotaan näin mitattujen voimien keskiarvo. Ulkonemaksi katsotaan mitattujen nastojen ulkonemien keskiarvo. Ulkoneman poiketessa 2 §:n 3 momentissa säädetystä arvosta määritetään pistovoima seuraavasti:

$$F = F_m \cdot u_s / u_m, \text{ jossa}$$

F_m = mitattujen pistovoimien keskiarvo

u_s = sallittu ulkoneman keskiarvo

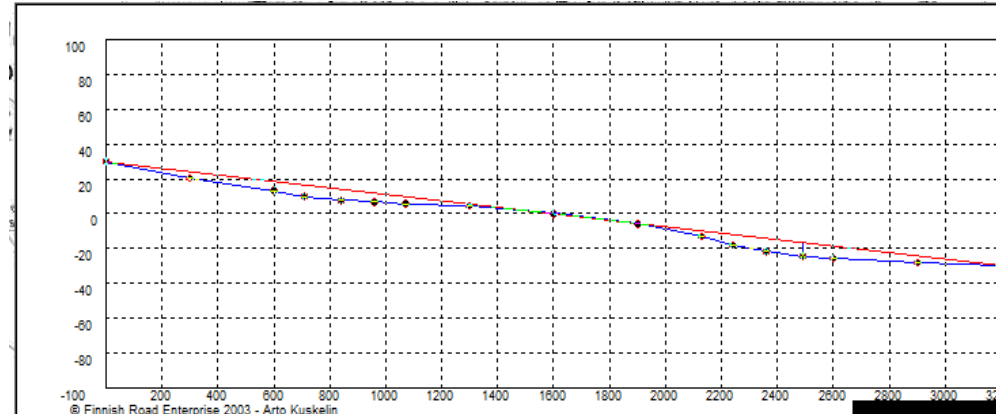
u_m = mitattujen ulkonemien keskiarvo

Henkilöauton nastan pistovoima on edellä tarkoitetulla tavalla laskettujen neljän renkaan pistovoimien keskiarvo.

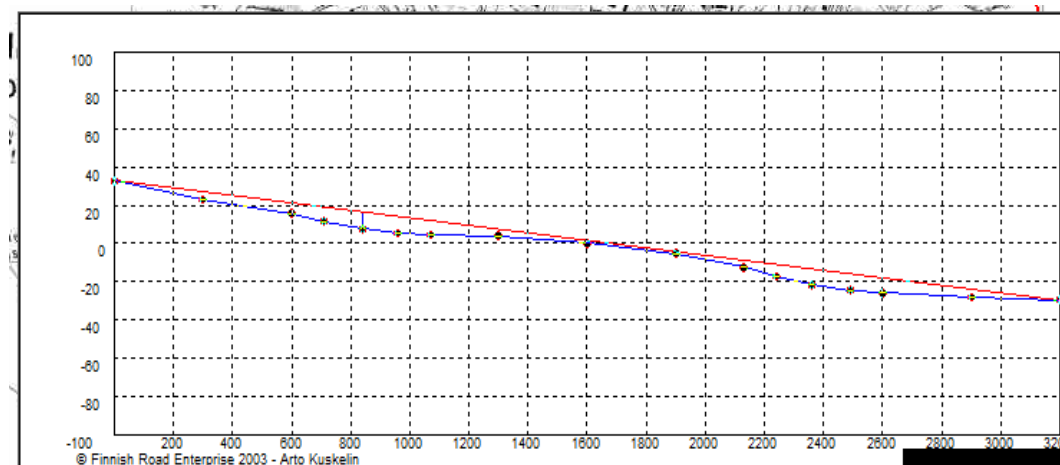
LIITE 5.

X-jakopisteohjelman esittämiä katujen poikkiprofiileja

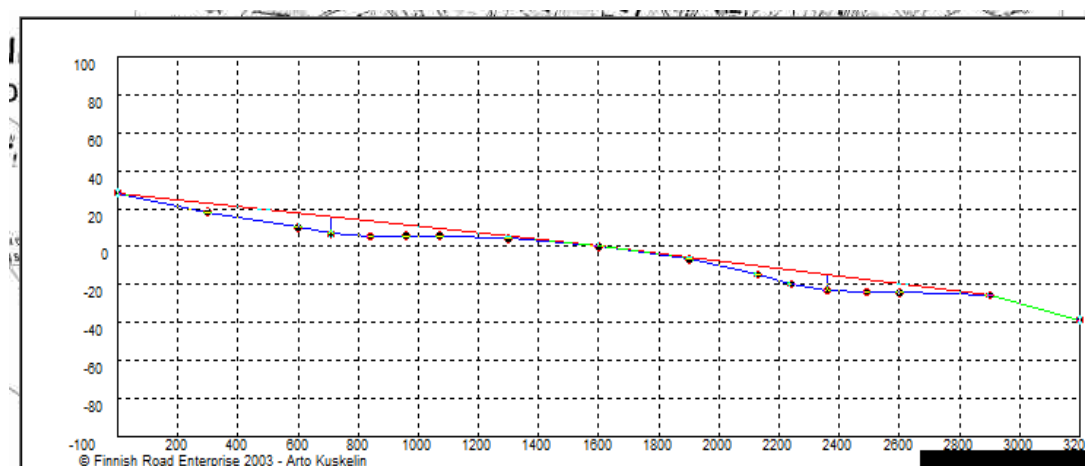
Lauttasaaren silta 2009; max urasyvyys 4,7 mm, urien pinta-ala 86 cm²



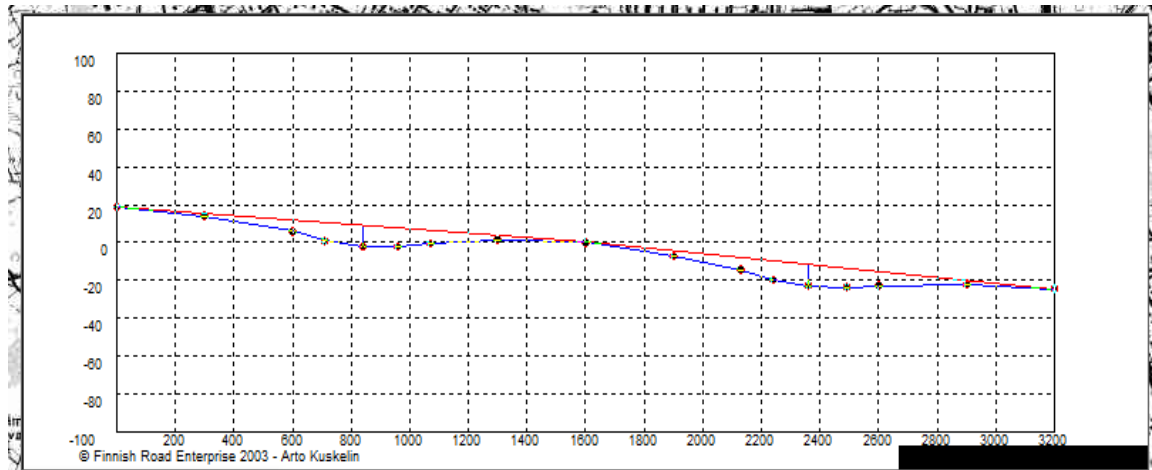
Lauttasaaren silta 2010; max urasyvyys 8,5 mm, urien pinta-ala 109 cm²



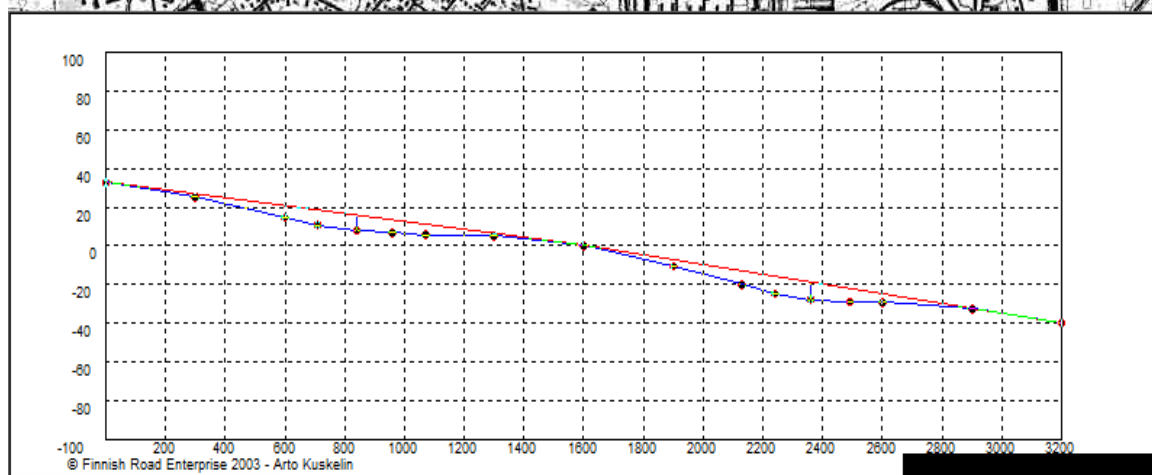
Lauttasaaren silta 2011; max urasyvyys 8,5 mm, urien pinta-ala 87 cm² < vuonna 2010 -
> mittaustulos hylätty, ilmeisesti mittalaitteen asemointi suhteessa tienpintaan eri kuin
vuotta aikaisemmin



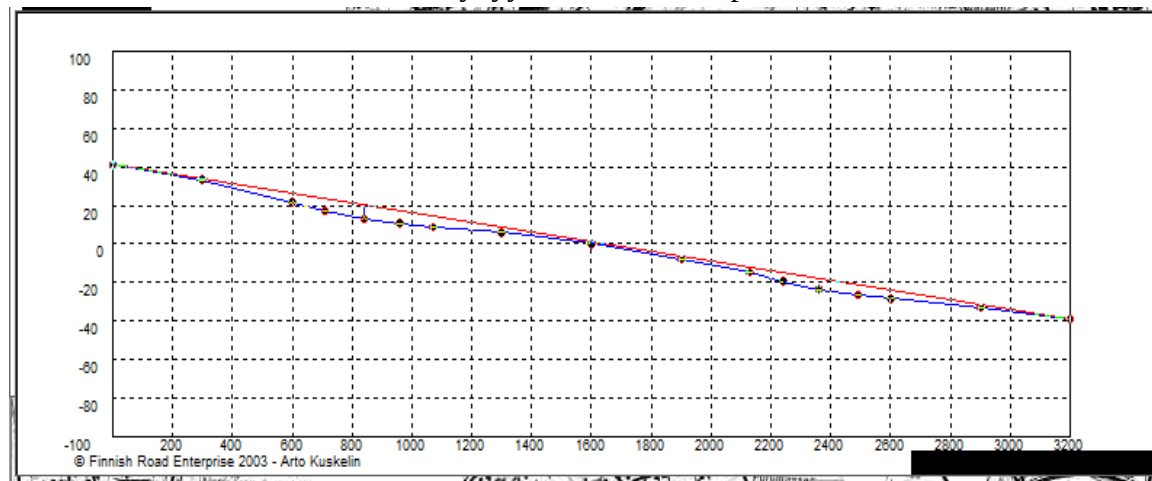
Kaupintie 2010; max urasyvyys 12,5 mm, urien pinta-ala 131 cm²



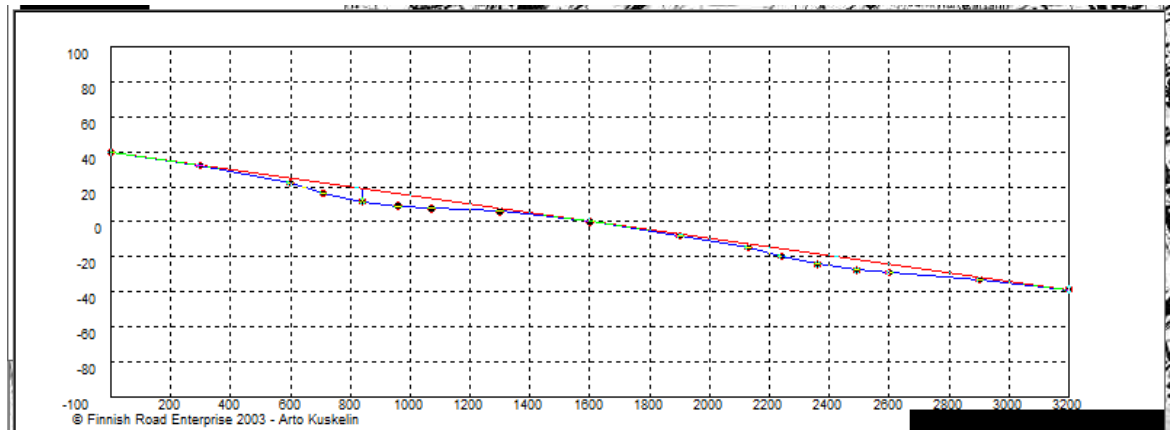
Kaupintie 2009; max urasyvyys 8,0 mm, urien pinta-ala 99 cm²



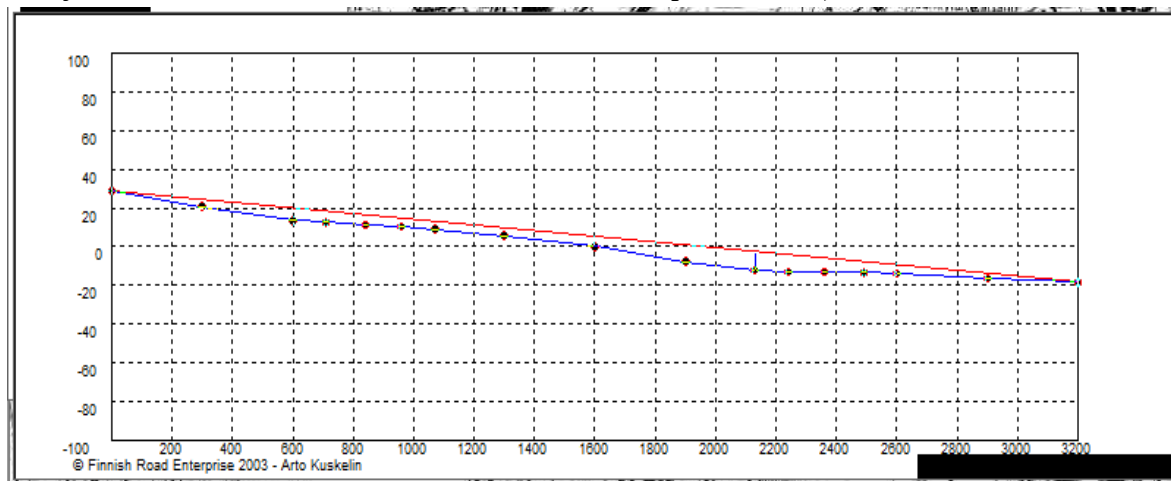
Malminkartanontie 2009; max urasyvyys 6,0 mm, urien pinta-ala 73 cm²



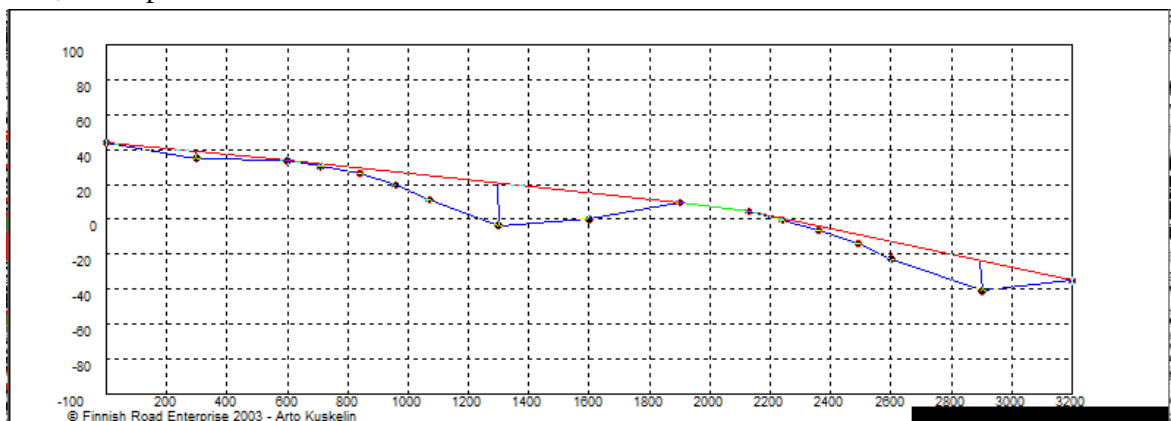
Malminkartanontie 2010; max urasyvyys 7,3 mm, urien pinta-ala 77,7 cm²



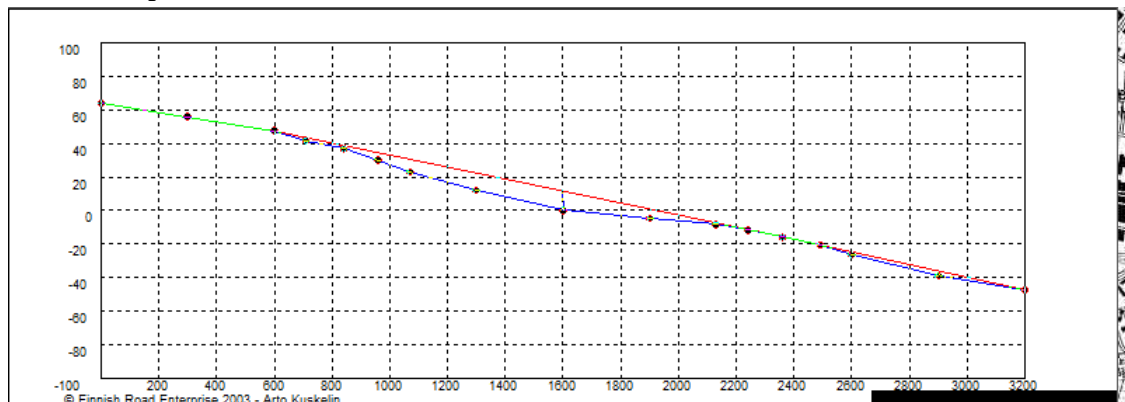
Malminkartanontie 2011; max urasyvyys 9,0 mm, urien pinta-ala 94,0 cm² (lankaa laskettu kuvaan verrattuna manuaalisesti 1,0 mm, koska keskiharjanne ja reunat 200 mm ja 3000 mm ovat olleet ilmassa verrattuna aiempiin vuosiin)



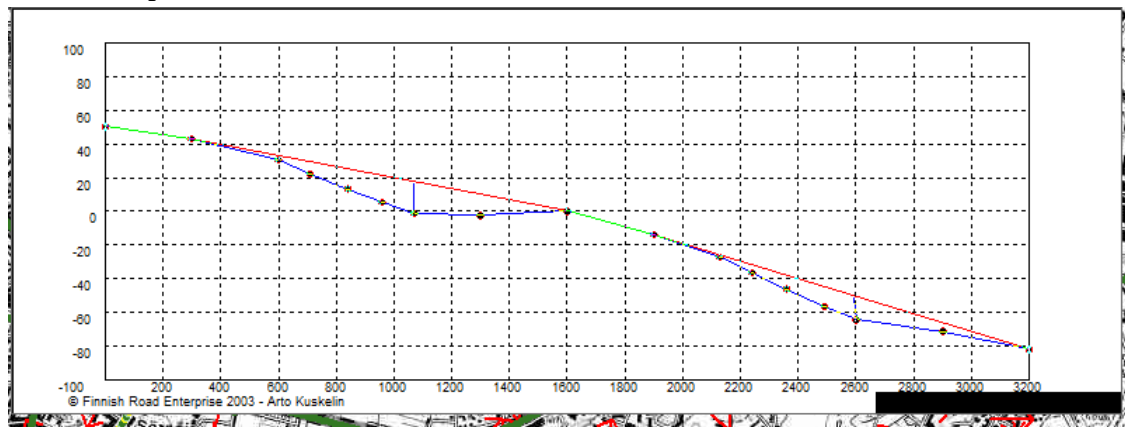
Helsinginkatu 50 m ennen Sturenkadun liittymää kaista 1 2011; max urasyvyys 24,0 mm, urien pinta-ala 217 cm²



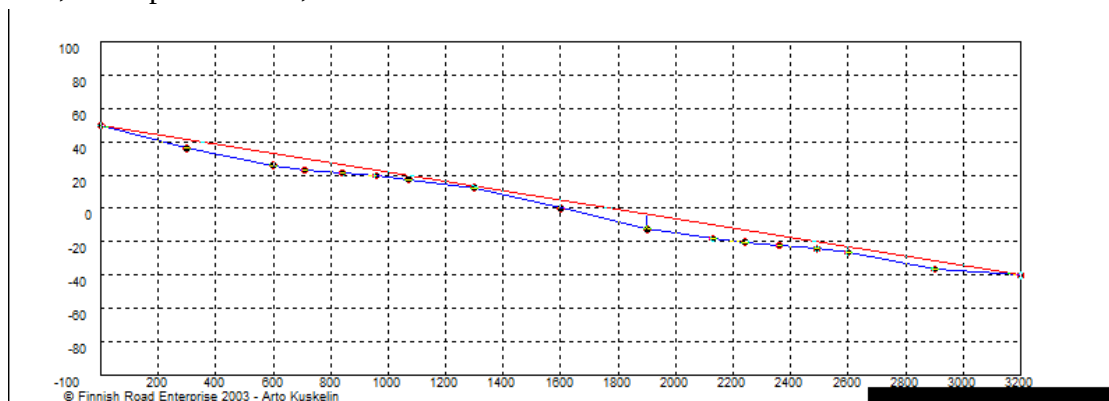
Helsinginkatu 50 m ennen Sturenkadun liittymää kaista 2 2011; max urasyvyys 12,5 mm, urien pinta-ala 96 cm²



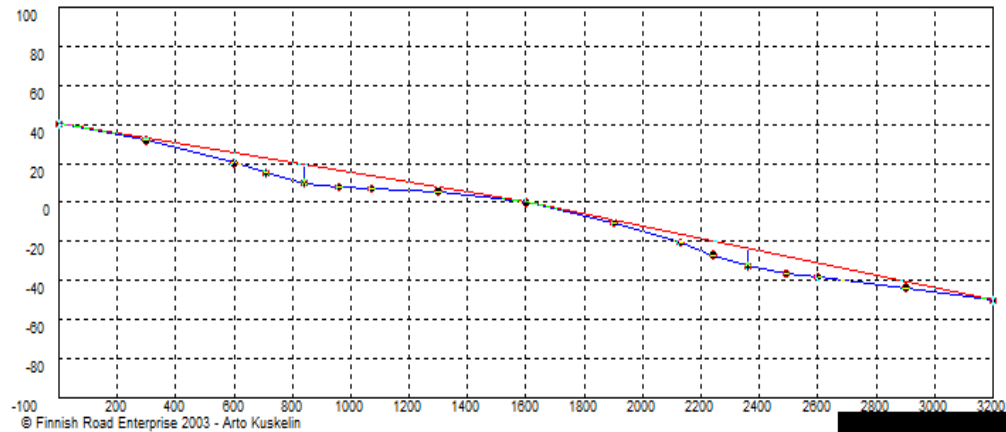
Helsinginkatu 50 m ennen Sturenkadun liittymää kaista 1 2010; max urasyvyys 19,0 mm, urien pinta-ala 167,5 cm²



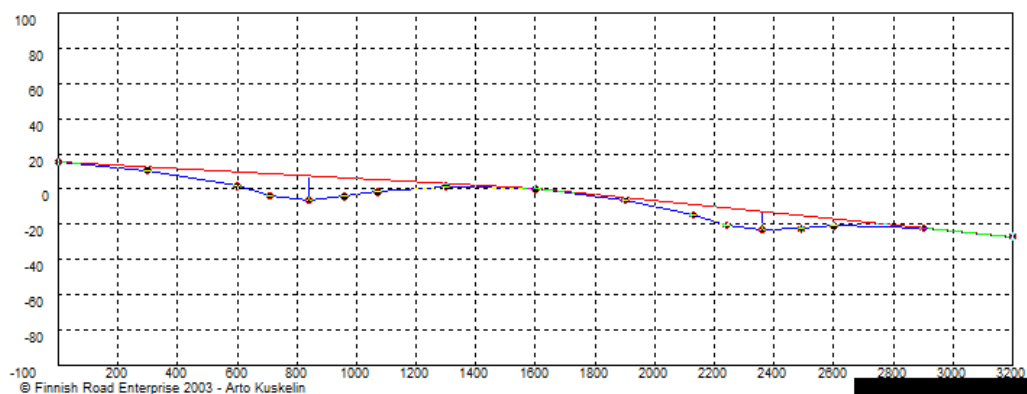
Helsinginkatu 50 m ennen Sturenkadun liittymää kaista 2 2010; max urasyvyys 10,0 mm; urien pinta-ala 85,5 cm²



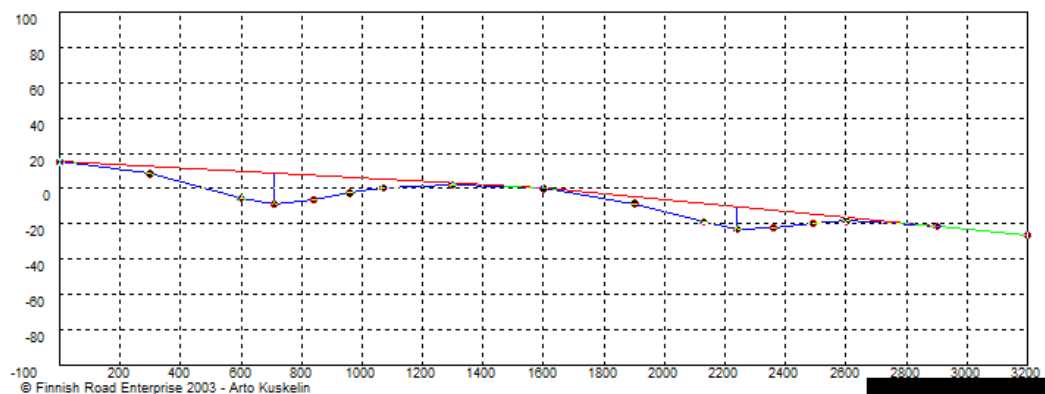
Kuusisaarentie, 300 m Helsingin rajalta Munkkiniemen suuntaan, 2009; urien pinta-ala 99 cm², max urasyvyys 10,5 mm



Kuusisaarentie, 300 m Helsingin rajalta Munkkiniemen suuntaan, 2010, urien pinta-ala n. 125 cm², max urasyvyys 13,5 mm



Kuusisaarentie, 300 m Helsingin rajalta Munkkiniemen suuntaan, 2011; max urasyvyys 18,0 mm, urien pinta-ala 154,5 cm² (graafisen estimoinnin laskutapa kuvan alla)

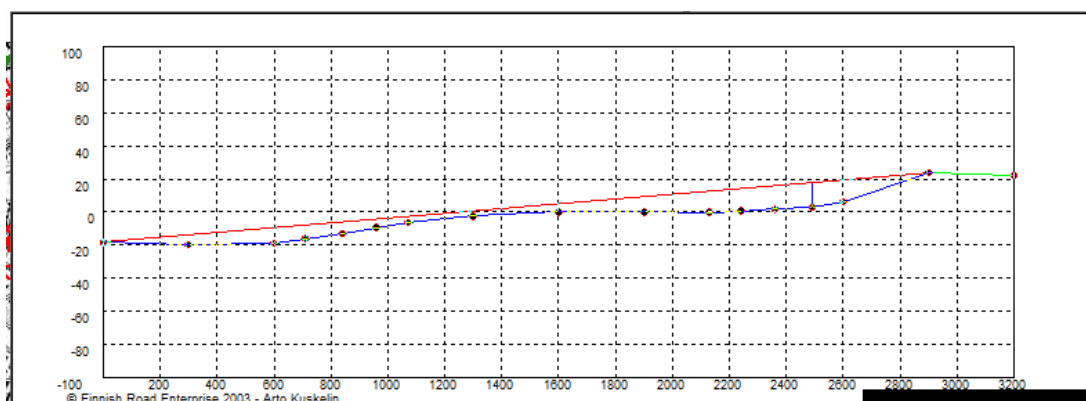


Profiilin maksimiurasyvyys ja urien poikkipinta-ala

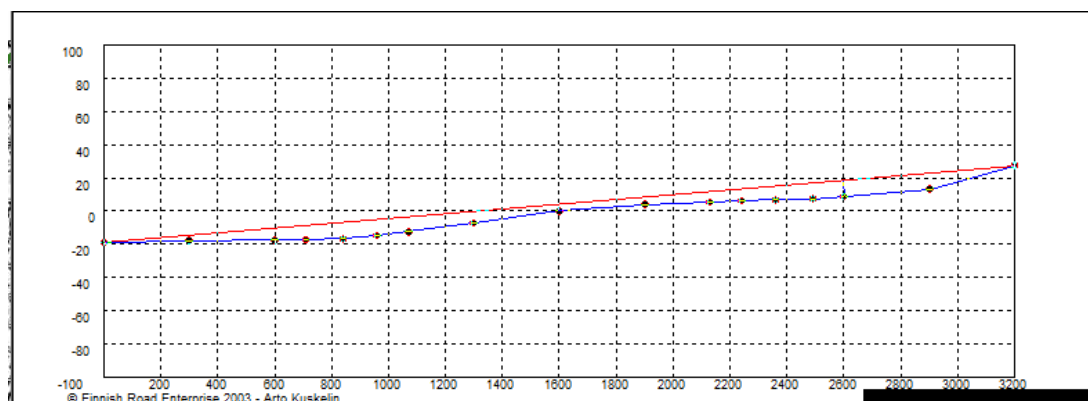
Maksimiurasyvyys 18 mm

Matka leveyssuunnassa (mm)	Langan alle jäävän uran pinta-ala (mm ²)	Matka leveyssuunnassa (mm)	Langan alle jäävän uran pinta-ala (mm ²)
0-200	200	200-400	600
400-600	2200	600-800	3200
800-1000	2200	1000-1200	800
1200-1400	200	1400-1600	0
1600-1800	200	1800-2000	700
2000-2200	1800	2200-2400	2200
2400-2600	1000	2600-2800	150
		yhteensä	15450

Metsäläntie 100 m ML-keskuksen liittymästä Hämeenlinnanväylän suuntaan 2011



Metsäläntie 100 m ML-keskuksen liittymästä Hämeenlinnanväylän suuntaan 2010; max urasyvyys 10,5 mm, urien pinta-ala 179,5 cm² (graafisen estimoinnin laskutapa kuvan alla)

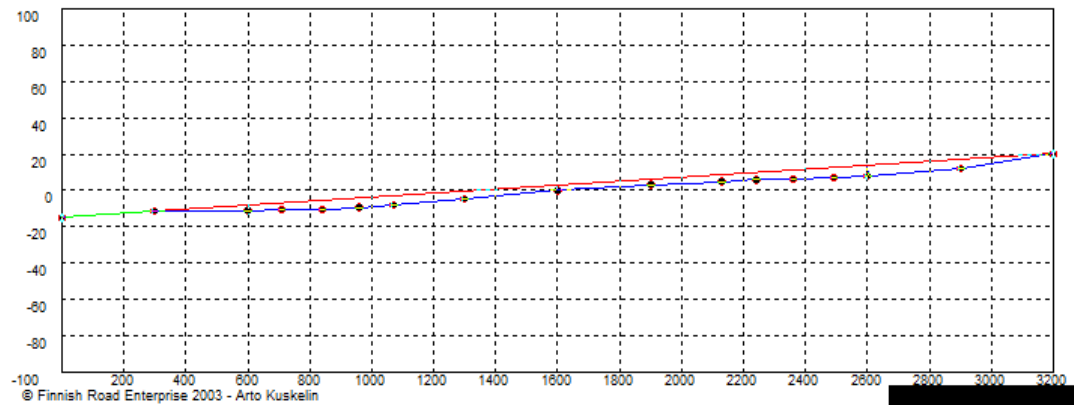


Profiilin maksimiurasyvyys ja urien poikkipinta-ala

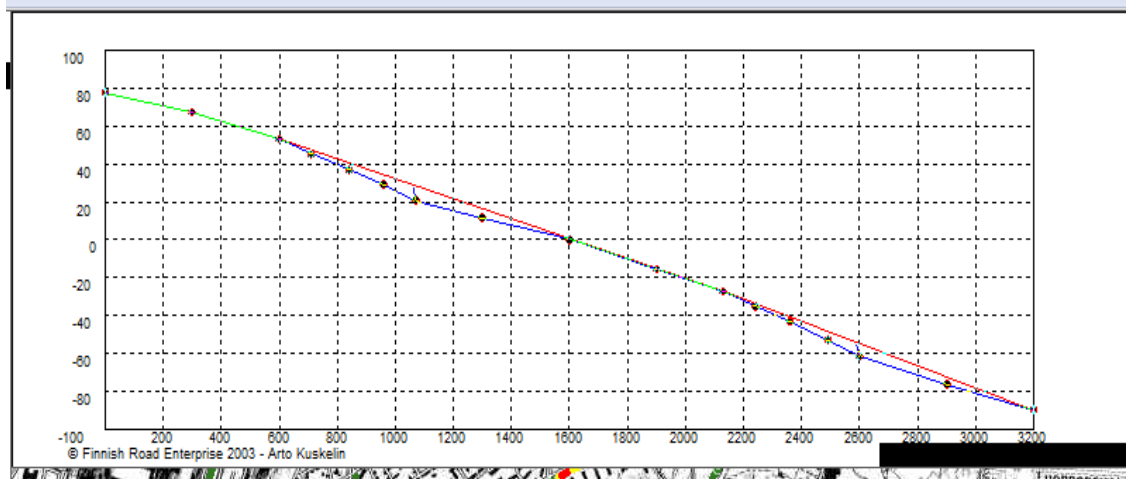
Maksimiurasyvyys 10,5 mm

Matka leveyssuunnassa (mm)	Langan alle jäävän uran pinta-ala (mm ²)	Matka leveyssuunnassa (mm)	Langan alle jäävän uran pinta-ala (mm ²)
0-200	150	200-400	500
400-600	1100	600-800	1700
800-1000	2000	1000-1200	1600
1200-1400	1100	1400-1600	700
1600-1800	600	1800-2000	700
2000-2200	1000	2200-2400	1400
2400-2600	1700	2600-2800	1800
2800-3000	1500	3000-3200	400
		yhteensä	17950

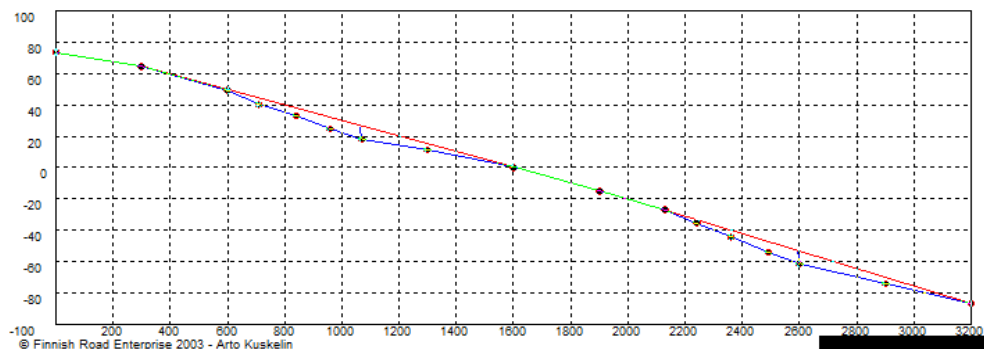
Metsäläntie 100 m ML-keskuksen liittymästä Hämeenlinnanväylän suuntaan 2009; max urasyvyys 6,5 mm, urien pinta-ala 110 cm²



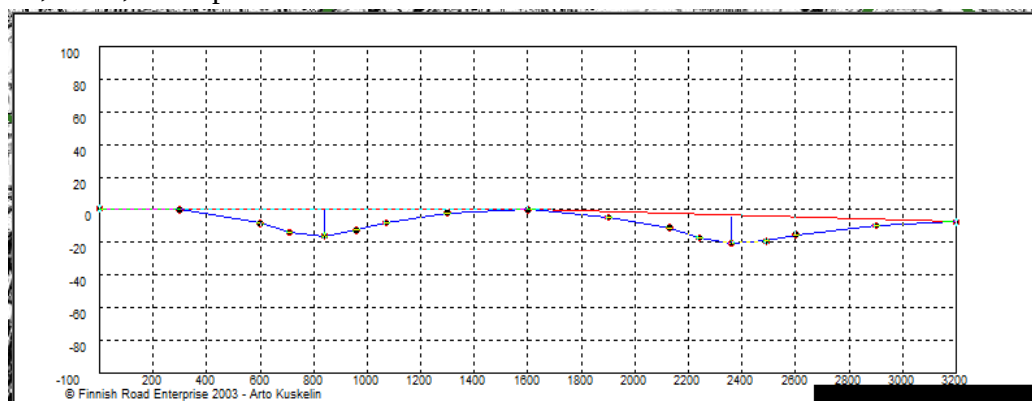
Vauhtitie, 150 m kadun pohjoispäästä ajosuuntaan 2, vuonna 2010; max urasyvyys 6,0 mm, urien pinta-ala 54,5 cm²



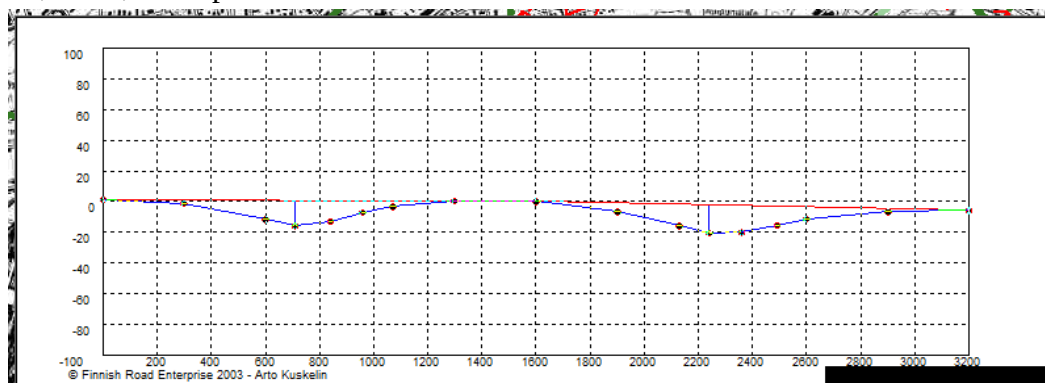
Vauhtitie, 150 m kadun pohjoispäästä ajosuuntaan 2, vuonna 2011; max urasyvyys 6,5 mm, urien pinta-ala 59,0 cm²



Itäväylä, Kulosaaren sillan länsipää, ajosuunta 1, kaista 3, vuosi 2009; max urasyvyys 17,0 mm, urien pinta-ala 184 cm²



Itäväylä, Kulosaaren sillan länsipää, ajosuunta 1, kaista 3, vuosi 2010; max urasyvyys 18,5 mm, urien pinta-ala 221 cm²



LIITE 6.

Statistix:illa tehtyjen lineaaristen regressioanalyysien tulokset kuntotieteanalyysin datasta

Aineisto: Kaikki 2005-2008 mitatut kadut pl. uudelleen päällystysvuodet
Mittausväli: 1 vuosi

Selitettävä muuttuja: Ura~08 = maksimiurasyvyyden muutos (mm)

Selittävä muuttuja: KVL = KVL koko ajoradalla (ajon/vrk)

Statistix 9.0
14.2.2012, 9:53:24

Least Squares Linear Regression of Ura~08

Predictor

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	123.006	72.6179	1.69	0.0992
KVL	0.00394	0.00216	1.82	0.0772

R-Squared	0.0865	Resid. Mean Square (MSE)	56432.7
Adjusted R-Squared	0.0604	Standard Deviation	237.556
AICc	409.48		
PRESS	2.20E+06		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	187115	187115	3.32	0.0772
Residual	35	1975144	56433		
Total	36	2162259			
Lack of Fit	22	1071998	48727.2	0.70	0.7759
Pure Error	13	903146	69472.8		

Cases Included 37 Missing Cases 0

Selittävä muuttuja: KVL~01 = ajokaistakohtainen KVL (ajon/vrk)

Statistix 9.0
14.2.2012, 9:54:01

Least Squares Linear Regression of Ura~08

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	
Constant	110.721	139.280	0.79	0.4320	
KVL~01	0.01460	0.01572	0.93	0.3595	
R-Squared	0.0240	Resid. Mean Square (MSE)		60293.8	
Adjusted R-Squared	-0.0038	Standard Deviation		245.548	
AICc	411.93				
PRESS	2.27E+06				
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	51976	51976.2	0.86	0.3595
Residual	35	2110283	60293.8		
Total	36	2162259			
Lack of Fit	28	2067652	73844.7	12.13	0.0011
Pure Error	7	42631	6090.1		
Cases Included	37	Missing Cases	0		

Selittävä muuttuja: Kaista~01 = Ajokaistan leveys (cm)

Statistix 9.0
11:08:34

stagariuramax05-08, 20.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~08

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	
Constant	2056.06	663.621	3.10	0.0038	
Kaista~01	-5.31741	1.93418	-2.75	0.0094	
R-Squared	0.1776	Resid. Mean Square (MSE)		50807.3	
Adjusted R-Squared	0.1541	Standard Deviation		225.405	
AICc	405.60				
PRESS	1.96E+06				
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	384003	384003	7.56	0.0094
Residual	35	1778256	50807		
Total	36	2162259			
Lack of Fit	1	1776	1775.9	0.03	0.8548
Pure Error	34	1776480	52249.4		
Cases Included	37	Missing Cases	0		

Selittävä muuttuja: Nopeusraaj = Nopeusrajoitus (km/h)**Least Squares Linear Regression of Ura~08****Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	314.980	199.344	1.58	0.1231
Nopeusraaj	-1.55930	3.78004	-0.41	0.6825

R-Squared	0.0048	Resid. Mean Square (MSE)	61479.9
Adjusted R-Squared	-0.0236	Standard Deviation	247.951
AICc	412.65		
PRESS	2.31E+06		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	10462	10461.6	0.17	0.6825
Residual	35	2151798	61479.9		
Total	36	2162259			

Lack of Fit	3	158471	52823.8	0.85	0.4779
Pure Error	32	1993326	62291.4		

Cases Included 37 Missing Cases 0

Selittävä muuttuja: Keskinope = Liikennevirran keskinopeus (km/h) ruuhka-aikoina ma-pe 06-09 ja 15-18

Statistix 9.0
14.2.2012, 9:57:37

Least Squares Linear Regression of Ura~08**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	350.031	88.1015	3.97	0.0003
Keskinope	-3.52734	2.40167	-1.47	0.1508

R-Squared	0.0581	Resid. Mean Square (MSE)	58192.4
Adjusted R-Squared	0.0311	Standard Deviation	241.231
AICc	410.62		
PRESS	2.31E+06		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	125526	125526	2.16	0.1508
Residual	35	2036733	58192		
Total	36	2162259			

Lack of Fit	12	624724	52060.4	0.85	0.6050
Pure Error	23	1412009	61391.7		

Cases Included 37 Missing Cases 0

Selittävä muuttuja: Raskas = Raskaan liikenteen osuus x 0,01 %

Statistix 9.0
14.2.2012, 9:59:15

Least Squares Linear Regression of Ura~08

Predictor

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	386.219	70.6013	5.47	0.0000
Raskas	-2.94859	1.16181	-2.54	0.0158

R-Squared	0.1554	Resid. Mean Square (MSE)	52176.7
Adjusted R-Squared	0.1313	Standard Deviation	228.422
AICc	406.58		
PRESS	2.05E+06		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	336075	336075	6.44	0.0158
Residual	35	1826184	52177		
Total	36	2162259			

Lack of Fit	11	858842	78076.5	1.94	0.0851
Pure Error	24	967342	40305.9		

Cases Included 37 Missing Cases 0

Selittävät muuttujat: Raskas = Raskaan liikenteen osuus x 0,01 %,

Liittym = liittymän lähellä (dummy-tyyppinen muuttuja, 1 = etäisyys merkittävään liittymään jossa hidastetaan ja pysäytetään usein alle 100 m; 0 = etäisyys edellä mainittuun liittymään yli 100 m=)

Statistix 9.0
10:00:56

14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~08

Predictor

Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	346.285	80.1853	4.32	0.0001	0.0
Raskas	-2.68022	1.18830	-2.26	0.0306	1.0
Liittym	87.8734	84.0329	1.05	0.3031	1.0

R-Squared	0.1817	Resid. Mean Square (MSE)	52037.7
Adjusted R-Squared	0.1336	Standard Deviation	228.118
AICc	407.93		
PRESS	2.16E+06		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	392978	196489	3.78	0.0330
Residual	34	1769281	52038		
Total	36	2162259			

Lack of Fit	13	849013	65308.7	1.49	0.2013
Pure Error	21	920268	43822.3		

Cases Included 37 Missing Cases 0

Selittävät muuttujat:**Kaista~01 = ajokaistan leveys (cm)****KVL~01 = ajokaistakohtainen keskivuorokausliikenne (ajon / vrk)**Statistix 9.0
10:04:36

14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~08**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	1962.55	740.206	2.65	0.0121	0.0
Kaista~01	-5.15772	2.02980	-2.54	0.0158	1.1
KVL~01	0.00458	0.01515	0.30	0.7644	1.1
R-Squared	0.1798	Resid. Mean Square (MSE)			52161.6
Adjusted R-Squared	0.1315	Standard Deviation			228.389
AICc	408.02				
PRESS	2.00E+06				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	388766	194383	3.73	0.0344
Residual	34	1773494	52162		
Total	36	2162259			
Lack of Fit	28	1731201	61828.6	8.77	0.0060
Pure Error	6	42293	7048.8		

Cases Included 37 Missing Cases 0

Selittävät muuttujat:**Kaista~01 = ajokaistan leveys (cm)****Ura~06 = urasyvyys mittausjakson alussa (x 0,01 mm)**Statistix 9.0
10:09:47

14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~08**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	2122.28	678.445	3.13	0.0037	0.0
Kaista~01	-5.63394	1.94399	-2.90	0.0066	1.0
Ura~06	0.08312	0.11626	0.71	0.4797	1.0
R-Squared	0.2213	Resid. Mean Square (MSE)			49688.2
Adjusted R-Squared	0.1741	Standard Deviation			222.909
AICc	395.44				
PRESS	1.92E+06				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	466037	233019	4.69	0.0161
Residual	33	1639711	49688		
Total	35	2105748			

Cases Included 36 Missing Cases 1

Selittävät muuttujat:**Keskinope = Liikennevirran keskinopeus (km/h) ruuhka-aikoina ma-pe 06-09 ja 15-18****KVL = KVL koko ajoradalla, ajon/vrk**Statistix 9.0
10:29:13

14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~08**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	259.956	87.5770	2.97	0.0055	0.0
Keskinope	-5.86122	2.37075	-2.47	0.0186	1.2
KVL	0.00588	0.00217	2.71	0.0104	1.2
R-Squared	0.2257	Resid. Mean Square (MSE)			49240.4
Adjusted R-Squared	0.1802	Standard Deviation			221.902
AICc	405.89				
PRESS	2.05E+06				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	488086	244043	4.96	0.0129
Residual	34	1674173	49240		
Total	36	2162259			
Lack of Fit	27	940389	34829	0.33	0.9820
Pure Error	7	733785	104826		

Cases Included 37 Missing Cases 0

Selittävät muuttujat:**KVL = KVL koko ajoradalla (ajon/vrk)****Nopeusraj = nopeusrajoitus (km/h)**Statistix 9.0
10:33:19

14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~08**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	586.892	198.262	2.96	0.0056	0.0
KVL	0.00871	0.00278	3.13	0.0036	1.9
Nopeusraj	-11.6029	4.66039	-2.49	0.0178	1.9
R-Squared	0.2274	Resid. Mean Square (MSE)			49134.8
Adjusted R-Squared	0.1819	Standard Deviation			221.664
AICc	405.81				
PRESS	1.93E+06				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	491677	245838	5.00	0.0125
Residual	34	1670582	49135		
Total	36	2162259			
Lack of Fit	21	767436	36544.6	0.53	0.9081
Pure Error	13	903146	69472.8		

Cases Included 37 Missing Cases 0

Selittävä muuttuja: Mittausvu = Mittauksen alkuvuosi (2005, 2006, 2007)

Statistix 9.0
11:58:38

14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~08**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	-225255	110817	-2.03	0.0497
Mittausvu	112.390	55.2338	2.03	0.0495

R-Squared	0.1058	Resid. Mean Square (MSE)	55243.7
Adjusted R-Squared	0.0802	Standard Deviation	235.040
AICc	408.69		
PRESS	2.15E+06		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	228731	228731	4.14	0.0495
Residual	35	1933528	55244		
Total	36	2162259			
Lack of Fit	1	27743	27742.5	0.49	0.4865
Pure Error	34	1905786	56052.5		

Cases Included 37 Missing Cases 0

Tehdyt lineaariset regressioanalyysit, joiden selitettävinä muuttujina vasemman tai oikean ajouran urasyvyys

Selittävä muuttuja: Ura~05 = oikean ajouran urasyvyys

Selittävät muuttujat: KVL = koko ajoradan keskivuorokausiliikenne ajon/vrk
Nopeusraja = nopeusrajoitus (km/h)

Statistix 9.0
12:04:55

Stagariuravasoikmaxei08, 14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~05**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	303.905	117.547	2.59	0.0199	0.0
KVL	0.00397	0.00186	2.14	0.0483	2.0
Nopeusraja	-5.46126	2.81001	-1.94	0.0698	2.0

R-Squared	0.2368	Resid. Mean Square (MSE)	10420.5
Adjusted R-Squared	0.1414	Standard Deviation	102.081
AICc	183.37		
PRESS	246015		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	51730	25865.0	2.48	0.1151
Residual	16	166729	10420.5		
Total	18	218459			

Lack of Fit	12	109482	9123.5	0.64	0.7547
Pure Error	4	57247	14311.7		

Cases Included 19 Missing Cases -1

Selitettävä muuttuja: Ura~02 = vasemman ajouran urasyvyys

Selittävät muuttujat: KVL = koko ajoradan keskivuorokausiliikenne ajon/vrk
Nopeusraj = nopeusrajoitus (km/h)

Statistix 9.0
12:05:26

Stagariuravasoikmaxei08, 14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~02

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	309.219	130.977	2.36	0.0313	0.0
KVL	0.00430	0.00207	2.08	0.0544	2.0
Nopeusraj	-4.77356	3.13106	-1.52	0.1469	2.0

R-Squared	0.2126	Resid. Mean Square (MSE)	12937.7
Adjusted R-Squared	0.1142	Standard Deviation	113.744
AICc	187.48		
PRESS	300910		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	55893	27946.7	2.16	0.1478
Residual	16	207003	12937.7		
Total	18	262896			

Lack of Fit	12	104028	8669.0	0.34	0.9358
Pure Error	4	102975	25743.8		

Cases Included 19 Missing Cases -1

Selitettävä muuttuja: Ura~05 = oikean ajouran urasyvyys

Selittävät muuttuja: Kaista~01 = ajokaistan leveys (cm)

Raskas = Raskaan liikenteen osuus * 0,01 %

Statistix 9.0
12:07:39

Stagariuravasoikmaxei08, 14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~05

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	2326.74	377.273	6.17	0.0000	0.0
Kaista~01	-6.88578	1.20287	-5.72	0.0000	2.8
Raskas	2.90185	0.80424	3.61	0.0024	2.8

R-Squared	0.6892	Resid. Mean Square (MSE)	4243.49
Adjusted R-Squared	0.6504	Standard Deviation	65.1421

AICc 166.30
PRESS 93352

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	150563	75281.4	17.74	0.0001
Residual	16	67896	4243.5		
Total	18	218459			
Lack of Fit	10	36726.7	3672.67	0.71	0.7010
Pure Error	6	31169.2	5194.86		

Cases Included 19 Missing Cases 1

Selitetävä muuttuja: Ura~02 = vasemman ajouran urasyvyys

Selittävät muuttuja: Kaista~01 = ajokaistan leveys (cm)

Raskas = Raskaan liikenteen osuus * 0,01 %

Statistix 9.0
12:08:34

Stagariuravasoikmaxei08, 14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~02

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	954.106	676.530	1.41	0.1776	0.0
Kaista~01	-2.24392	2.15701	-1.04	0.3137	2.8
Raskas	-0.06942	1.44217	-0.05	0.9622	2.8
R-Squared	0.1695	Resid. Mean Square (MSE)			13645.4
Adjusted R-Squared	0.0657	Standard Deviation			116.814
AICc	188.49				
PRESS	349664				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	44570	22285.0	1.63	0.2262
Residual	16	218326	13645.4		
Total	18	262896			
Lack of Fit	10	171543	17154.3	2.20	0.1735
Pure Error	6	46784	7797.3		

Cases Included 19 Missing Cases -1

Selitettävä muuttuja: Ura~05 = oikean ajouran urasyvyys

Selittävät muuttuja: Kaista~01 = ajokaistan leveys (cm)

Raskas = Raskaan liikenteen osuus * 0,01 %

Nopeusraja = nopeusrajoitus (km/h)

Statistix 9.0
12:12:25

Stagariuravasoikmaxei08, 14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~05

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	2482.81	372.405	6.67	0.0000	0.0
Kaista~01	-7.74286	1.26356	-6.13	0.0000	3.4
Raskas	3.37251	0.82020	4.11	0.0009	3.2
Nopeusraja	2.17591	1.34759	1.61	0.1272	1.2
R-Squared	0.7352	Resid. Mean Square (MSE)			3856.15
Adjusted R-Squared	0.6823	Standard Deviation			62.0979
AICc	167.02				
PRESS	83392				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	160616	53538.8	13.88	0.0001
Residual	15	57842	3856.2		
Total	18	218459			
Lack of Fit	10	28839.1	2883.91	0.50	0.8376
Pure Error	5	29003.2	5800.63		

Cases Included 19 Missing Cases -1

Selitettävä muuttuja: Ura~05 = oikean ajouran urasyvyys

Selittävät muuttuja: Kaista~01 = ajokaistan leveys (cm)

Raskas = Raskaan liikenteen osuus * 0,01 %

KVL~01 = ajokaistakohtainen kvl (ajon/vrk)

Statistix 9.0
12:15:48

Stagariuravasoikmaxei08, 14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~05

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	2083.17	328.244	6.35	0.0000	0.0
Kaista~01	-6.51683	1.01737	-6.41	0.0000	2.9
Raskas	2.90812	0.67442	4.31	0.0006	2.8
KVL~01	0.01367	0.00491	2.78	0.0139	1.1
R-Squared	0.7951	Resid. Mean Square (MSE)			2984.08
Adjusted R-Squared	0.7541	Standard Deviation			54.6267

AICc 162.14
PRESS 70468

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	173698	57899.2	19.40	0.0000
Residual	15	44761	2984.1		
Total	18	218459			
Lack of Fit	13	28572.5	2197.88	0.27	0.9459
Pure Error	2	16188.7	8094.33		
Cases Included	19	Missing Cases	1		

Selitettävä muuttuja: Ura~02 = vasemman ajouran urasyvyyden muutos

Selittävät muuttuja: Kaista~01 = ajokaistan leveys (cm)

Raskas = Raskaan liikenteen osuus * 0,01 %

KVL~01 = ajokaistakohtainen kvl (ajon/vrk)

Statistix 9.0
12:19:46

Stagariuravasoikmaxei08, 14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~02

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	685.834	676.737	1.01	0.3269	0.0
Kaista~01	-1.83755	2.09750	-0.88	0.3948	2.9
Raskas	-0.06252	1.39045	-0.04	0.9647	2.8
KVL~01	0.01505	0.01012	1.49	0.1576	1.1
R-Squared	0.2763	Resid. Mean Square (MSE)			12684.0
Adjusted R-Squared	0.1315	Standard Deviation			112.623
AICc	189.64				
PRESS	344224				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	72636	24211.9	1.91	0.1715
Residual	15	190261	12684.0		
Total	18	262896			
Lack of Fit	13	151186	11629.7	0.60	0.7756
Pure Error	2	39075	19537.3		
Cases Included	19	Missing Cases	-1		

Selitettävä muuttuja: Ura~05 = oikean ajouran urasyvyyden muutos (mm)

KVL~01 = ajokaistakohtainen kvl (ajon/vrk)

Keskinope = Liikennevirran keskinopeus ruuhka-aikoina ma-pe 06-09 ja 15-18

Statistix 9.0
12:22:59

Stagariuravasoikmaxei08, 14.2.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~05

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	65.9512	79.9364	0.83	0.4215	0.0
KVL~01	0.02024	0.00778	2.60	0.0193	1.0
Keskinope	-3.20156	1.31272	-2.44	0.0268	1.0
R-Squared	0.4256	Resid. Mean Square (MSE)			7842.28
Adjusted R-Squared	0.3538	Standard Deviation			88.5567
AICc	177.97				
PRESS	186816				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	92982	46491.1	5.93	0.0118
Residual	16	125477	7842.3		
Total	18	218459			
			Cases Included 19	Missing Cases -1	

**Selitettävä muuttuja: Ura~11 X-jakopisteohjelman poikkiprofileista (liite 5)
kerätty urien poikki-pinta-ala (cm²)**

Selittävä muuttuja: Keskin~01 = keskinopeus ruuhka-aikoina (km/h)

Statistix 9.0
13:45:56

7.6.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~11

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	24.8762	20.2540	1.23	0.2591
Keskin~01	0.12606	0.49818	0.25	0.8075
R-Squared	0.0091	Resid. Mean Square (MSE)		466.589
Adjusted R-Squared	-0.1325	Standard Deviation		21.6007
AICc	63.847			
PRESS	5295.9			

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	29.88	29.877	0.06	0.8075
Residual	7	3266.12	466.589		
Total	8	3296.00			
Lack of Fit	5	1443.62	288.725	0.32	0.8701
Pure Error	2	1822.50	911.250		

Cases Included 9 Missing Cases 0

Selittävä muuttuja: KVL~01 = ajokaistakohtainen keskivuorokausiliikenne (ajon/vrk)

Statistix 9.0
13:47:25

7.6.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~11**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	-6.98914	19.7681	-0.35	0.7341
KVL~01	0.00425	0.00219	1.94	0.0934

R-Squared	0.3498	Resid. Mean Square (MSE)	306.143
Adjusted R-Squared	0.2569	Standard Deviation	17.4969
AICc	60.055		
PRESS	2920.6		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	1153.00	1153.00	3.77	0.0934
Residual	7	2143.00	306.14		
Total	8	3296.00			

Cases Included 9 Missing Cases 10

Selittävä muuttuja: KVL = ajoradan molempien suuntien kaikkien ajokaistojen keskivuorokausiliikenne (ajon/vrk)

Statistix 9.0
13:48:06

7.6.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~11**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	17.7994	11.6982	1.52	0.1719
KVL	5.162E-04	4.212E-04	1.23	0.2600

R-Squared	0.1766	Resid. Mean Square (MSE)	387.680
Adjusted R-Squared	0.0590	Standard Deviation	19.6896
AICc	62.180		
PRESS	5419.7		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	582.24	582.238	1.50	0.2600
Residual	7	2713.76	387.680		
Total	8	3296.00			

Cases Included 9 Missing Cases 10

Selittävä muuttuja: Raskas = Raskaan liikenteen osuus * 0,01 %

Statistix 9.0
13:48:39

7.6.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~11**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	12.8665	14.7732	0.87	0.4127
Raskas	0.23662	0.18669	1.27	0.2455

R-Squared	0.1867	Resid. Mean Square (MSE)	382.969
Adjusted R-Squared	0.0705	Standard Deviation	19.5696
AICc	62.070		
PRESS	4575.9		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	615.22	615.217	1.61	0.2455
Residual	7	2680.78	382.969		
Total	8	3296.00			

Lack of Fit	5	980.78	196.157	0.23	0.9190
Pure Error	2	1700.00	850.000		

Cases Included 9 Missing Cases 10

Selittävä muuttuja: Kaista~01 = ajokaistan leveys (cm)

Statistix 9.0
13:50:19

7.6.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~11**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	36.6667	124.204	0.30	0.7764
Kaista~01	-0.02000	0.35427	-0.06	0.9566

R-Squared	0.0005	Resid. Mean Square (MSE)	470.643
Adjusted R-Squared	-0.1423	Standard Deviation	21.6943
AICc	63.925		
PRESS	5632.6		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	1.50	1.500	0.00	0.9566
Residual	7	3294.50	470.643		
Total	8	3296.00			

Lack of Fit	1	684.50	684.500	1.57	0.2563
Pure Error	6	2610.00	435.000		

Cases Included 9 Missing Cases 10

Selittävä muuttuja: Nopeusraj = nopeusrajoitus (km/h)

Statistix 9.0
13:51:05

7.6.2012,

Least Squares Linear Regression of Ura~11**Predictor**

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	4.16327	32.9352	0.13	0.9030
Nopeusraj	0.49898	0.62996	0.79	0.4543

R-Squared	0.0823	Resid. Mean Square (MSE)	432.127
Adjusted R-Squared	-0.0489	Standard Deviation	20.7877
AICc	63.157		
PRESS	4801.6		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	271.11	271.112	0.63	0.4543
Residual	7	3024.89	432.127		
Total	8	3296.00			

Lack of Fit	3	532.89	177.629	0.29	0.8347
Pure Error	4	2492.00	623.000		

Cases Included 9 Missing Cases 10

LIITE 7. Statistix-malleissa käytetty numeerinen katukuntotieto

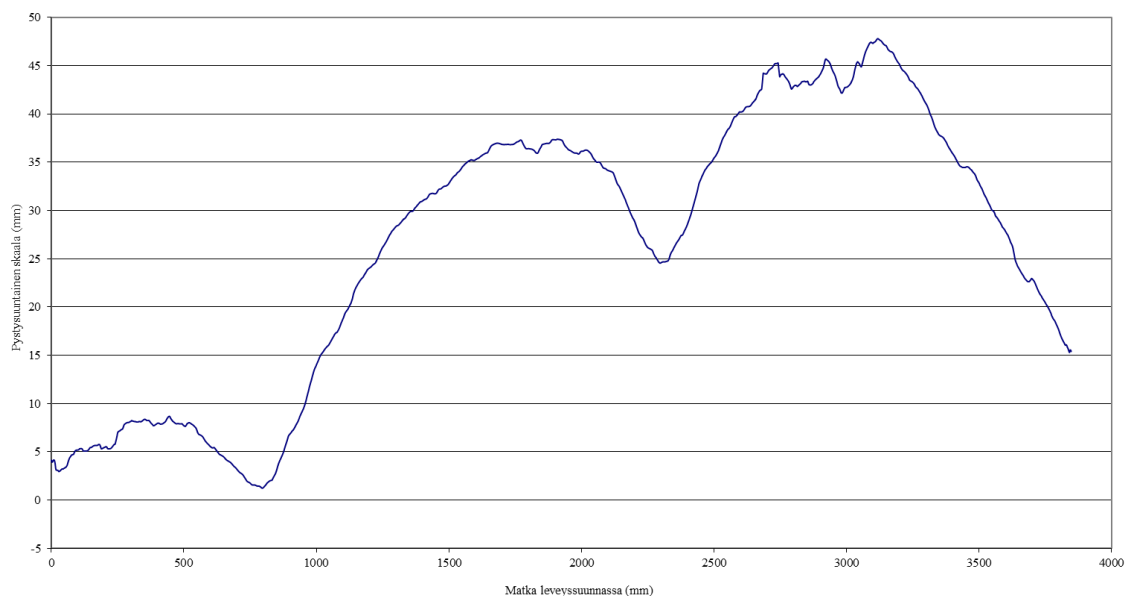
Mittausvuodet	KVL katu	KVL kaista	Nopeusrajoitus	Tasainen nopeus	Liittymän lähellä	Suuri pysähtymis-%	Keskinopeus ruuhka	Keskinopeus ei-ruuhka	Raskas liikenne %	Kaistojen lkm/suunta	Kaista reuna 1 = kaide / r	Kaista leveys	Massatyypit	Max raekoko (mm)	Bitumi	Stabiloitu	Ura vasen alku	Ura vasen loppu	Ura vasen muutos	Ura oikea alku	Ura oikea loppu	Ura oikea muutos	Ura max alku	Ura max loppu	Ura max muutos
2005/2006	18620	9510	50	1	0	0	46	48	4	1		3,25	SMA	18	50/70	1	2,42	5,31	2,89	1,76	3,77	2,03	2,97	5,56	2,08
2007/2008	18700	9550	50	1	0	0	46	48	4	1		3,25	SMA	18	50/70	1							5,01	9,96	4,95
2005/2006	18600	9300	60	1	0	0	41	45	10,8	1		3,25	SMA	18	50/70	1	5,22	7,53	2,31	4,86	6,88	1,97	7,95	8,40	0,95
2006/2007	19160	9580	60	1	0	0	41	45	10,8	1		3,25	SMA	18	50/70	1	7,53	9,29	1,76	6,83	7,25	0,42	8,40	10,17	1,77
2007/2008	19900	9550	60	1	0	0	41	45	10,8	1		3,25	SMA	18	50/70	1							10,17	10,99	0,82
2006/2007	7830	3915	50	1	0	0	48	48	11,6	1		2,35	A8	22	50/70	0	1,69	1,76	0,07	1,17	1,46	0,29	1,82	1,95	0,13
2007/2008	8000	4000	50	1	0	0	48	48	11,6	1		2,35	A8	22	50/70	0							1,95	2,90	0,95
2006/2007	7790	3875	50	1	0	0	26	24	4	1		2,35	A8	16	70/100	0	2,40	3,00	0,60	2,91	2,96	0,06	3,66	3,72	0,07
2007/2008	8000	4000	50	1	0	0	26	24	4	1		2,35	A8	16	70/100	0							3,72	4,41	0,69
2005/2006	16700	8350	60	0	1	1	31	35	3,8	1		3,25	SMA	18	50/70	0	7,61	8,18	0,57	7,14	8,51	1,37	8,81	9,55	0,74
2007/2008	17200	8600	60	0	1	1	31	35	3,8	1		3,25	SMA	18	50/70	0							2,42	3,40	0,98
2006/2007	39600	19300	50	1	0	0	22	26	4,5	2		1,35	SMA	18	50/70	1	6,33	8,18	1,65	6,86	8,98	2,12	8,26	10,30	2,04
2006/2007	39600	19300	50	1	0	0	22	26	4,5	2		1,35	SMA	18	50/70	0									
2007/2008	41700	12510	50	1	0	0	22	26	4,5	2		1,35	SMA	18	50/70	1									
2007/2008	41700	8340	50	0	1	0	22	26	1,4	2		1,35	SMA	18	50/70	0									
2006/2007	39600	19300	50	0	1	0	18	18	4,5	2		1,35	SMA	18	50/70	1	3,81	5,54	1,73	3,89	6,32	2,43	4,67	6,86	2,19
2006/2007	39600	7936	50	0	1	0	18	18	1,4	2		1,35	SMA	18	50/70	0									
2007/2008	41700	12510	50	0	1	0	18	18	4,5	2		1,35	SMA	18	50/70	1									
2007/2008	41700	8340	50	0	1	0	18	18	1,4	2		1,35	SMA	18	50/70	0									
2006/2007	39600	19300	50	0	1	1	9	15	4,5	2		1,35	SMA	18	50/70	1	11,50	15,61	4,11	10,05	13,86	3,81	12,26	16,16	3,90
2006/2007	39600	7936	50	0	1	1	9	15	1,4	2		1,35	SMA	18	50/70	0									
2007/2008	41700	12510	50	0	1	1	9	15	4,5	2		1,35	SMA	18	50/70	1									
2007/2008	41700	8340	50	0	1	1	9	15	1,4	2		1,35	SMA	18	50/70	0									
2006/2007	17700	8595	40	1	0	0	20	26	1,5	1		3,25	SMA	18	50/70	0	5,56	7,48	1,92	6,41	7,42	1,01	7,31	9,08	1,77
2007/2008	17700	8595	40	1	0	0	20	26	1,5	1		3,25	SMA	18	50/70	0									
2006/2007	17700	8595	40	0	1	1	10	15	1,5	1		3,25	SMA	18	50/70	0									
2007/2008	17700	8595	40	0	1	1	10	15	1,5	1		3,25	SMA	18	50/70	0									
2006/2007	59820	10468	70	1	0	0	61	65	5	3		1,35	KEVA	16	685	0	3,05	5,01	1,94	3,13	5,77	2,64	3,90	6,08	2,18
2006/2007	59820	7478	70	1	0	0	61	65	3	3		1,35	KEVA	16	685	0	1,64	2,22	0,58	2,00	2,27	0,27	2,29	2,72	0,43
2006/2007	59820	11564	70	1	0	0	61	65	2,5	3		1,35	KEVA	16	685	0	1,67	5,80	4,13	1,72	1,76	0,04	2,09	6,44	4,34
2007/2008	60300	10552	70	1	0	0	61	65	5	3		1,35	KEVA	16	685	0									
2007/2008	60300	7538	70	1	0	0	61	65	3	3		1,35	KEVA	16	685	0									
2007/2008	60300	12066	70	1	0	0	61	65	2,5	3		1,35	KEVA	16	685	0									
2006/2006	12700	6350	30	0	0	0	1	18	24	5	1	1,35	SMA	16	50/70	0	3,94	5,64	1,70	3,56	5,64	2,08	4,52	6,48	1,94
2006/2007	13070	6535	30	0	0	0	1	18	24	5	1	1,35	SMA	16	50/70	0	5,64	8,41	2,77	5,64	7,76	2,08	6,48	9,08	2,60
2005/2006	19200	9400	50	1	0	0	0	39	42	10	2	1,35	KEVA	16	685	0	3,97	4,27	0,34	4,72	4,80	0,08	5,31	5,65	0,34
2006/2007	19780	9890	50	1	0	0	0	39	42	10	2	1,35	KEVA	16	685	0	4,27	4,45	0,18	4,80	5,26	0,48	5,65	6,01	0,36
2006/2007	10460	5230	40	1	0	0	0	30	34	4,8	1	3,35	SMA	16	50/70	0	4,05	5,65	1,60	4,77	4,99	0,22	5,87	6,32	0,45
2007/2008	10800	5400	40	1	0	0	0	30	34	4,8	1	3,35	SMA	16	50/70	0									
2006/2007	10280	5140	40	1	1	25	28	9	1	1	1	3,35	SMA	16	50/70	0	10,0	12,65	2,65	9,58	10,48	0,94	12,23	14,52	2,29
2007/2008	10600	5300	40	0	1	1	25	28	9	1	1	3,35	SMA	16	50/70	0									

Liite 8. Urasyvyysmittaustulokset syksy 2011 ja kevät 2012 taulukossa

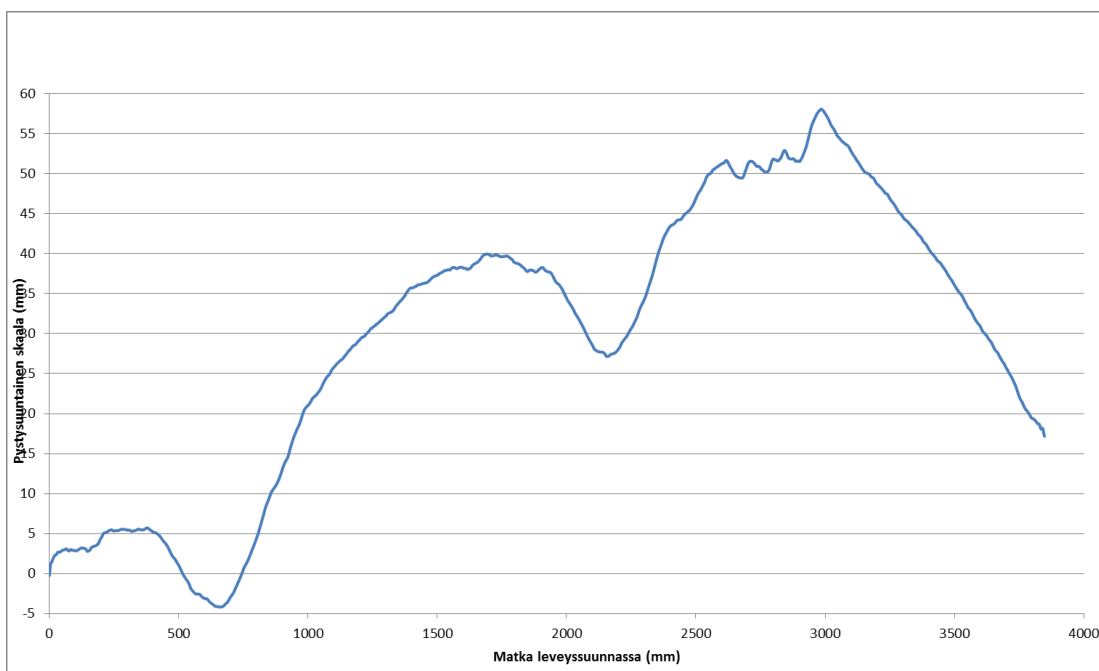
	Urasyvyys vasen (mm)			Urasyvyys oikea (mm)			Urien poikkipinta-ala yht. (cm ²)			Huom!		
Kuusisaarentie	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	SMA18, KVL 19500	19500	
Profiili 1	17.0	19.0	2.0	18.0	21.0	3.0	159.0	187.4	28.4			
Profiili 2	18.0	20.5	2.5	17.0	19.5	2.5	176.6	199.7	23.1			
Profiili 3	16.5	18.7	2.2	17.0	18.0	1.0	179.3	193.0	13.8	poikkeuksellisen pieni oikean uran muutos ja pinta-alamuutos		
Profiili 4	16.0	19.7	3.7	14.0	16.7	2.7	172.5	195.1	22.6		kuluminen pinta-alamuutos /	
Profiili 5	17.7	20.3	2.6	13.7	16.5	2.8	161.5	183.2	21.7		KVL:n 1000 ajon/vrk	
keskiarvo	17.0	19.6	2.6	15.9	18.3	2.4	169.8	191.7	21.8		1.12	
Meilahdentie	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	AB16, KVL 6300	6300	
Profiili 1	9.2	10	0.8	5	5	0	88.3	91.6	3.3	Ennen hidastetöyssyä		
Profiili 2	8.3	10.6	2.3	13.3	15.6	2.3	144	170.5	26.5	Suojatien jälkeen		
Profiili 3	7	8	1	4	6	2	74.7	89.8	15.1	Hidastetöyssyn jälkeen		
Profiili 4	7	10	3	9	9	0	107	123.5	16.5	Poikkeuksellisen suuri vasemman uran muutos	kuluminen pinta-alamuutos /	
Profiili 5	5.2	6	0.8	1	1.5	0.5	47.5	59.6	12.1		KVL:n 1000 ajon/vrk	
keskiarvo	7.3	8.9	1.6	6.5	7.4	1.0	92.3	107.0	14.7		2.333333	
Metsäläntie	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	SMA18, KVL 18800	18800	
Profiili 1	11.7	12.6	0.9	10.7	12	1.3	154.2	174.8	20.6			
Profiili 2	12.2	13.1	0.9	7	8.3	1.3	131.5	146.4	14.9			
Profiili 3	15.5	17.2	1.7	12.8	13	0.2	193.9	209.7	15.8			
Profiili 4	17	18.4	1.4	13	15.4	2.4	193.6	214	20.4		kuluminen pinta-alamuutos /	
Profiili 5	16.2	17.6	1.4	12.2	13.3	1.1	193.4	216.7	23.3		KVL:n 1000 ajon/vrk	
keskiarvo	14.5	15.8	1.3	11.1	12.4	1.3	173.32	192.32	19.00		1.010638	
Pirkkolantie	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	AB22, KVL 8000	8500	
Profiili 1	3.8	4.8	1	4	5.2	1.2	59.4	71.4	12			
Profiili 2	6.3	7	0.7	5.9	7.3	1.4	90	108	18			
Profiili 3	4.3	6	1.7	5.6	6.5	0.9	81.5	97.2	15.7		kuluminen pinta-alamuutos /	
Profiili 4	7.6	8.7	1.1	6	8	2	90.5	130.4	39.9	poikkeuksellisen suuri oikean uran muutos ja pinta-alamuutos	KVL:n 1000 ajon/vrk	
keskiarvo	5.5	6.6	1.1	5.4	6.8	1.4	80.4	101.7	15.2		1.792157	
Veturitie	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	SMA18, KVL 22400	22400	
Profiili 1	7.2	9.3	2.1	3.8	4.9	1.1	85.4	109.8	24.4	Kaare oikealle		
Profiili 2	7	8.1	1.1	4	4.1	0.1	78.1	95.8	17.7	poikkeuksellisen pieni oikean uran muutos ja pinta-alamuutos		
Profiili 3	7.3	9.4	2.1	4	5.5	1.5	81.4	108.2	26.8		kuluminen pinta-alamuutos /	
Profiili 4	7.5	7.8	0.3	4.3	5.7	1.4	78.3	108.3	30	lähestyy valo-ohjattua liittymää ja 2. ajokaistaa	KVL:n 1000 ajon/vrk	
keskiarvo	7.3	8.7	1.4	4.0	5.1	1.0	80.8	105.5	24.7		1.10	
Vauhtitie	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	AB16, KVL 8000	8300	
Profiili 1	2.2	2.7	0.5	1.5	1.9	0.4	18.2	22.5	4.3			
Profiili 2	2.4	2.7	0.3	1.8	2.3	0.5	21	26	5			
Profiili 3	1.9	2.6	0.7	2.2	2.5	0.3	17.9	25.7	7.8		kuluminen pinta-alamuutos /	
Profiili 4	4.2	4.9	0.7	3.5	4	0.5	39	43.8	4.8		KVL:n 1000 ajon/vrk	
keskiarvo	2.7	3.2	0.6	2.3	2.7	0.4	24.0	29.5	5.5		0.659639	
Töölönkatu	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	syksy 2011	keväät 2012	muutos	AB16, KVL 6000	6000	
Profiili 1	1.8	1.9	0.1	8.4	9	0.6	66.9	76.4	9.5	Ennen suojatietä ja tasa-arvoista liittymää		
Profiili 2	2.5	2.5	0	2.5	2.5	0	18	18.4	0.4	Suojatien jälkeen		
Profiili 3	3.2	3.3	0.1	8.7	8.7	0	56	57.2	1.2		kuluminen pinta-alamuutos /	
Profiili 4	2	2.5	0.5	3.3	3.4	0.1	12	16	4	1m ennen valo-ohjattua liittymän pysäytysviivaa	KVL:n 1000 ajon/vrk	
keskiarvo	2.4	2.6	0.2	5.7	5.9	0.2	38.2	42.0	3.8		0.629167	

Liite 9.

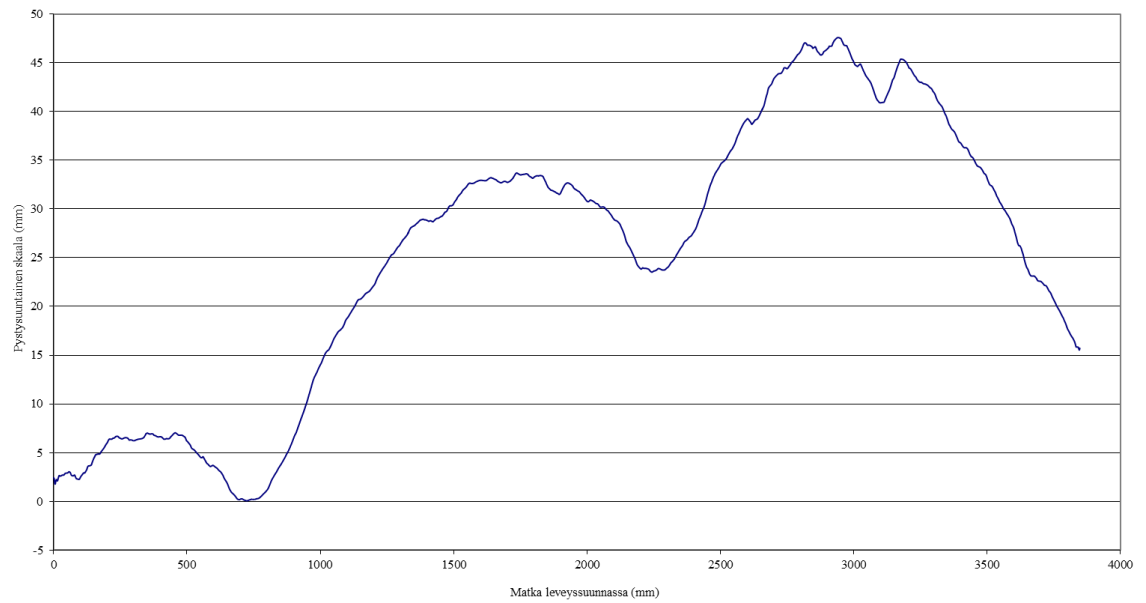
Urasyvyysmittauksissa profilometrillä mitatut poikkiprofiilit 5.-6.10.2011 ja 19.-20.4.2012. Urasyvyyden ja urien pinta-alan muutokset profiilikohtaisesti esitetty liitteen 8 taulukossa. Profiilikuvat ovat peilikuvia, joten piennar ja oikea ajoura sijaitsevat lähellä kuvan vasenta reunaa, ja ajoradan keskilinja sekä vasen ura lähellä kuvan oikeaa laitaa.



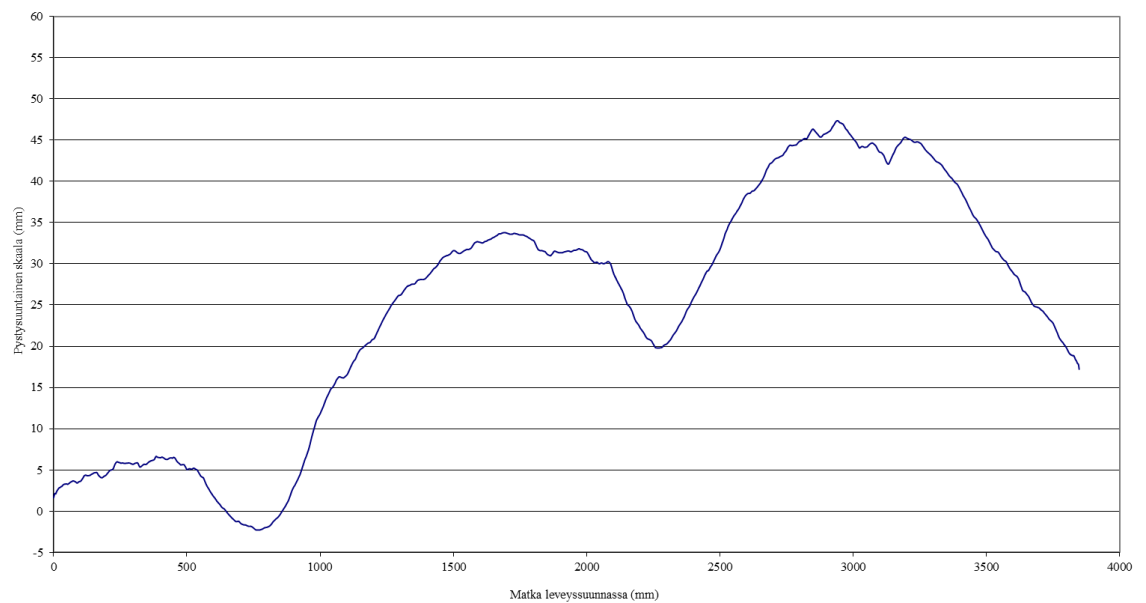
Kuusisaarentie, profiili 1, 2011. Max urasyvyys 18,0 mm, urien pinta-ala 159,0 cm^2 .



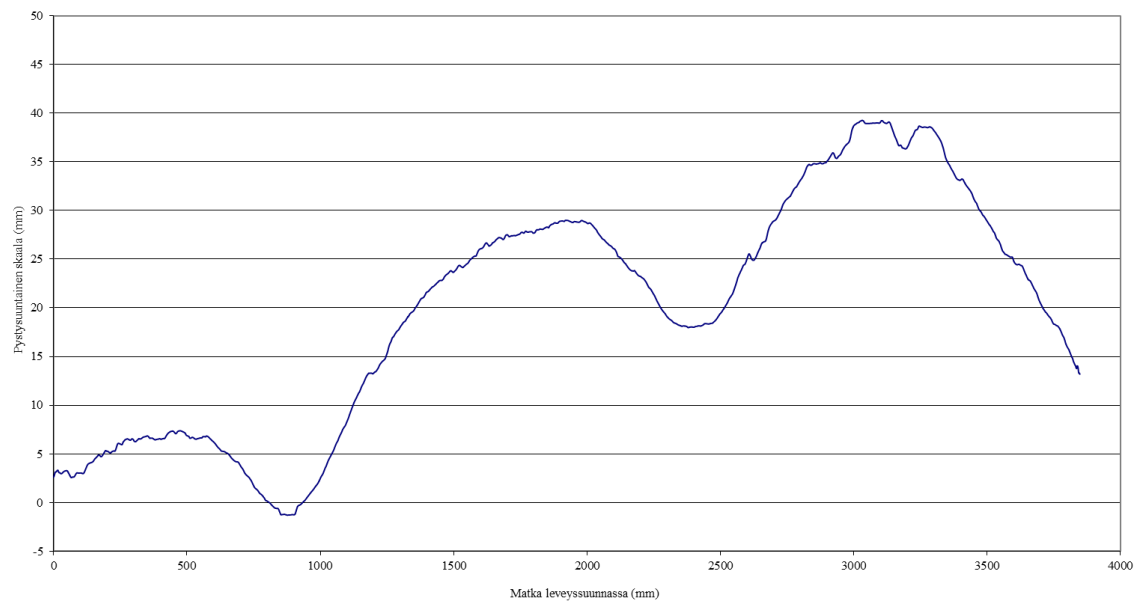
Kuusisaarentie, profiili 1, 2012. Max urasyvyys 21,0 mm, urien pinta-ala 187,4 cm^2



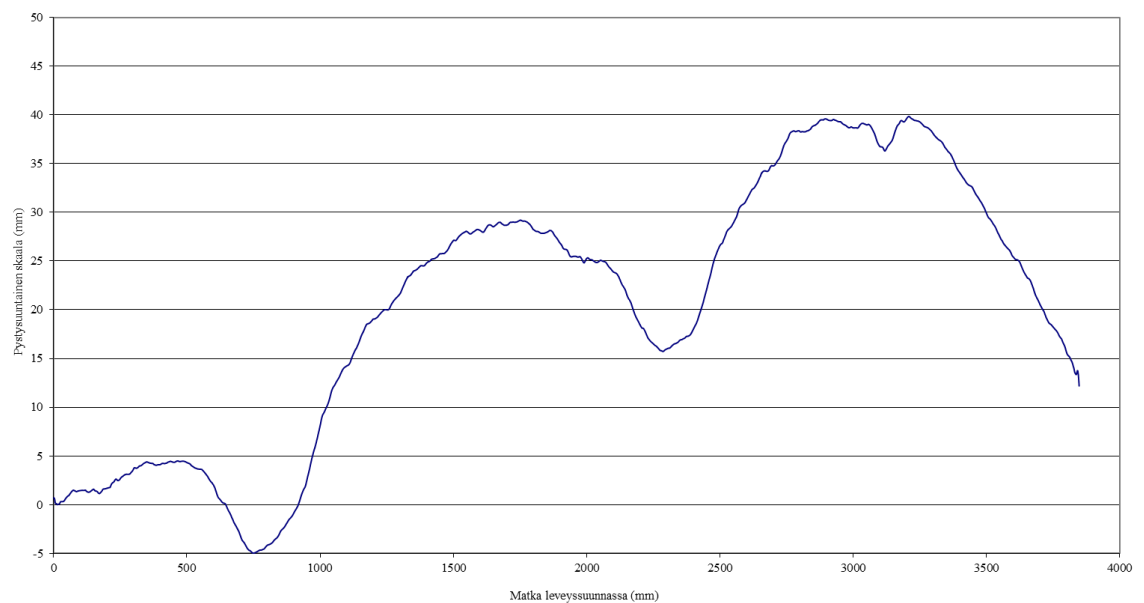
Kuusisaarentie, profiili 2, 2011. Max urasyvyys 18,0 mm, urien pinta-ala 176,6 cm^2 .



Kuusisaarentie, profiili 2, 2012. Max urasyvyys 20,5 mm, urien pinta-ala 199,7 cm^2 .

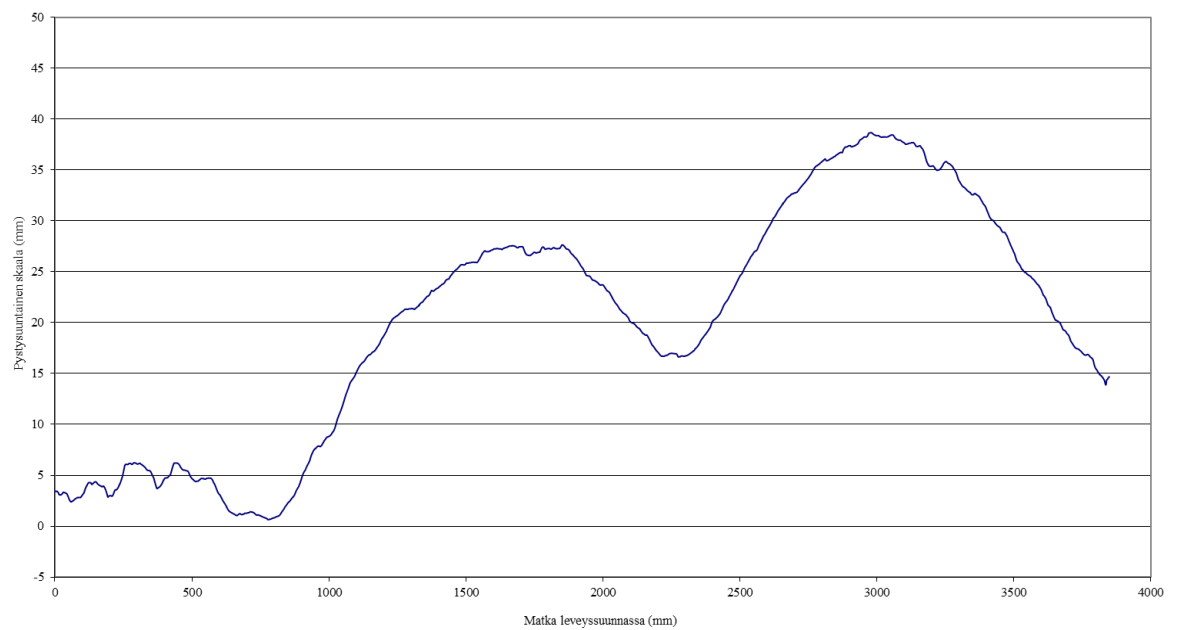


Kuusisaarentie, profiili 3, 2011. Max. urasyvyys 17,0 mm, urien pinta-ala 179,3 cm^2 .

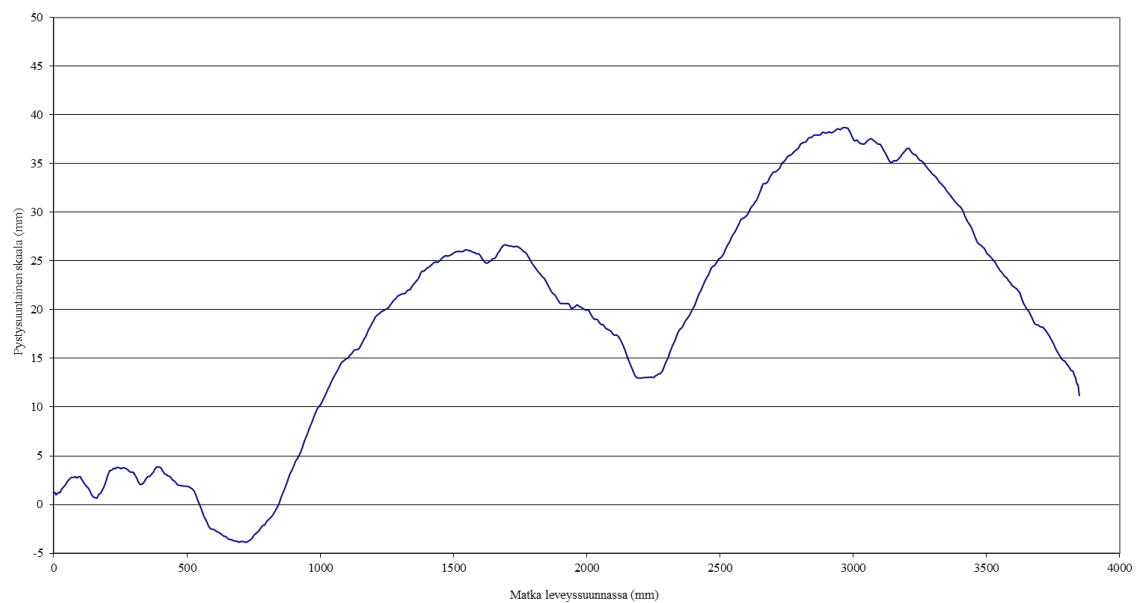


Kuusisaarentie, profiili 3, 2012. Max. urasyvyys 18,7 mm, urien pinta-ala 193,0 cm^2 .

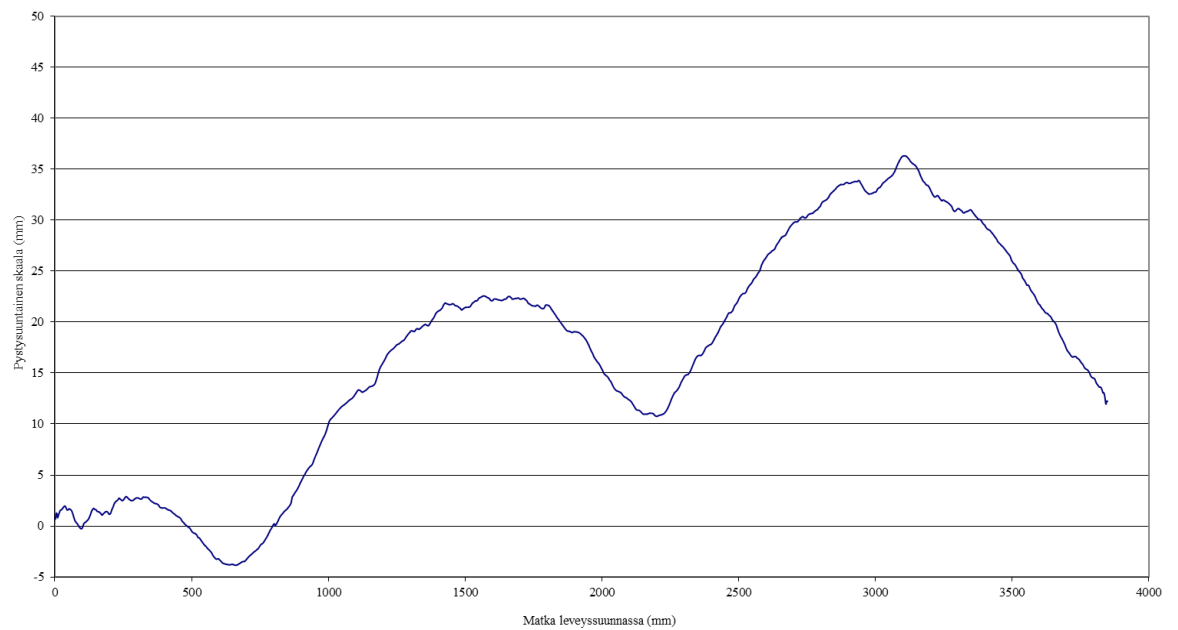
Kuusisaarentien profiilin 3 oikean urasyvyyden muutos mittausvälillä on ollut selvästi alhaisempi kuin mittauskohteen muissaprofiileissa (1,0 mm vs. muiden profiilien keskiarvo 2,75 mm). Tämän mittau tuloksen kohdalla on otettava huomioon mittausvirheen tai nastarengaskulumisesta riippumattomien muuttujien vaikutus mitattuun päällysteen pinnan muotoon.



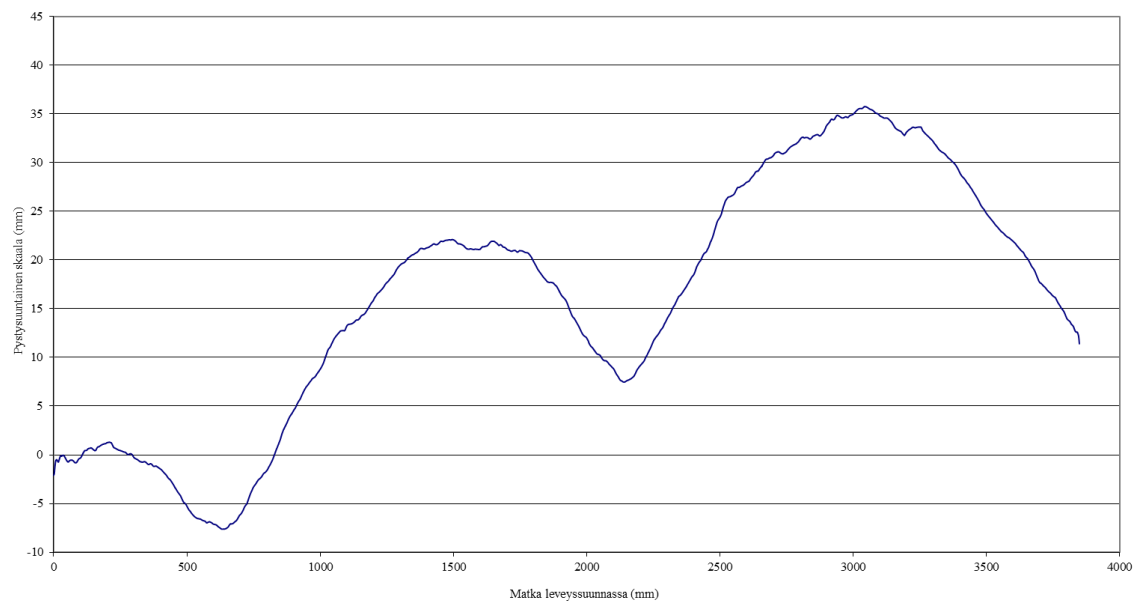
Kuusisaarentie, profiili 4, 2011. Max. urasyvyys 16,0 mm, urien pinta-ala 172,5 cm^2 .



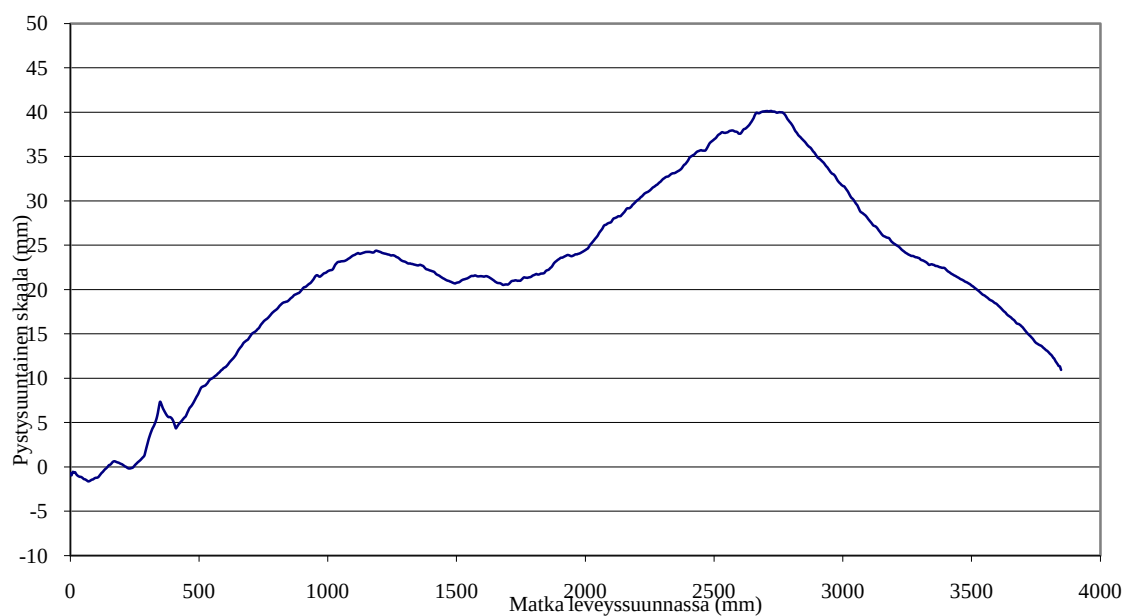
Kuusisaarentie, profiili 4, 2012. Max urasyvyys 19,7 mm, urien pinta-ala 195,1 cm^2 .



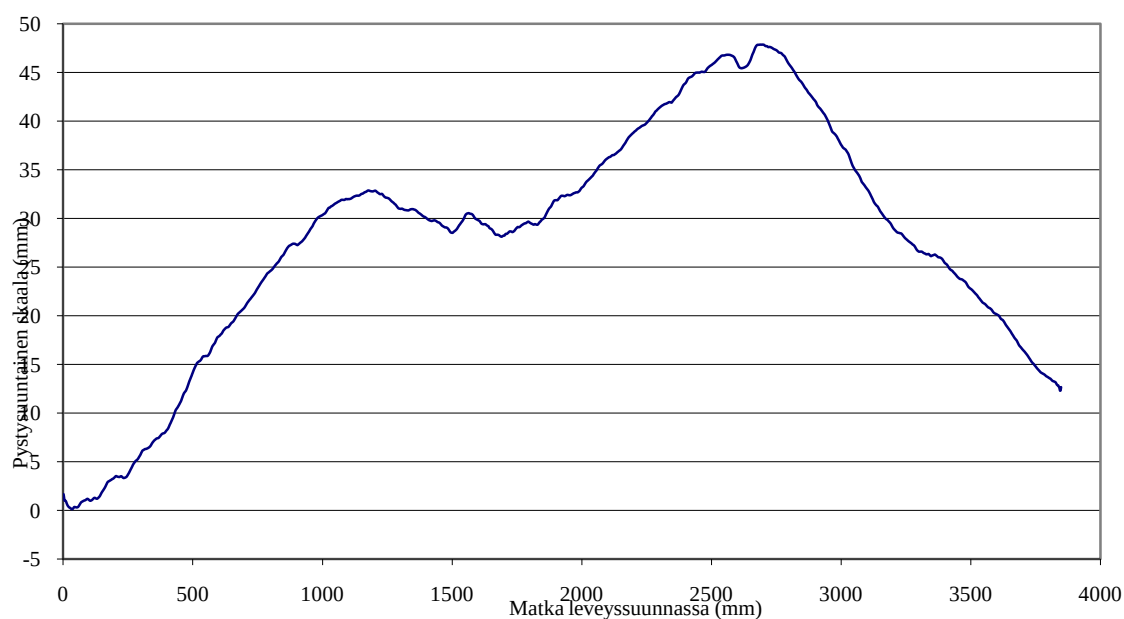
Kuusisaarentie, profiili 5, 2011. Max urasyvyys 17,7 mm, urien pinta-ala 161,5 cm^2 .



Kuusisaarentie, profiili 5, 2012. Max urasyvyys 20,3 mm, Urien pinta-ala 183,2 cm^2 .

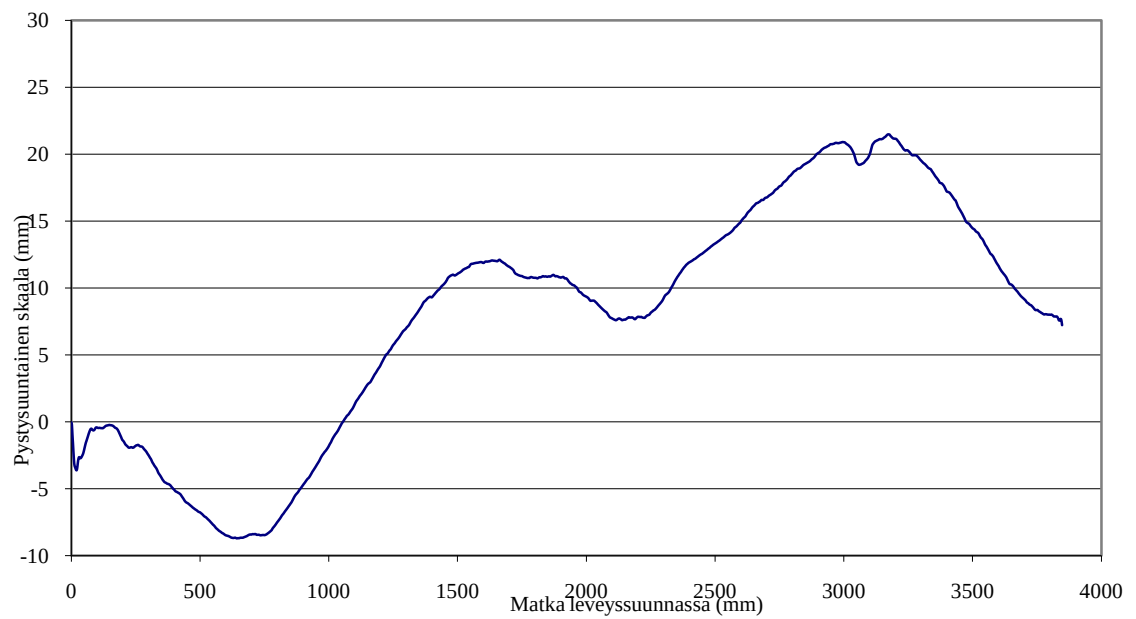


Meilahdentie, profiili 1, 2011. Max urasyvyys 9,2 mm, urien pinta-ala 88,3 cm^2

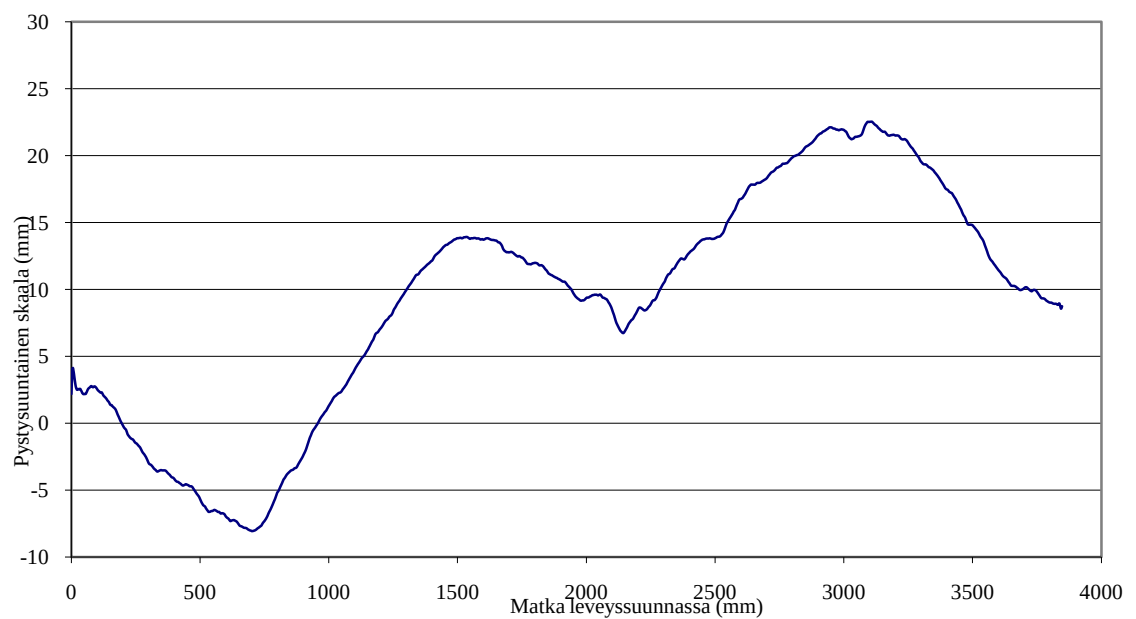


Meilahdentie, profiili 1, 2012. Max urasyvyys 10,0 mm, urien pinta-ala 91,6 cm^2

Meilahdentie profiili 1 mitattu n. 1 m ennen hidastetöyssyä. Hidastavien ajoneuvojen osuus keskimääräistä suurempi, arvioitu liikenteen keskinopeus 15 km/h.

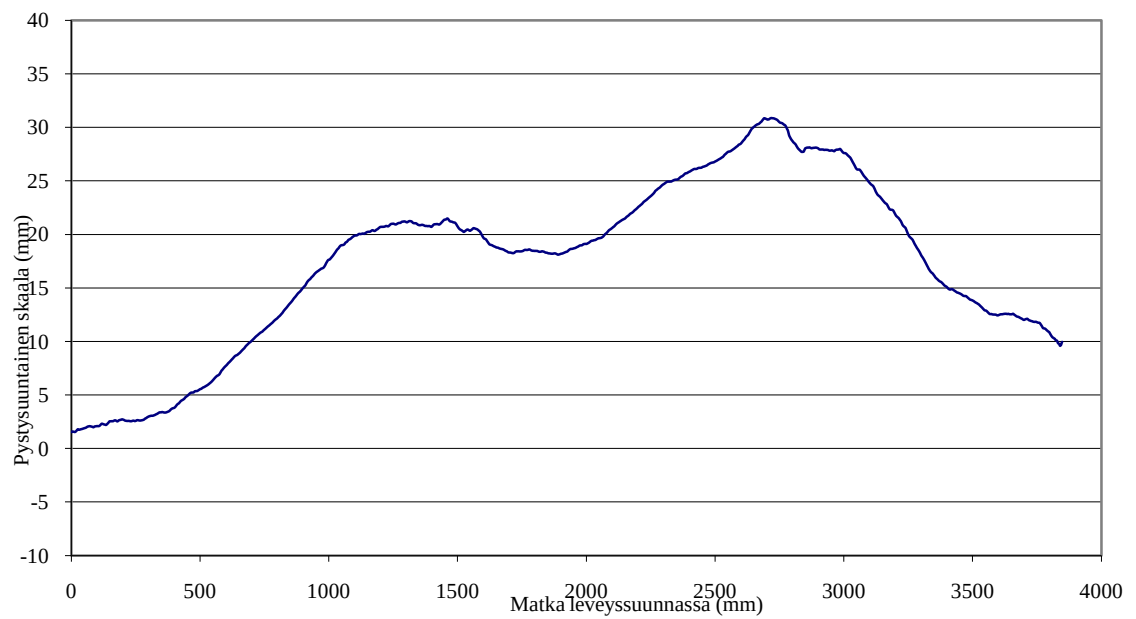


Meilahdentie, profiili 2, 2011. Max urasyvyys 13,3 mm, urien pinta-ala $144,0 \text{ cm}^2$

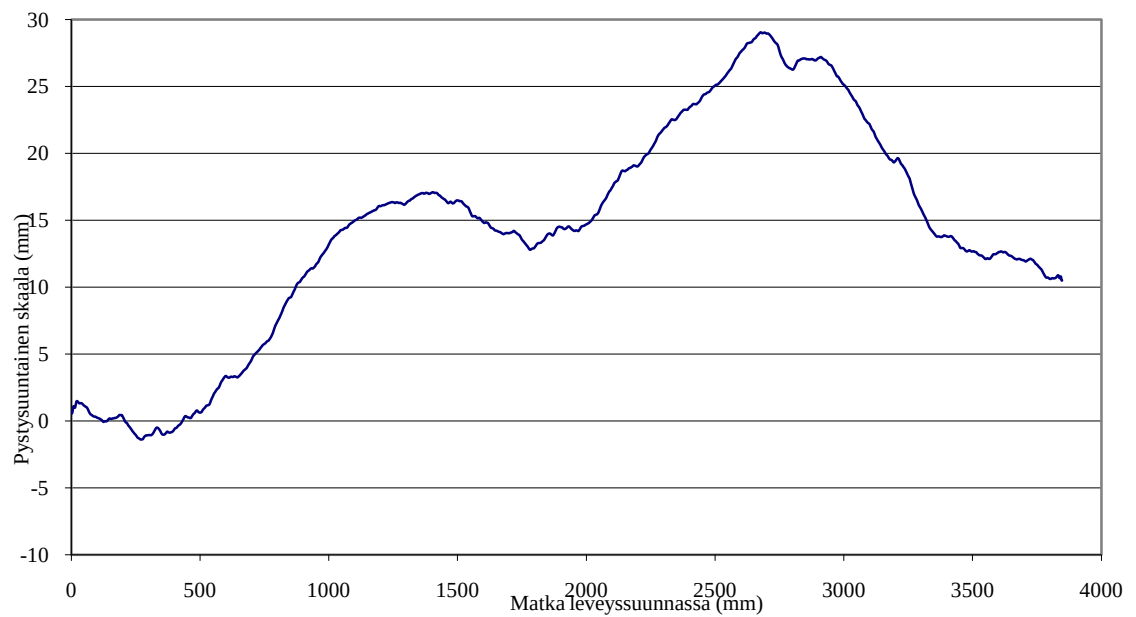


Meilahdentie, profiili 2, 2012. Max urasyvyys 15,6 mm, urien pinta-ala $170,5 \text{ cm}^2$

Meilahdentie profiili 2 mitattu n. 1,5 m suojatien jälkeen. Suuri osa ajoneuvoista kiihdyttää tämän profiilin kohdalla.

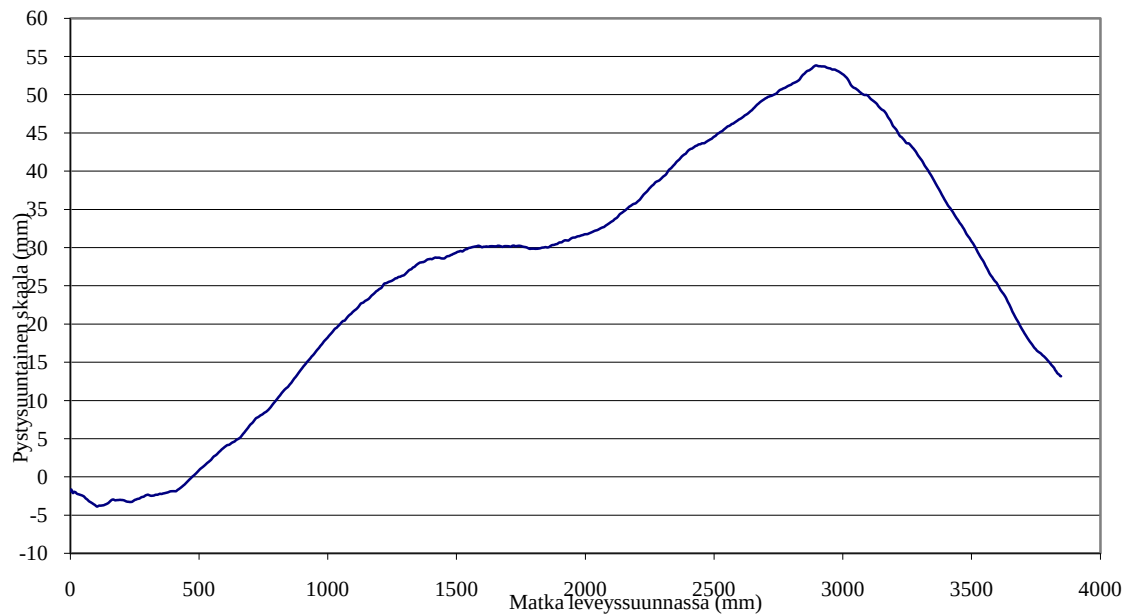


Meilahdentie, profiili 3, 2011. Max urasyvyys 7,0 mm, urien pinta-ala 74,7 cm^2

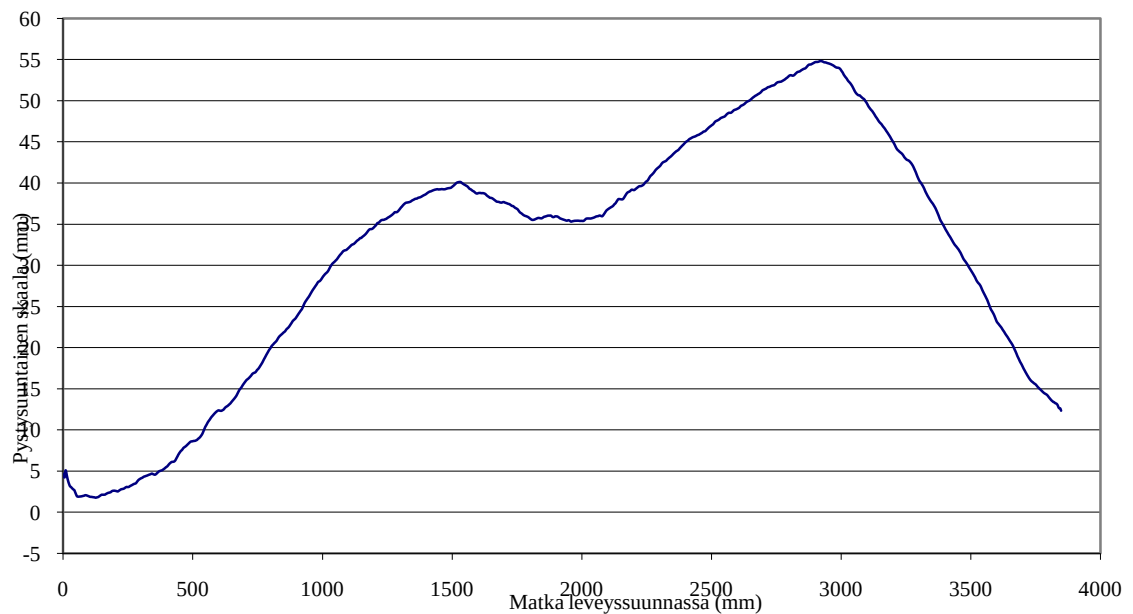


Meilahdentie, profiili 3, 2012. Max urasyvyys 8,0 mm, urien pinta-ala 89,8 cm^2

Meilahdentie profiili 3 on mitattu n. 1,5 m suojatien jälkeisen hidastetöyssyn jälkeen. Suuri osa ajoneuvoista kiihdyttää tämän profiilin kohdalla.

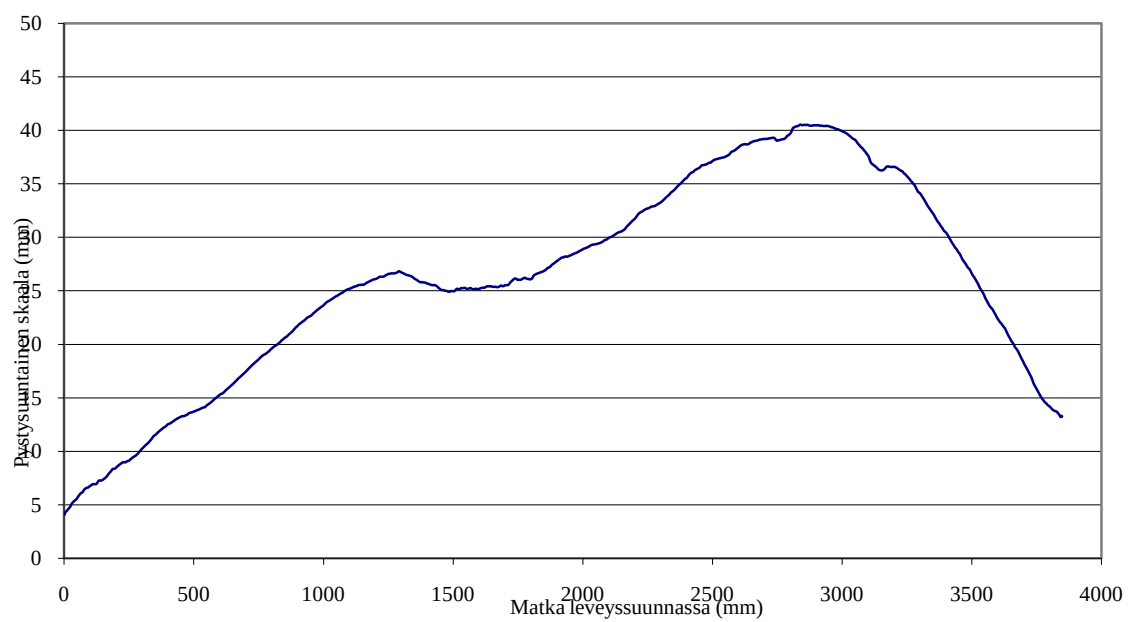


Meilahdentie, profiili 4, syksy 2011. Max urasyvyys 9,0 mm, urien pinta-ala 107,0 cm^2

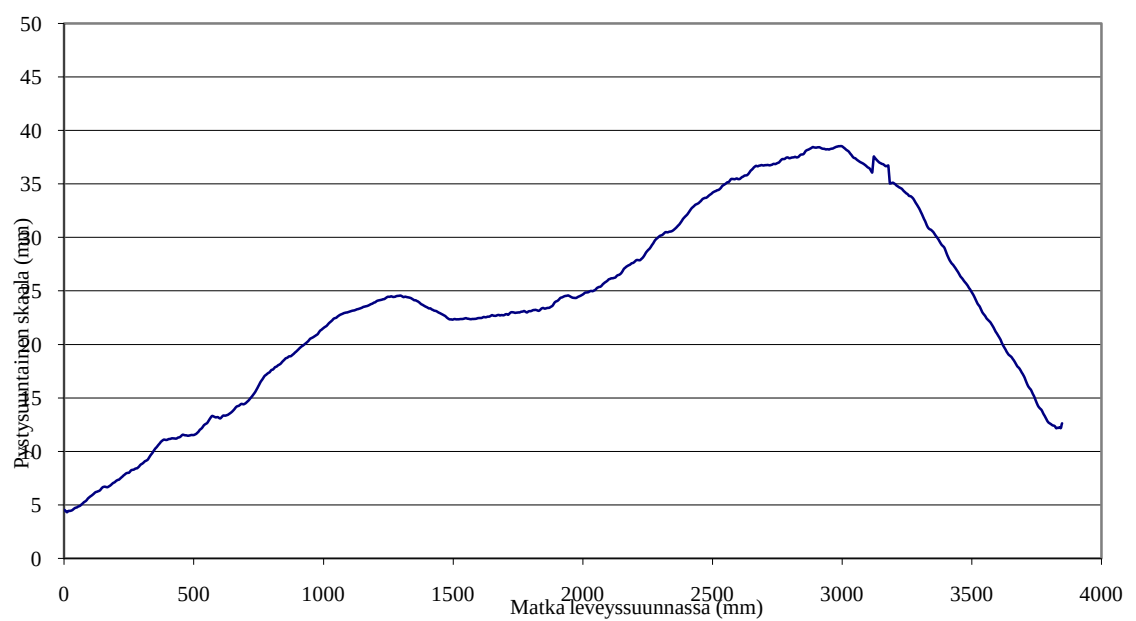


Meilahdentie, profiili 4, 2012. Max urasyvyys 10,0 mm, urien pinta-ala 125,5 cm^2

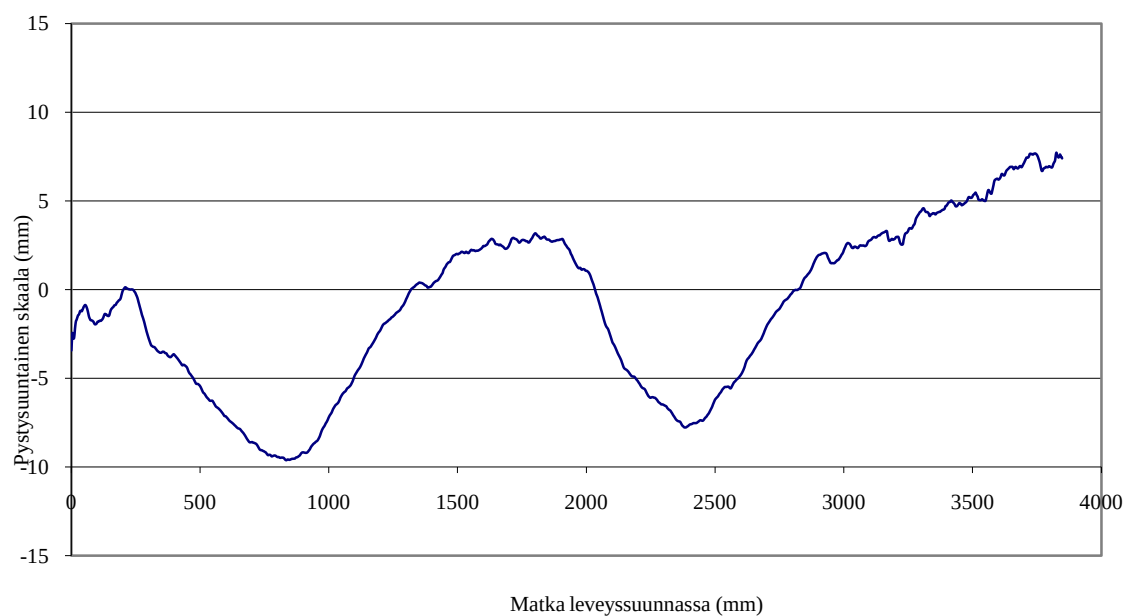
Meilahdentie profiilin 4 vasemman uran urasyvyyden muutos on ollut poikkeuksellisen suuri verrattuna mittauskohteen muihin profiileihin (vrt. 3,0 mm vs. mittauskohteen kaikkien muiden profiilien keskiarvo 1,22 mm ja toisen keskimäärin lähes tasaisella ajonopeudella ylitetyn profiilin 5 muutos 0,8 mm). Tämän mittauksen kohdalla on otettava huomioon mittausvirheen tai nastarengaskulumisesta riippumattomien muuttujien vaikutus mitattuun päällysteen pinnan muotoon.



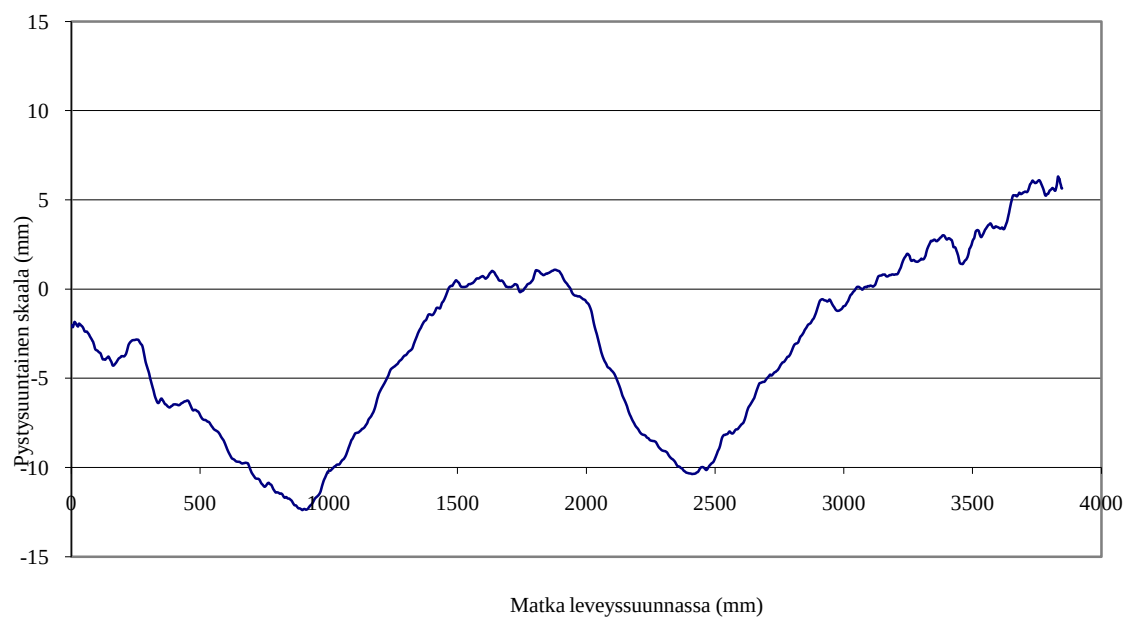
Meilahdentie, 2011, profiili 5. Max urasyvyys 5,2 mm, urien pinta-ala 47,5 cm^2



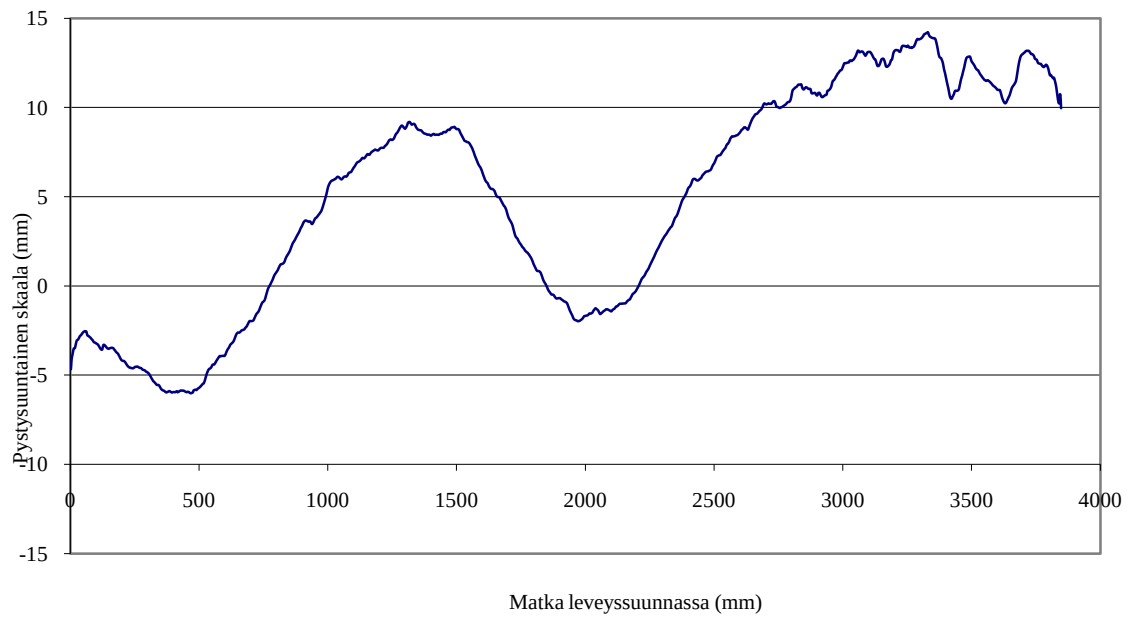
Meilahdentie, profiili 5, 2012. Max urasyvyys 6,0 mm, urien pinta-ala 59,6 cm^2



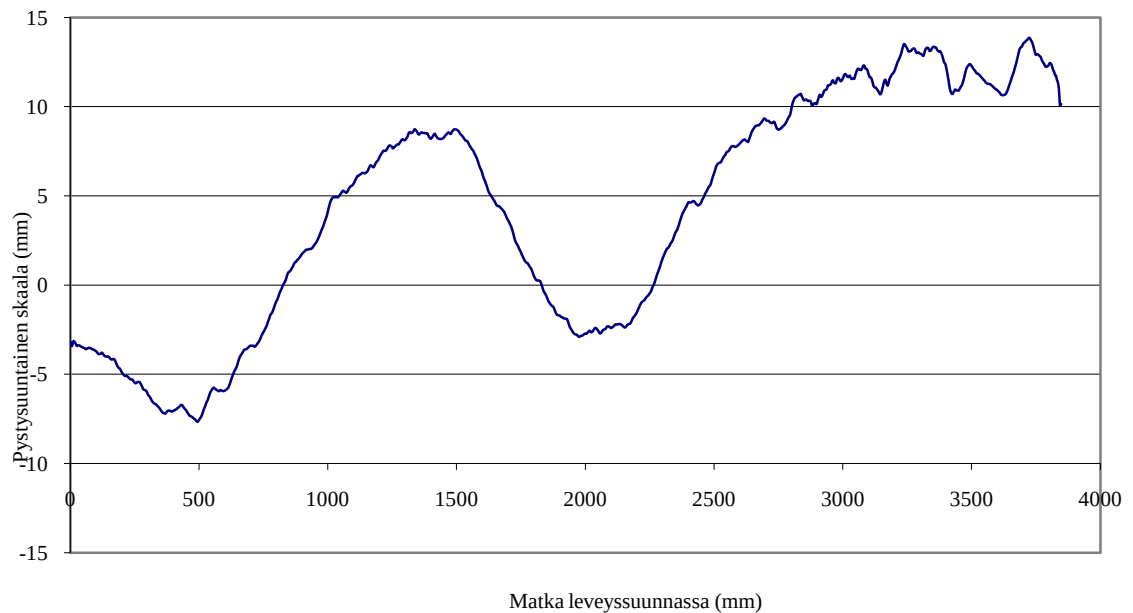
Metsäläntie, profiili 1, 2011. Max urasyvyys 11,7 mm, urien pinta-ala 154,2 cm^2



Metsäläntie, profiili 1, 2012. Max urasyvyys 12,6 mm, urien pinta-ala 174,8 cm^2

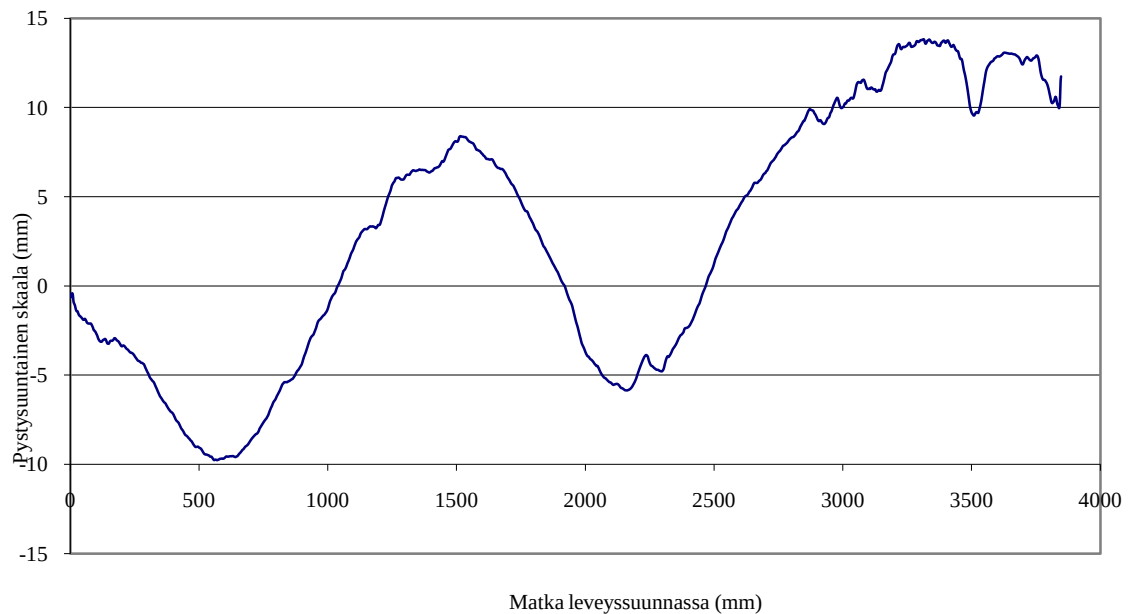


Metsäläntie, profiili 2, 2011. Max urasyvyys 12,2 mm, urien pinta-ala 131,5 cm^2

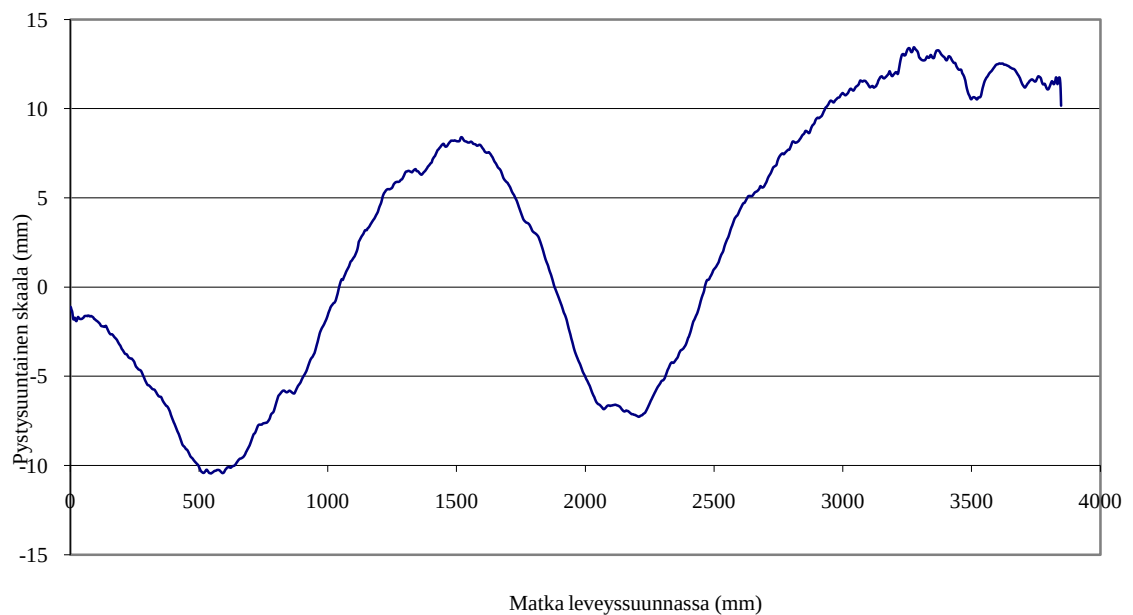


Metsäläntie, profiili 2, 2012. Max urasyvyys 13,1 mm, urien pinta-ala 146,4 cm^2

Metsäläntien profiiliin 2 oikea ajoura on jatkunut oikeasta reunasta profilometrin mittausalueen ulkopuolelle. Oikean ajouran urasyvyys ja pinta-ala ovat molemmissa mittauksissa huomattavasti alhaisempia kuin mittauskohteen muiden profiilien oikean ajouran keskiarvot (v. 2012 8,3 mm ja 46 cm^2 vs. 13,3 mm ja 87,5 cm^2 ; v. 2011 7,0 mm ja 39,3 cm^2 vs. 12,0 mm ja 80,5 cm^2). Tämä vaikuttaa mittaustuloksiin, mutta oikean ajouran urasyvyyden ja pinta-alan muutokset mittausvälillä ovat samaa suuruusluokkaa kuin mittauskohteen muissa profiileissa.

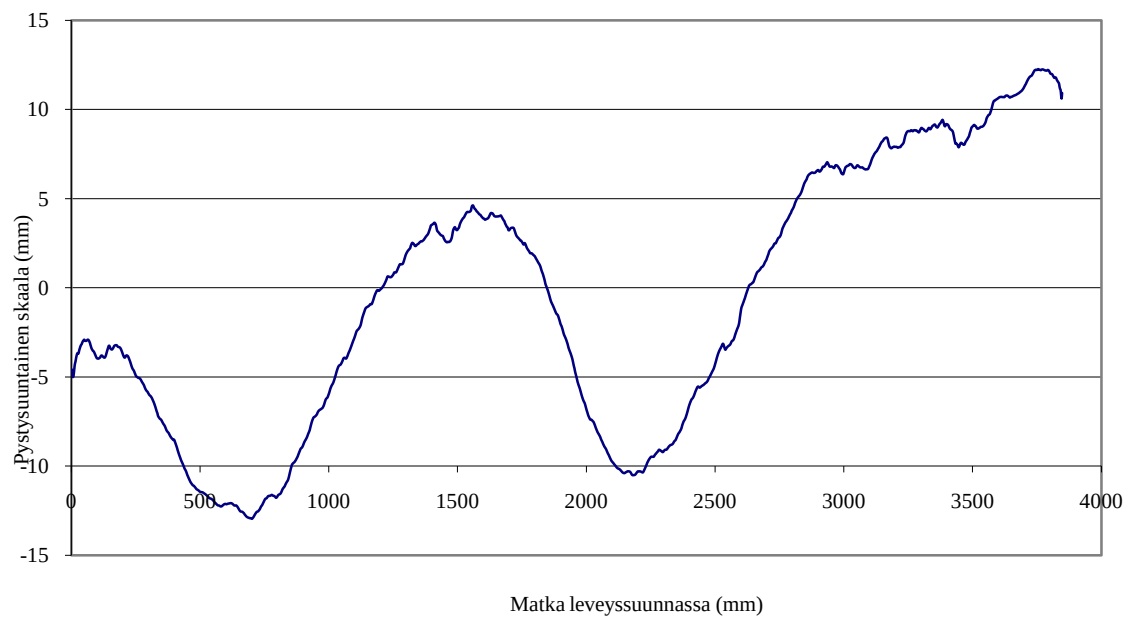


Metsäläntie, 2011, profiili 3. Max urasyvyys 15,5 mm, urien pinta-ala 193,9 cm^2

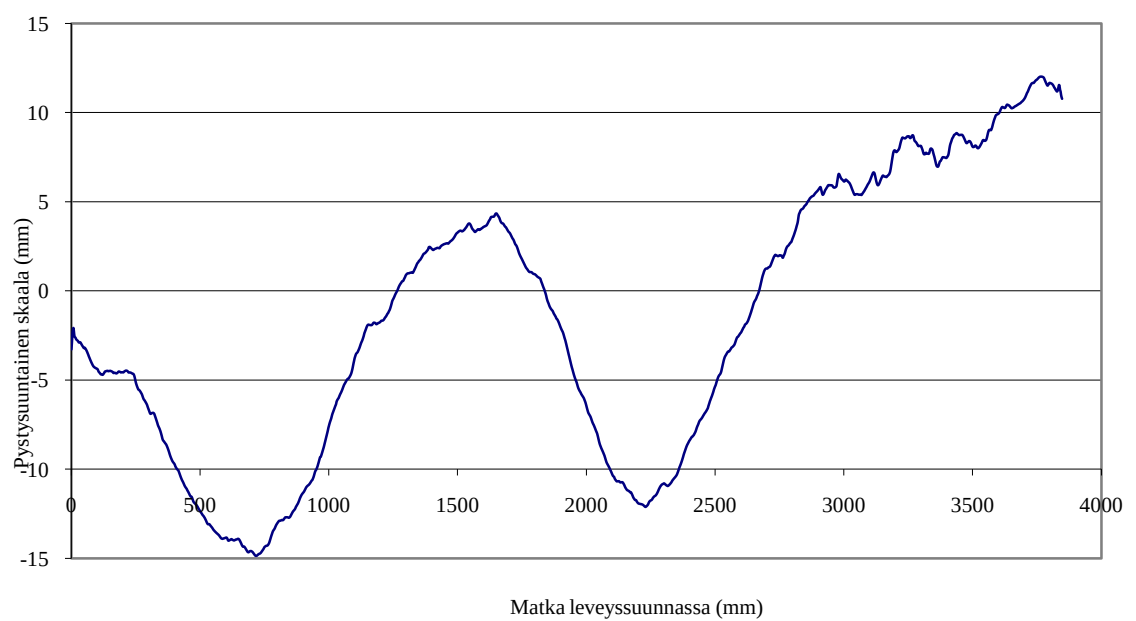


Metsäläntie, 2012, profiili 3. Max urasyvyys 17,2 mm, urien pinta-ala 209,7 cm^2

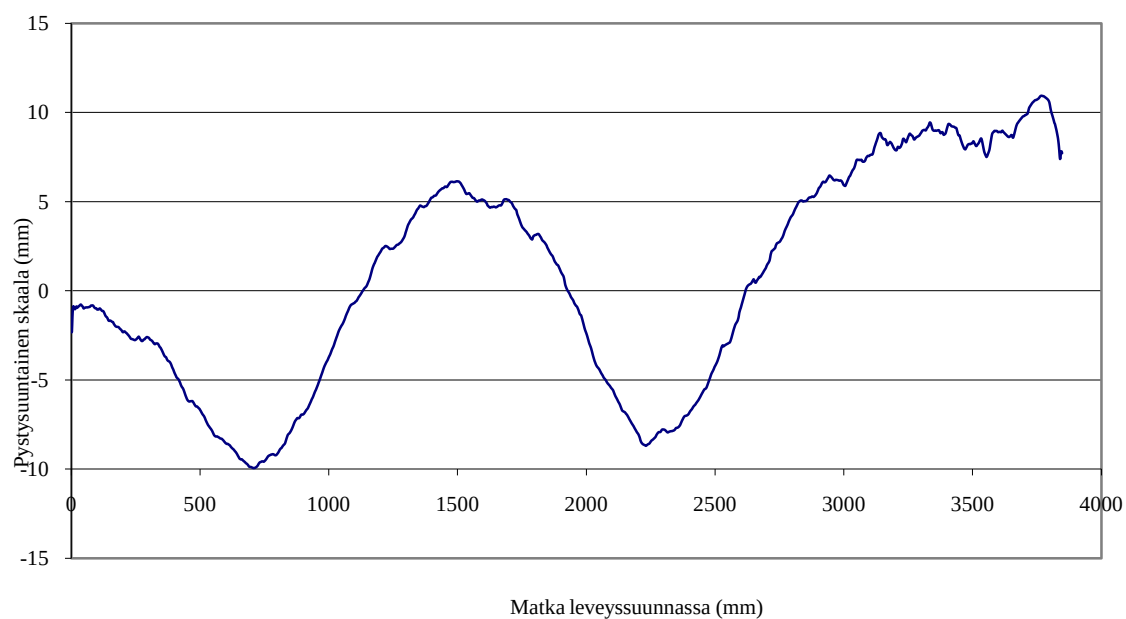
Metsäläntie profiilin 3 oikean ajouran urasyvyys on muuttunut poikkeuksellisen vähän (0,2 mm vs. mittauskohteen muiden profiilien keskiarvo 1,53 mm). Profiilikuvien perusteella on mahdollista, että mittauslaite on sijoitettu keväällä 2011 10-20 mm keskeemmälle ajorataa kuin syksyllä 2011, minkä takia oikean ajouran oikea reuna on jäänyt keväällä 2012 mittausalueen ulkopuolelle ja lankamallilla laskettu urasyvyys todellista alhaisemmaksi.



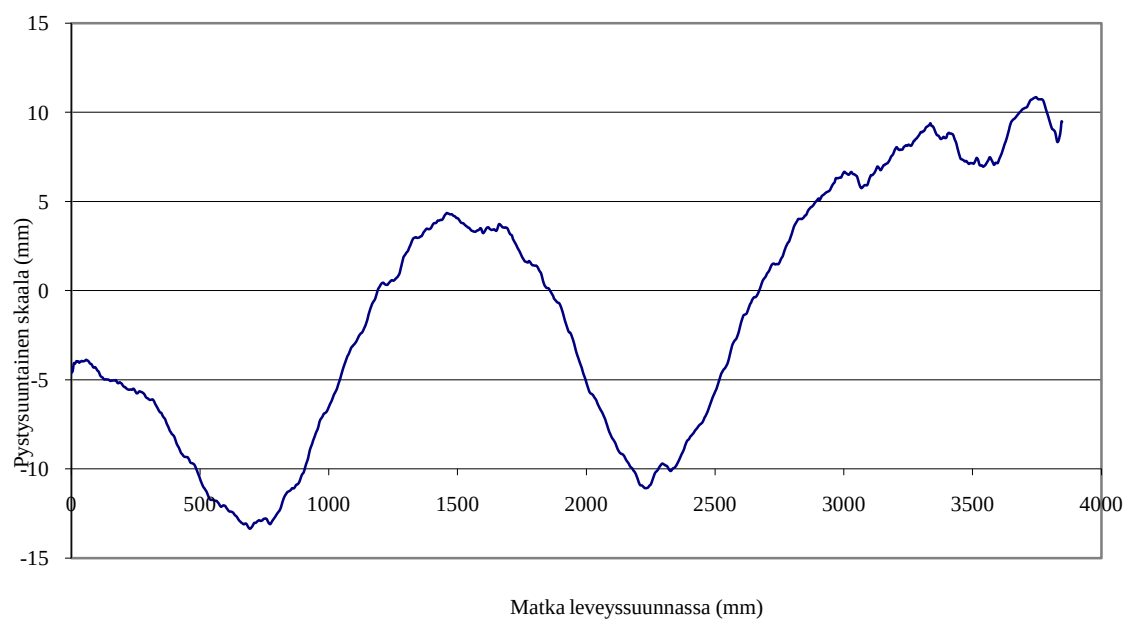
Metsäläntie, profiili 4, 2011. Max urasyvyys 17,0 mm, urien pinta-ala 193,6 cm^2



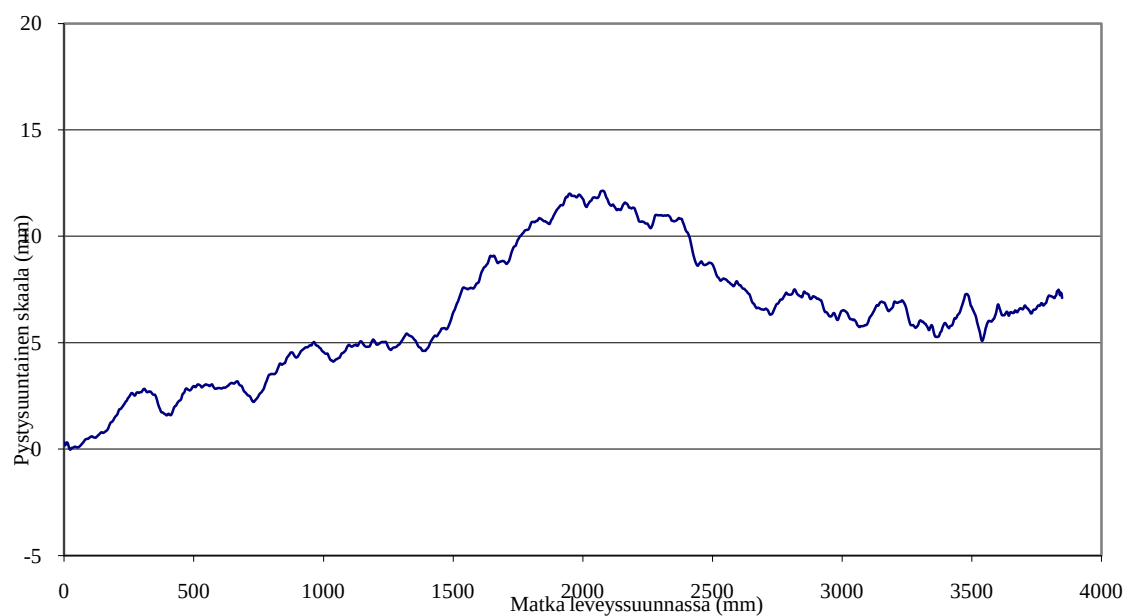
Metsäläntie, profiili 4, 2012. Max urasyvyys 18,4 mm, urien pinta-ala 214,0 cm^2



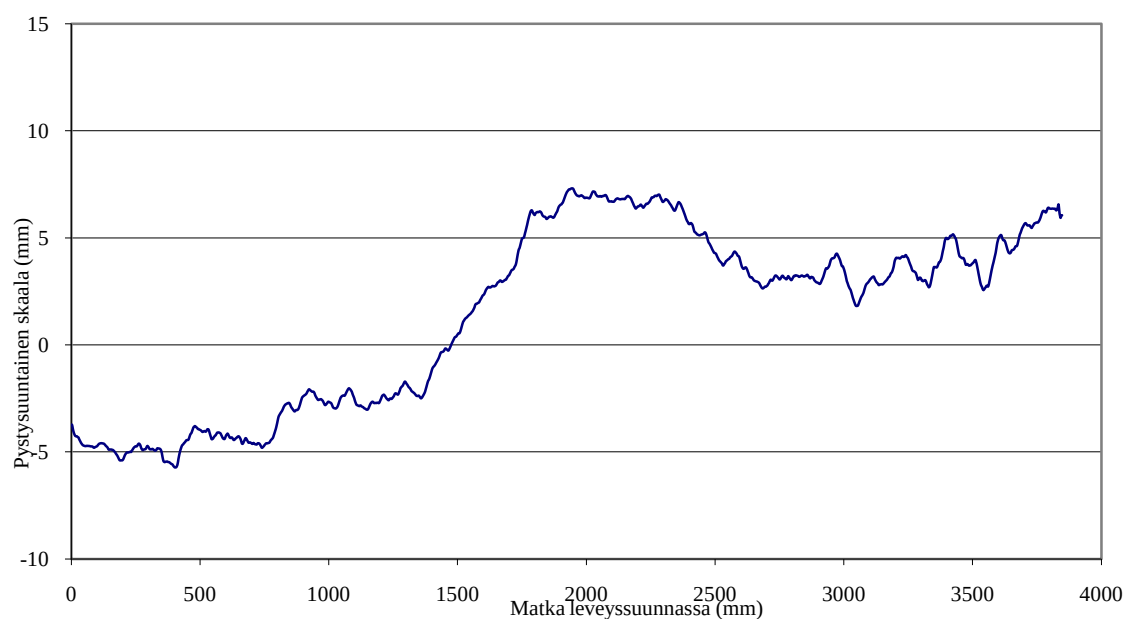
Metsäläntie, profiili 5, 2011. Max urasyvyys 16,2 mm, urien pinta-ala 193,4 cm^2



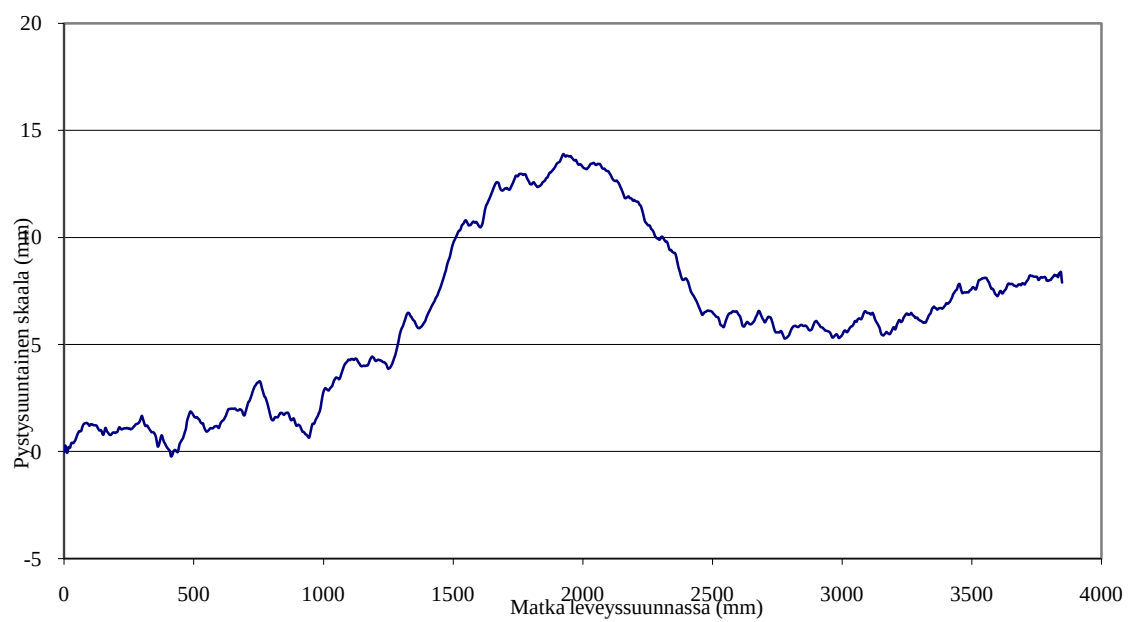
Metsäläntie, profiili 5, 2012. Max urasyvyys 17,6 mm, urien pinta-ala 216,7 cm^2



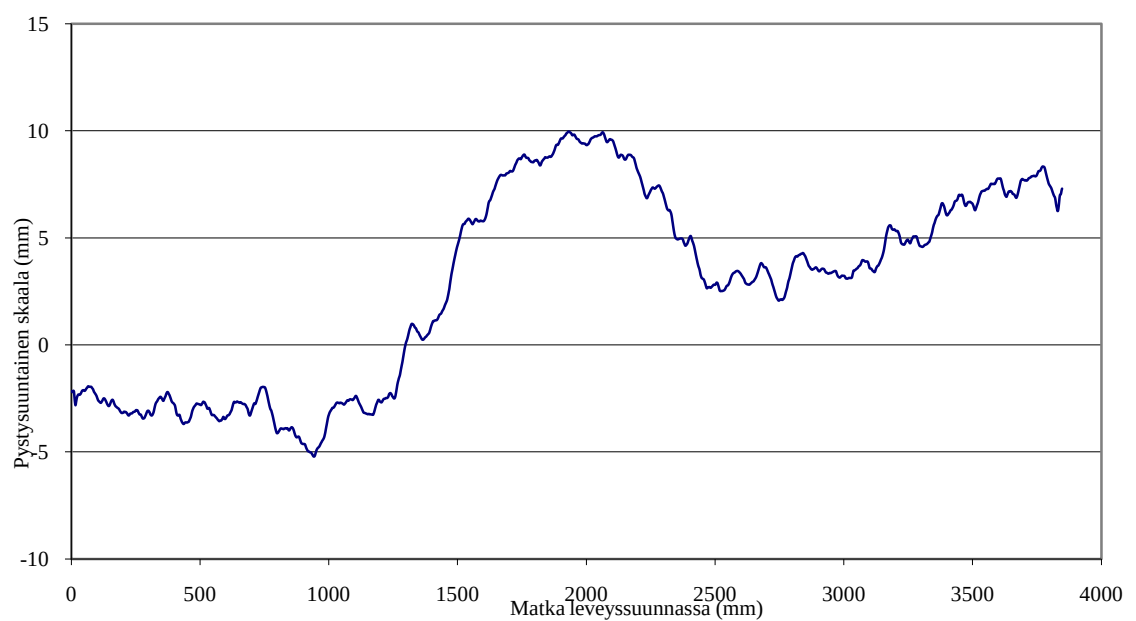
Pirkkolantie, profiili 1, 2011. Max urasyvyys 4,0 mm, urien pinta-ala 59,4 cm^2



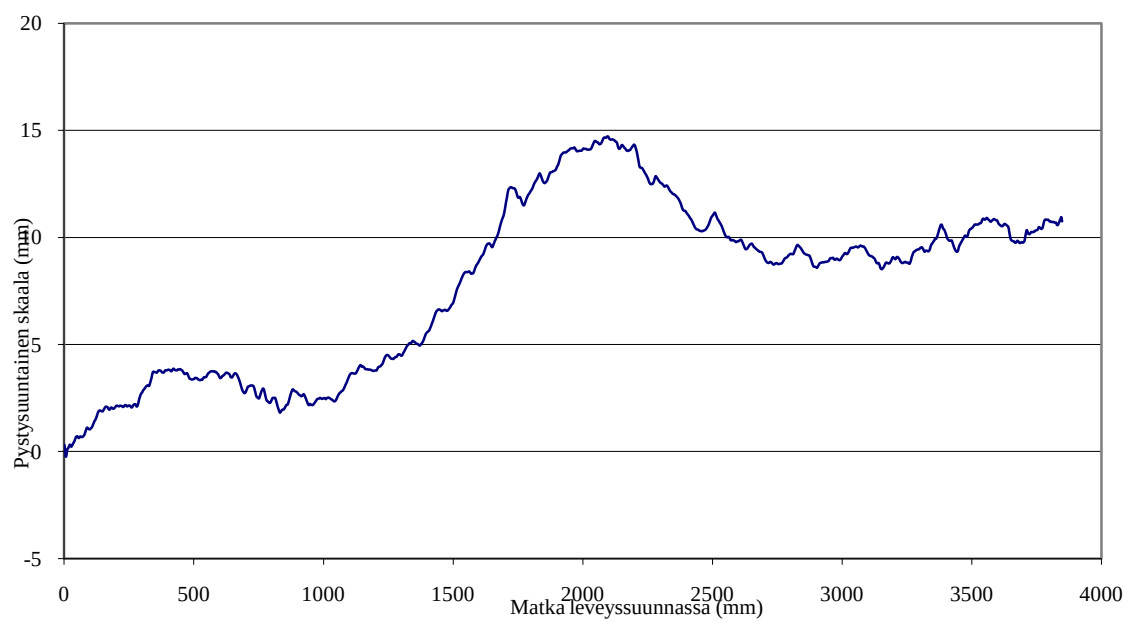
Pirkkolantie, profiili 1, 2012. Max urasyvyys 5,2 mm, urien pinta-ala 71,4 cm^2



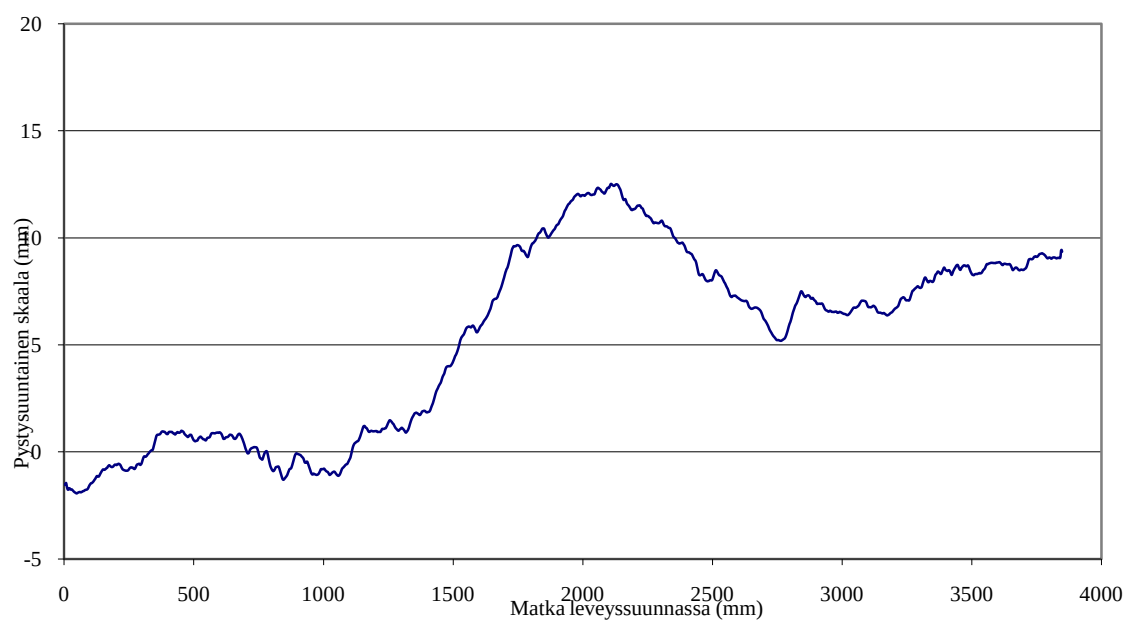
Pirkkolantie, profiili 2, 2011. Max urasyvyys 6,3 mm, urien pinta-ala 90,0 cm^2



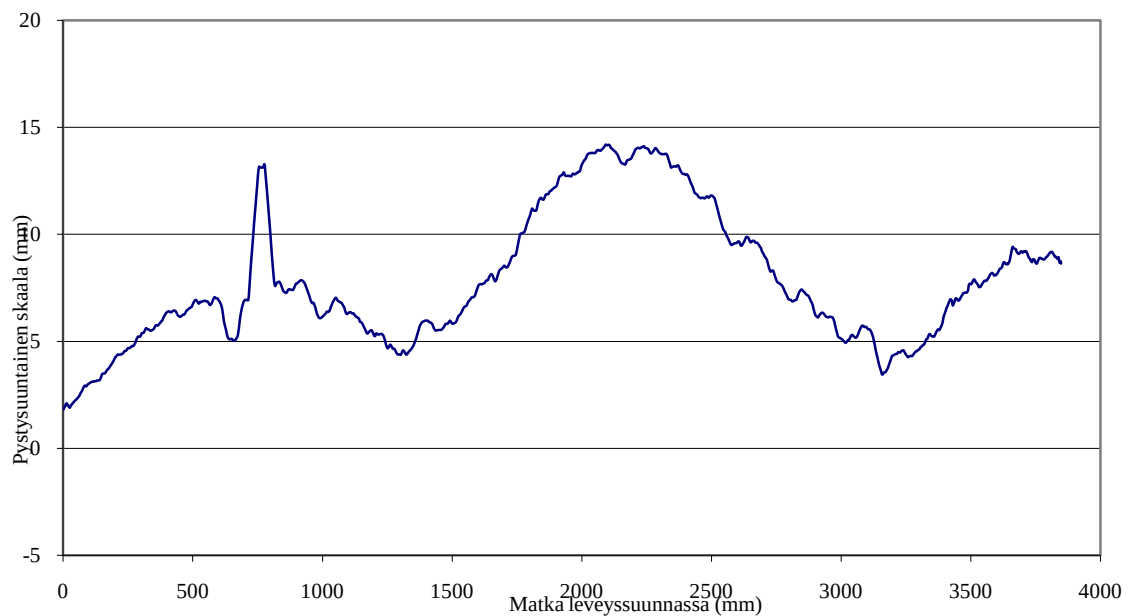
Pirkkolantie, profiili 2, 2012. Max urasyvyys 7,3 mm, urien pinta-ala 108,1 cm^2



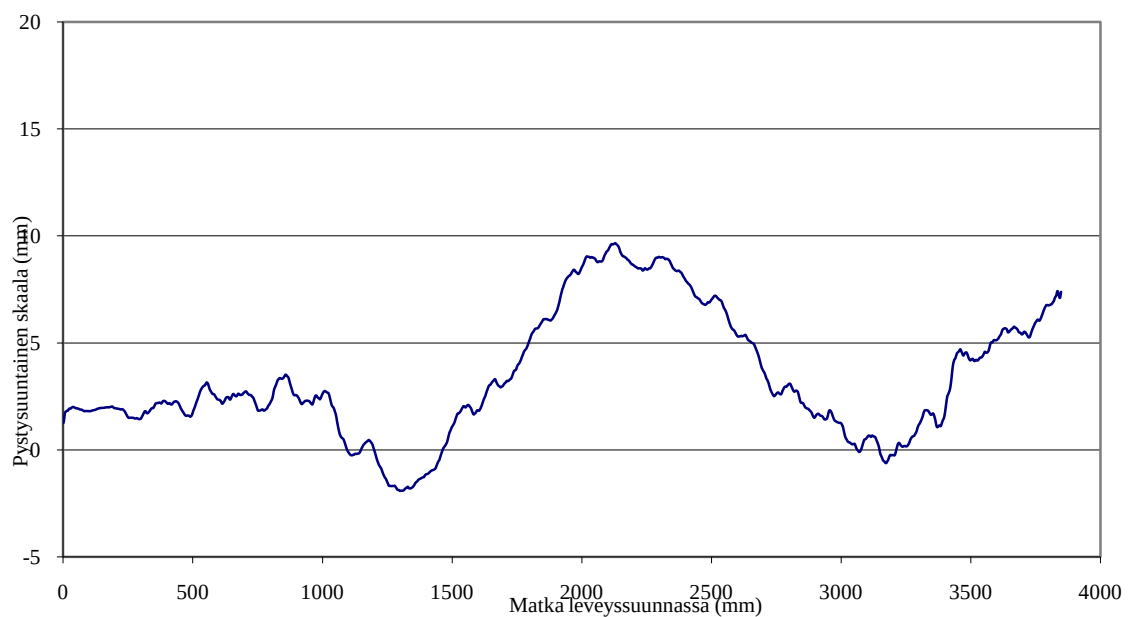
Pirkkolantie, profiili 3, 2011. Max urasyvyys 5,6 mm, urien pinta-ala 81,5 cm^2



Pirkkolantie, profiili 3, kevät 2012. Max urasyvyys 6,5 mm, urien pinta-ala 97,2 cm^2

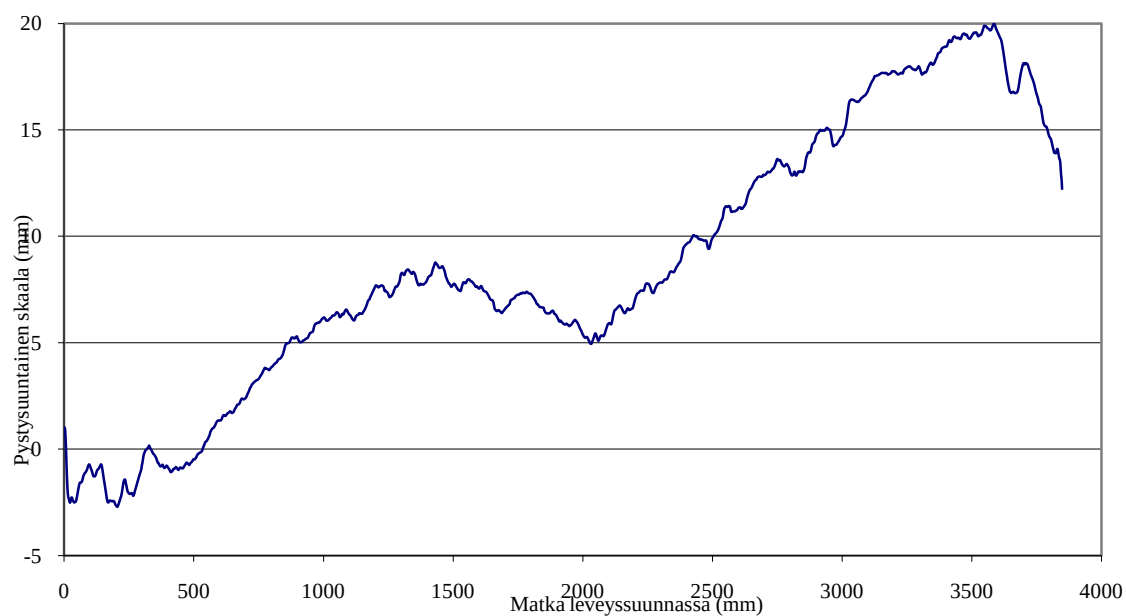


Pirkkolantie, profiili 4, 2011. Max urasyvyys 7,6 mm, urien pinta-ala 90,5 cm²

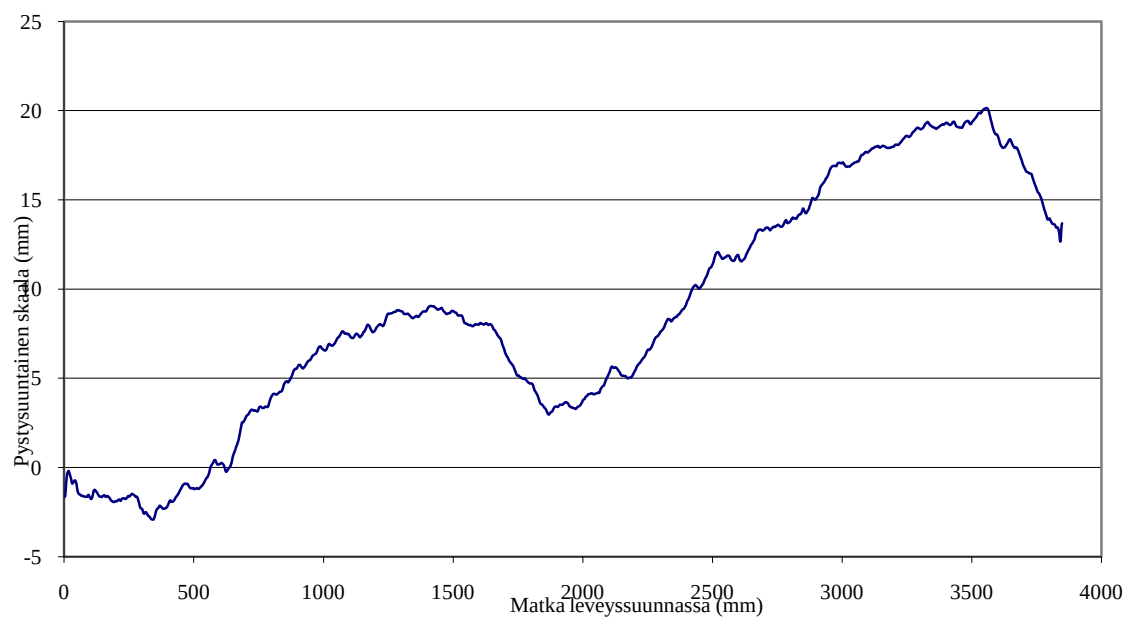


Pirkkolantie, profiili 4, 2012. Max urasyvyys 8,7 mm, urien pinta-ala 130,4 cm²

Pirkkolantie profiilin 4 oikean urasyvyyden ja urien pinta-alan muutokset ovat poikkeuksellisen suuria verrattuna mittaushetken muihin profiileihin (2,0 mm ja 39,9 cm² vs. 1,17 mm ja 15,2 cm²). Syksyn 2011 profiilikuvassa näkyy oikean ajouran pientareen puoleisessa reunassa (matka leveyssuunnassa 690-810 mm) voimakas mittauspääk. On todennäköistä, että kyseisessä kohdassa mittausulos on virheellinen, mikä vaikuttaa koko profiilin mittaustuloksiin. Profiilien mittaustulosten ero mittaushetken muihin profiileihin on niin suuri, että Pirkkolantien profiilit 4 on hylätty tilastollisesti analysoitavasta mittaustulostusta.

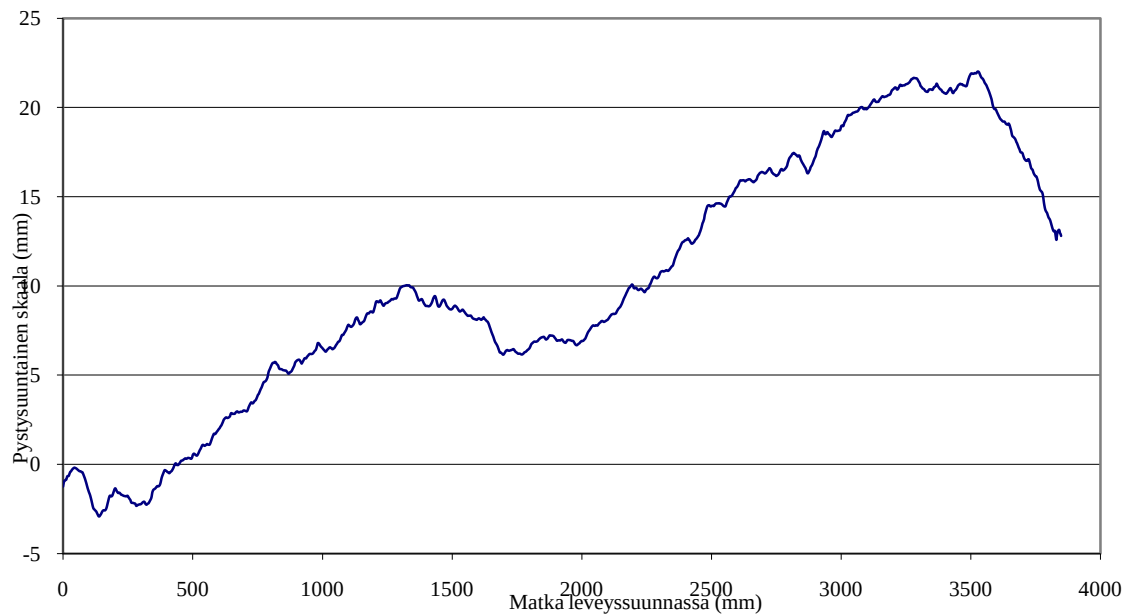


Veturitie, profiili 1, 2011. Max urasyvyys 7,2 mm, urien pinta-ala $85,4 \text{ cm}^2$

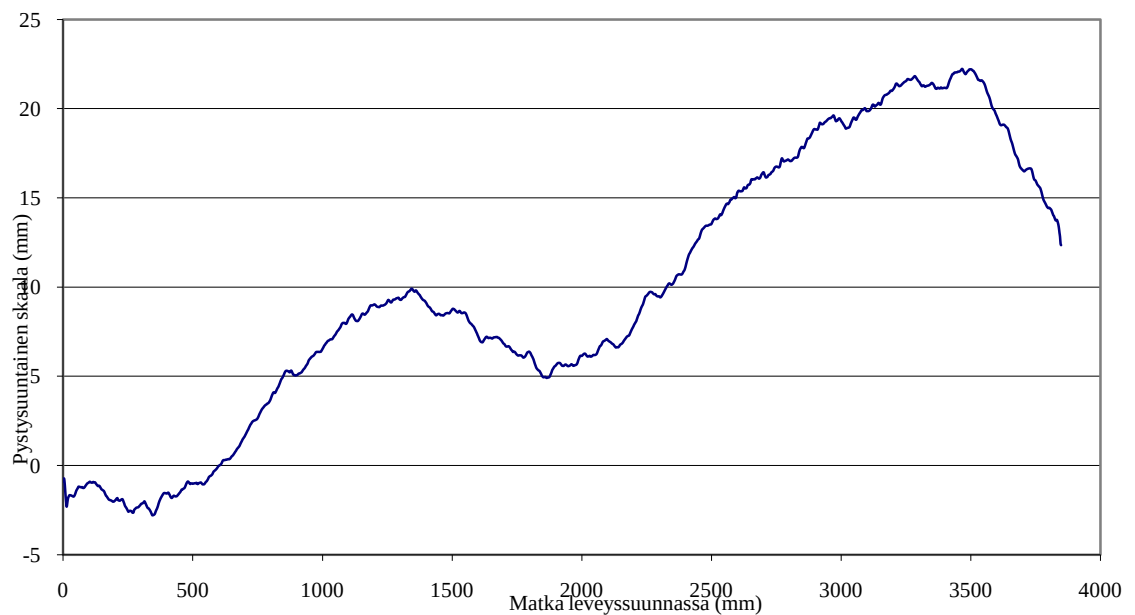


Veturitie, profiili 1, 2012. Max urasyvyys 9,3 mm, urien pinta-ala $109,8 \text{ cm}^2$

Veturitie profiili 1 sijaitsee oikealle kaartavassa kaarteessa ($R = 300 \text{ m}$)

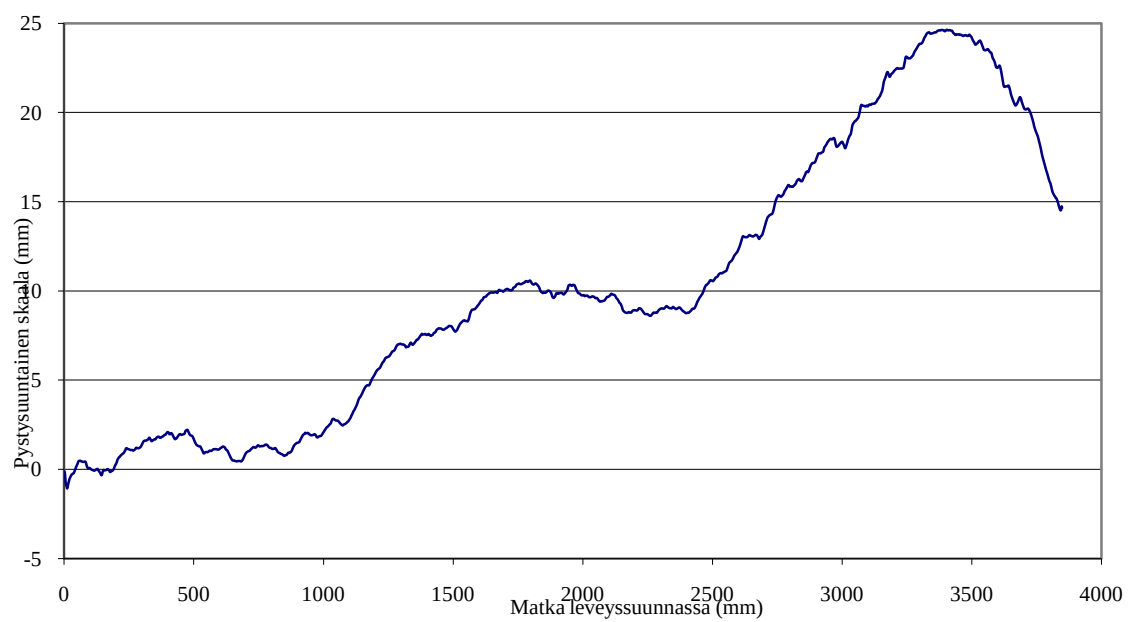


Veturitie, profiili 2, 2011. Max urasyvyys 7,0 mm, urien pinta-ala 78,1 cm^2

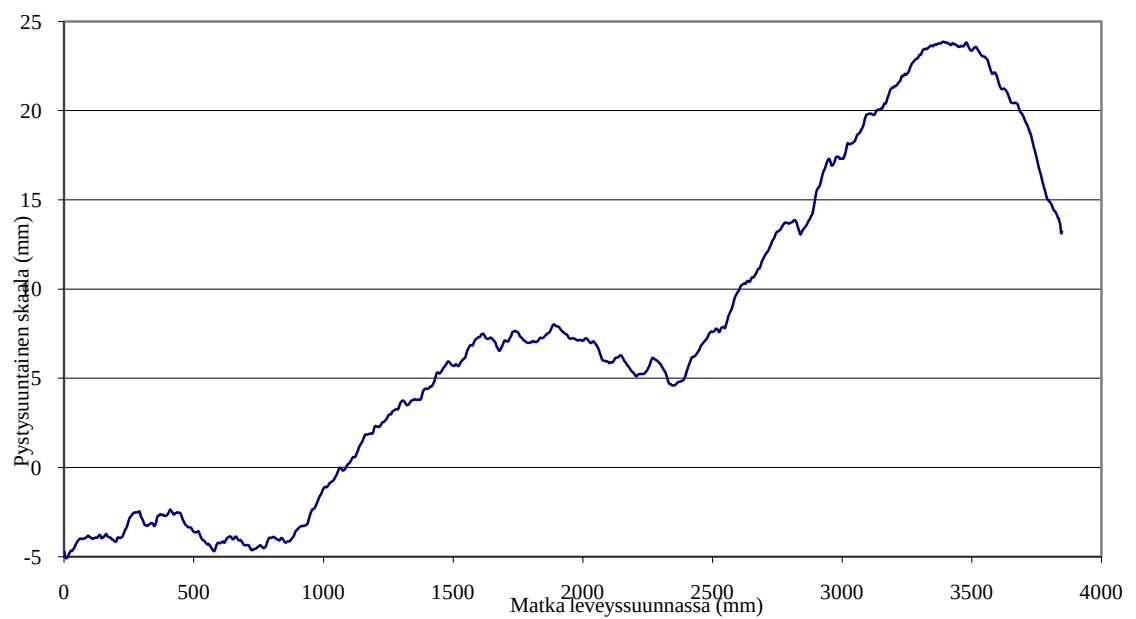


Veturitie, profiili 2, 2012. Max urasyvyys 8,1 mm, urien pinta-ala 95,8 cm^2

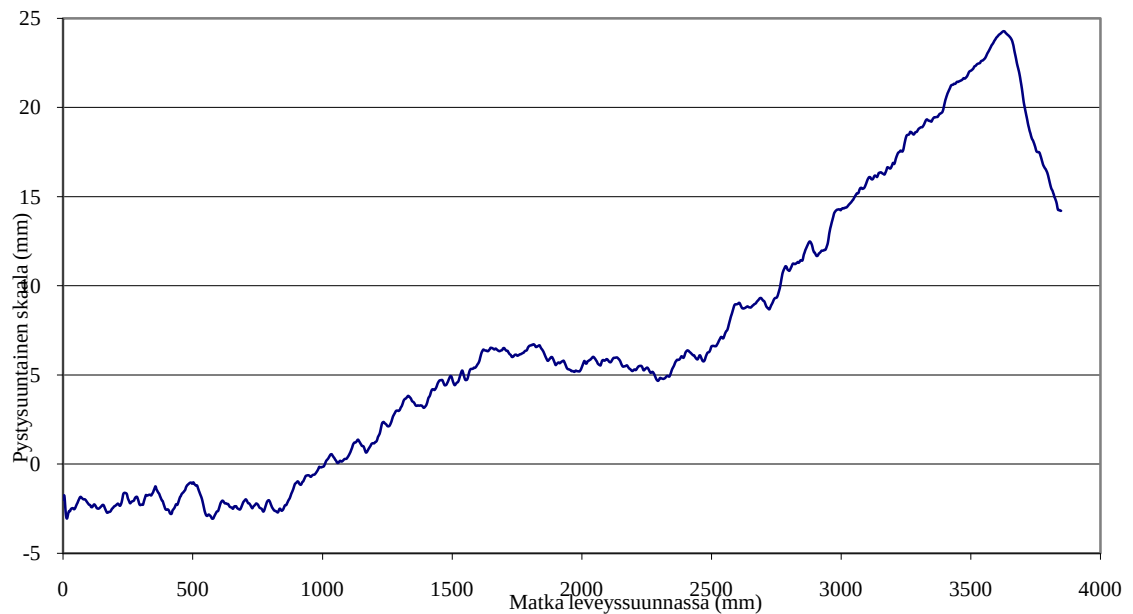
Veturitie profiilin 2 oikean ajouran urasyvyyden muutos on ollut erittäin vähäinen verrattuna mittauskohteen muihin profiileihin (0,1 mm vs. muiden profiilien keskiarvo 1,33 mm). Tämän mittaus tuloksen kohdalla on otettava huomioon mittausvirheen tai nastarengaskulumisesta riippumattomien muuttujien vaikutus mitattuun päällysteen pinnan muotoon.



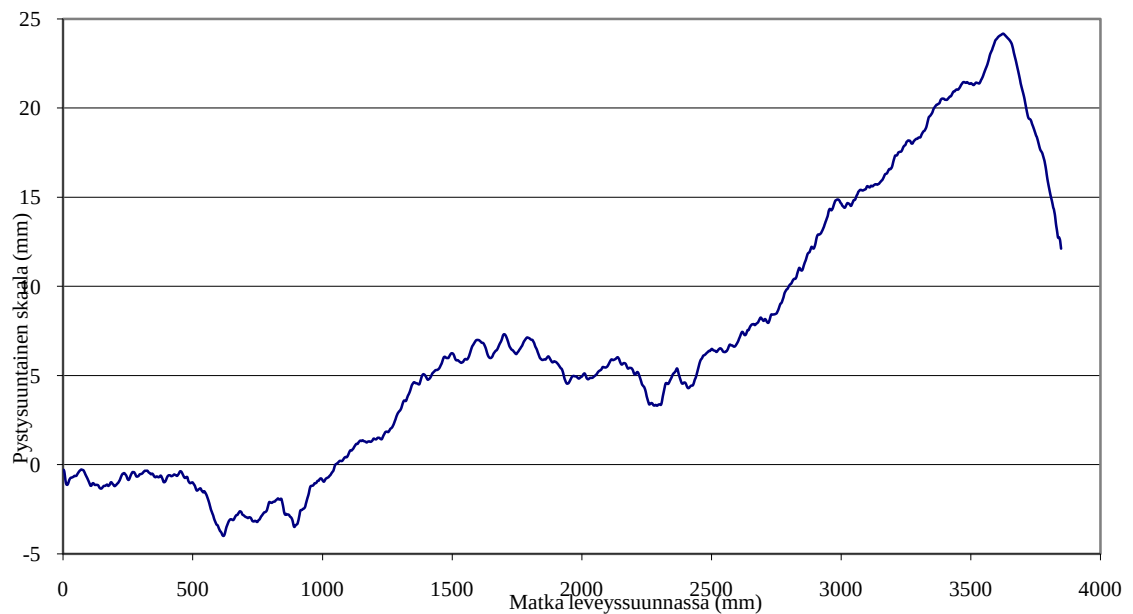
Veturitie, profiili 3, 2011. Max urasyvyys 7,3 mm, urien pinta-ala 81,4 cm^2



Veturitie, profiili 3, 2012. Max urasyvyys 9,4 mm, urien pinta-ala 108,20 cm^2

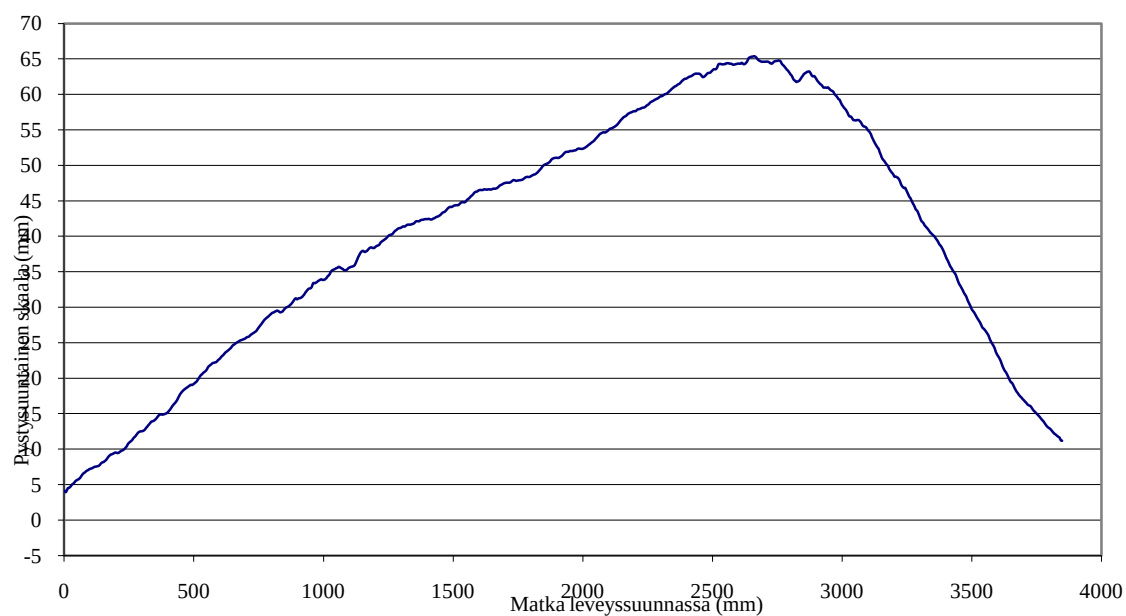


Veturitie, profiili 4, 2011. Max urasyvyys 7,5 mm, urien pinta-ala 78,3 cm^2

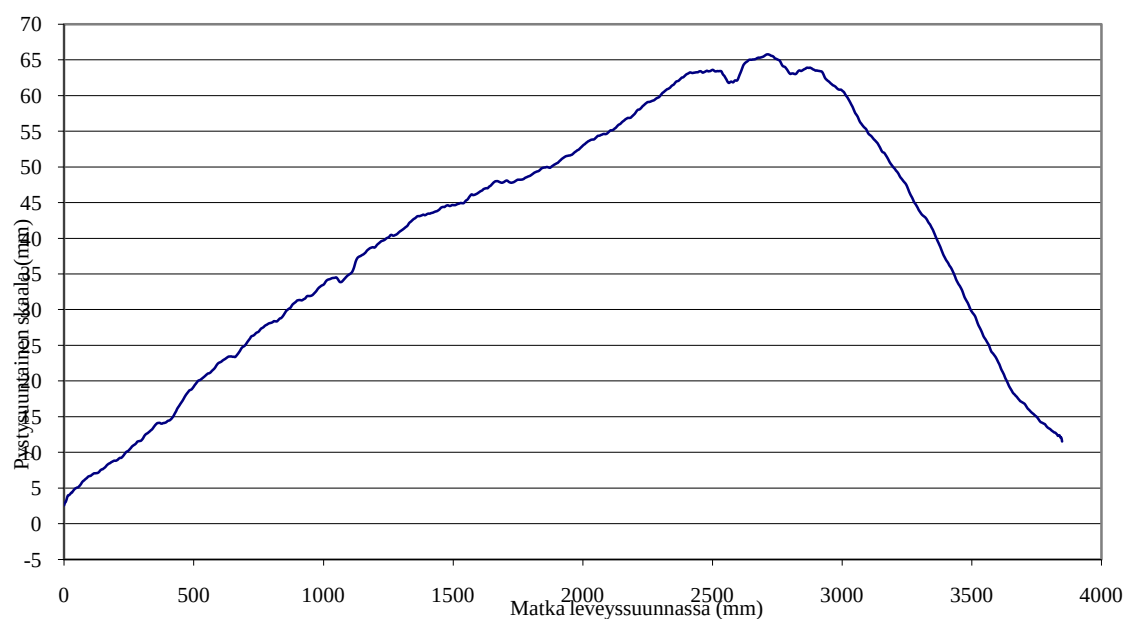


Veturitie, profiili 4, 2012. Max urasyvyys 7,8 mm, urien pinta-ala 108,3 cm^2

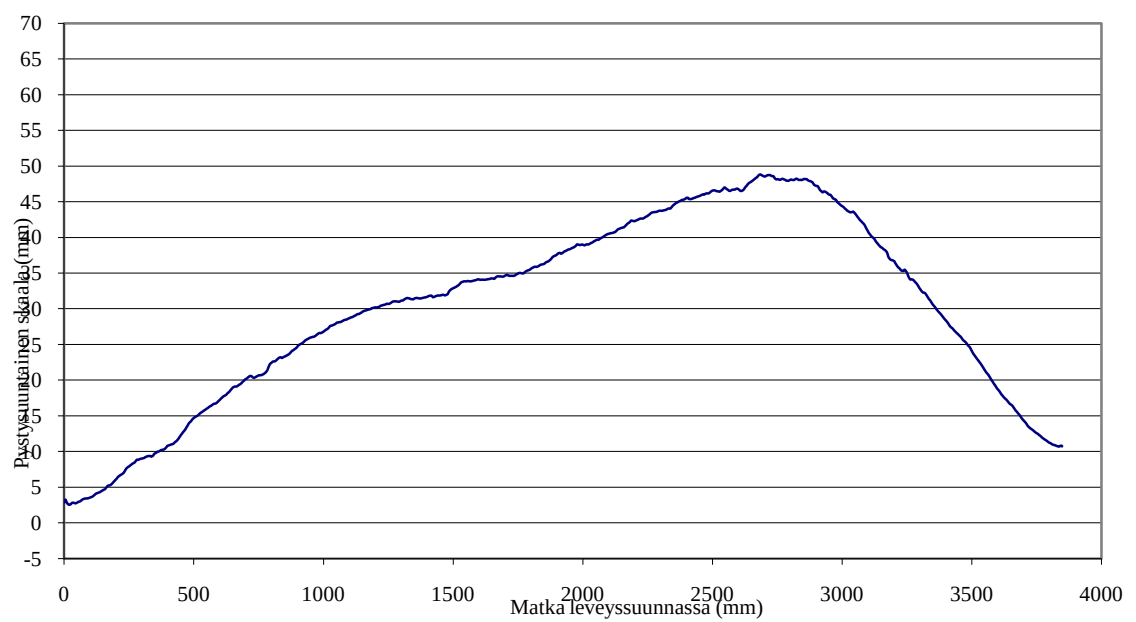
Veturitie profiili 4 on mitattu n. 8 m ennen kuin toinen ajokaista ajosuunnassa alkaa. Tästä profiilista on n. 50 m matkaa Pasilankadun eteläpään valo-ohjattuun liittymään. Tämän profiilin vasemman ajouran urasyvyys on muuttunut selvästi vähemmän kuin mittauskohteen muissa profiileissa (0,3 mm vs. mittauskohteen muiden profiilien keskiarvo 1,77 mm). Liikenne hidastuu ja pysähtelee sekä ajoneuvojen ajolinjat ajokaistan poikkileikkauksella vaihtelevat tämän profiilin kohdalla enemmän kuin mittauskohteen muiden profiilien kohdalla.



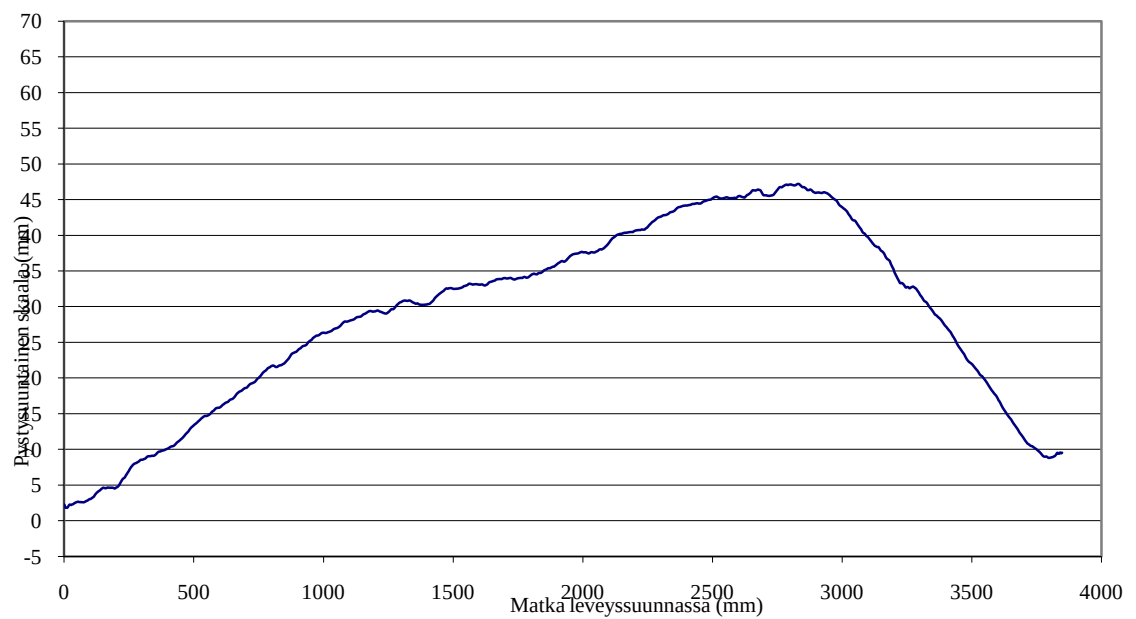
Vauhtitie, profiili 1, 2011. Max urasyvyys 2,2 mm, urien pinta-ala 18,2 cm^2



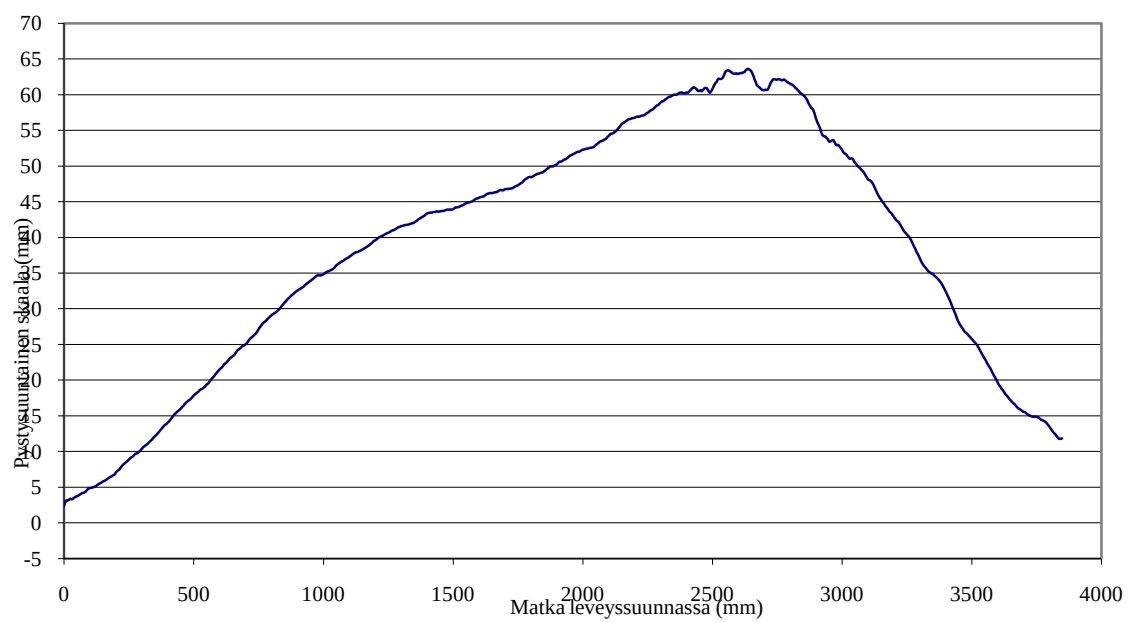
Vauhtitie, profiili 1, 2012. Max urasyvyys 2,7 mm, urien pinta-ala 22,5 cm^2



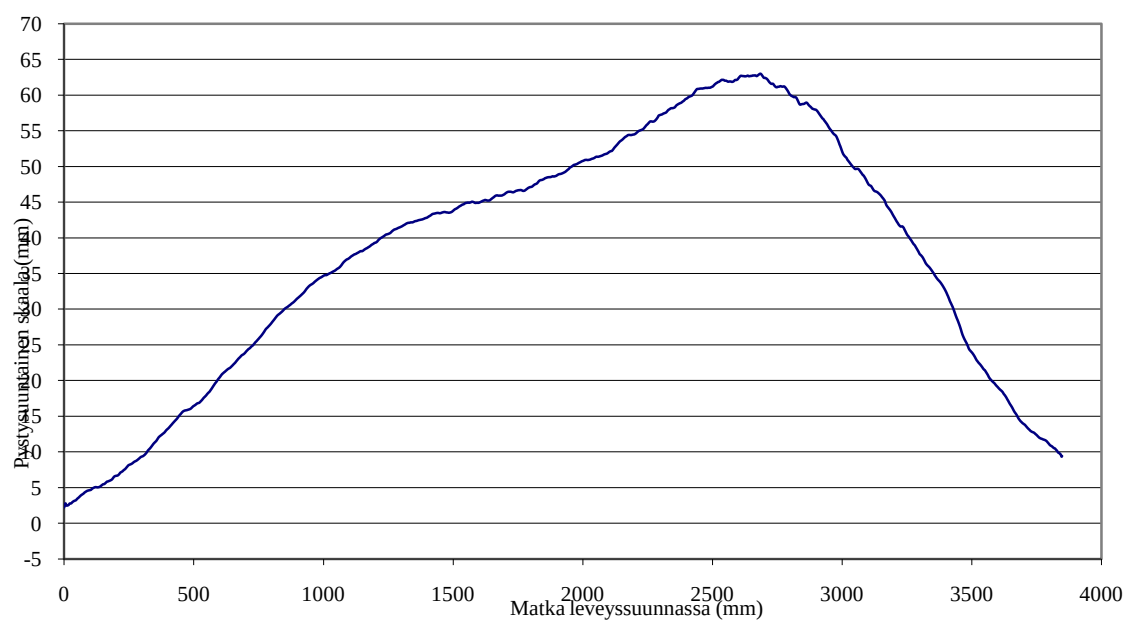
Vauhtitie, profiili 2, 2011. Max urasyvyys 2,4 mm, urien pinta-ala 21,0 cm^2



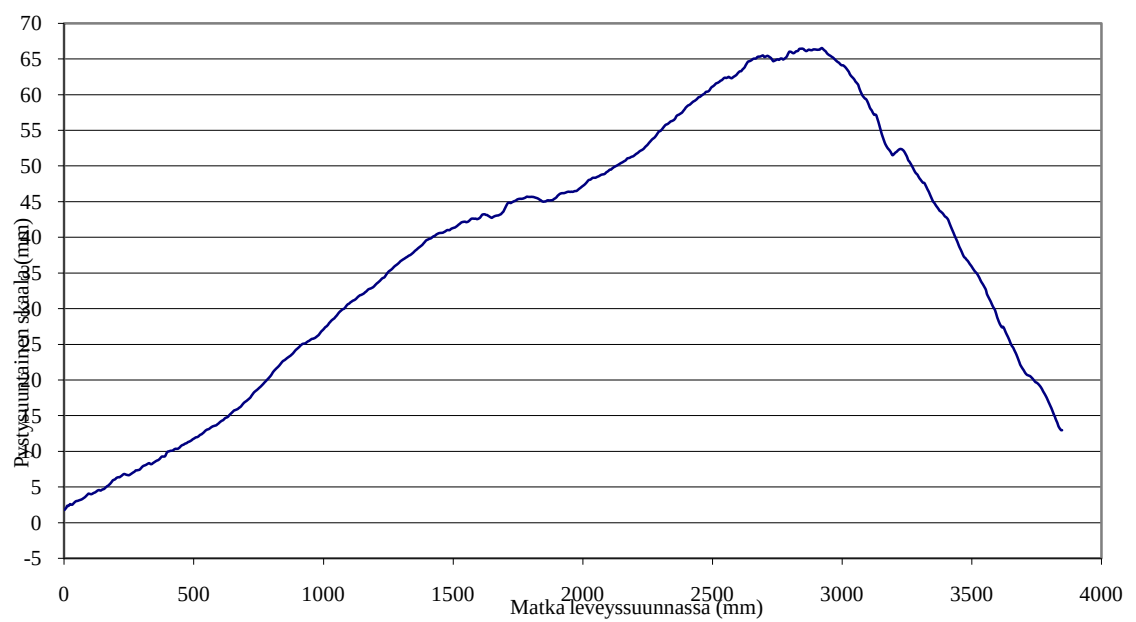
Vauhtitie, profiili 2, 2012. Max urasyvyys 2,7 mm, urien pinta-ala 26,0 cm^2



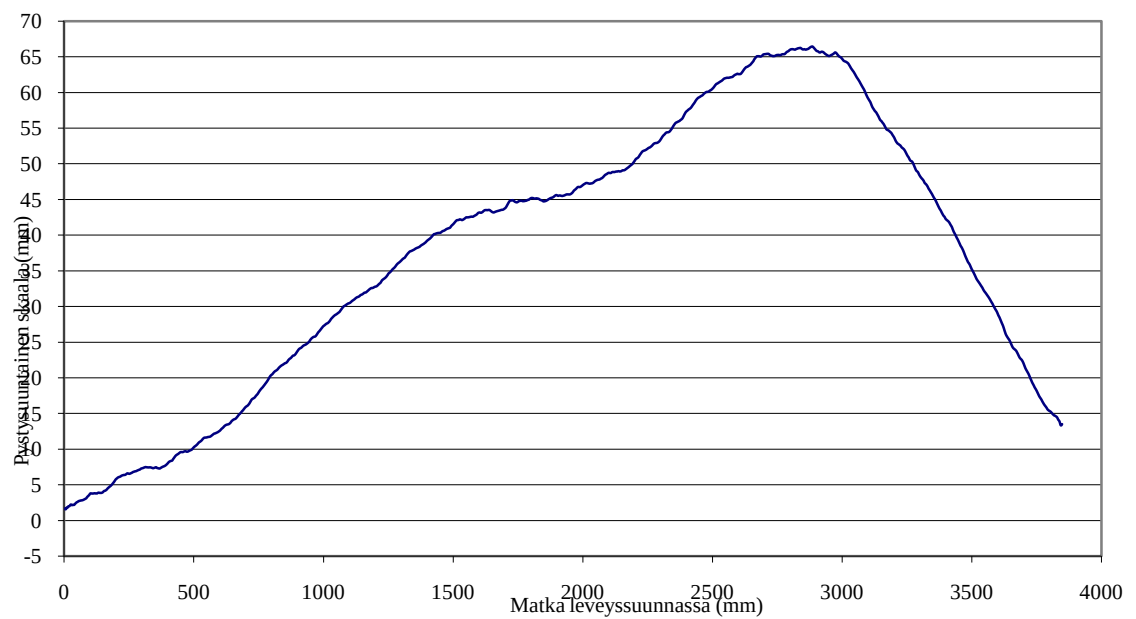
Vauhtitie, profiili 3, 2011. Max urasyvyys 2,2 mm, urien pinta-ala 17,9 cm^2



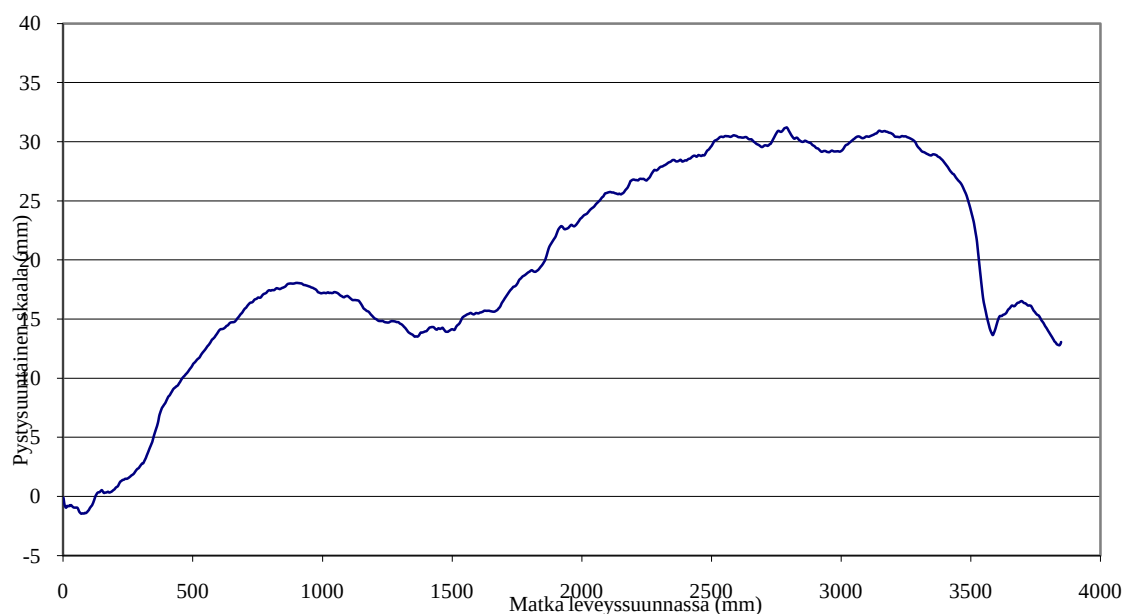
Vauhtitie, profiili 3, 2012. Max urasyvyys 2,6 mm, urien pinta-ala 25,7 cm^2



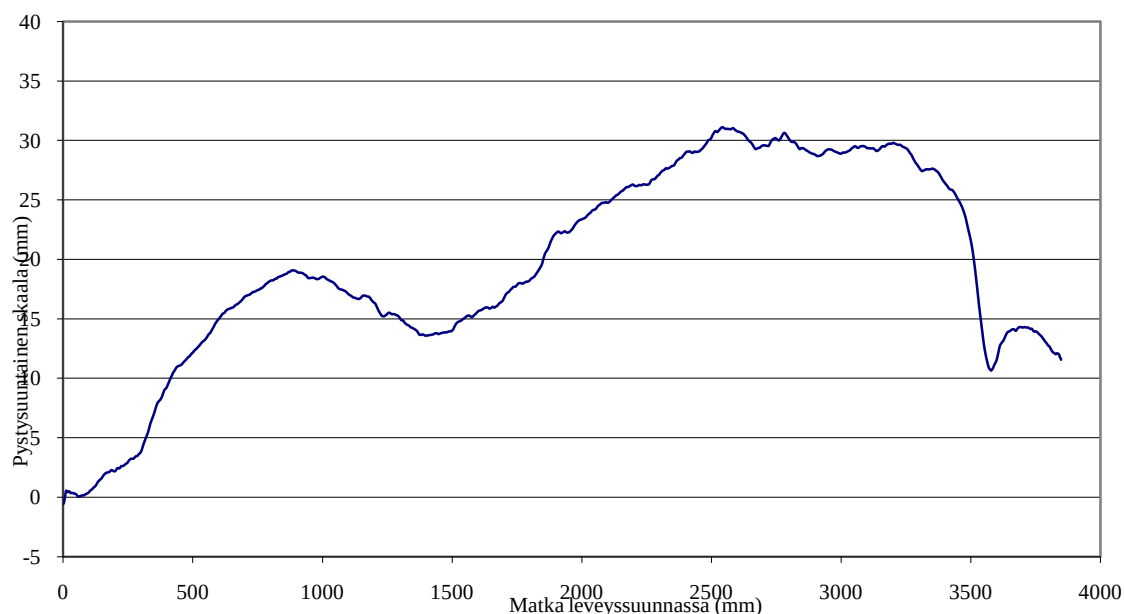
Vauhtitie, profiili 4, 2011. Max urasyvyys 4,2 mm, urien pinta-ala 39,0 cm^2



Vauhtitie, profiili 4, 2012. Max urasyvyys 4,9 mm, urien pinta-ala 43,8 cm^2

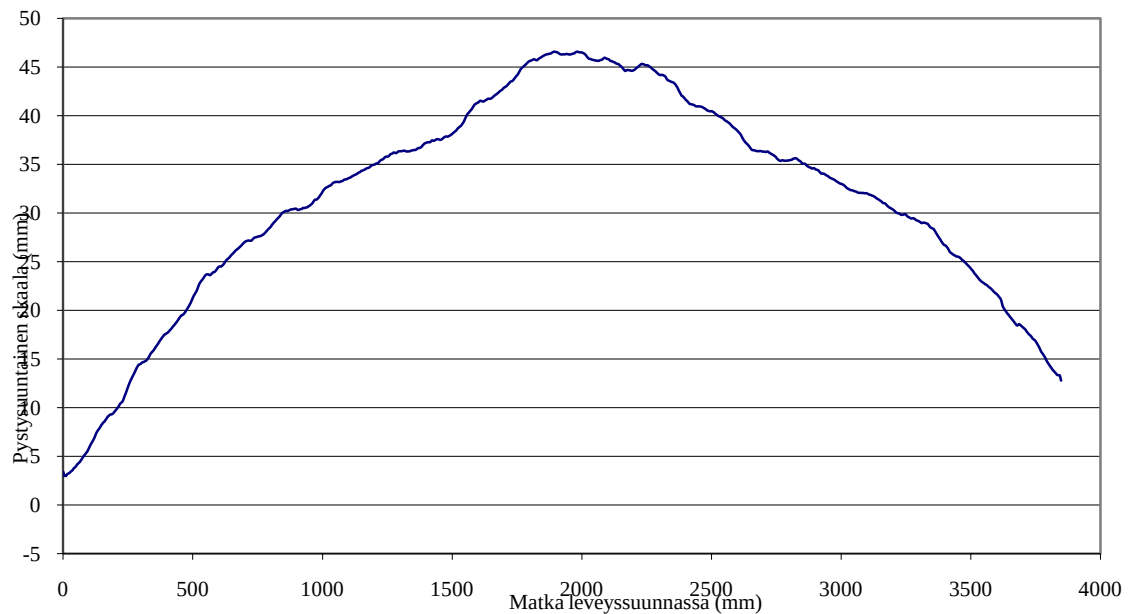


Töölönkatu, profiili 1, 2011. Max urasyvyys 8,2 mm, urien pinta-ala 66,9 cm^2

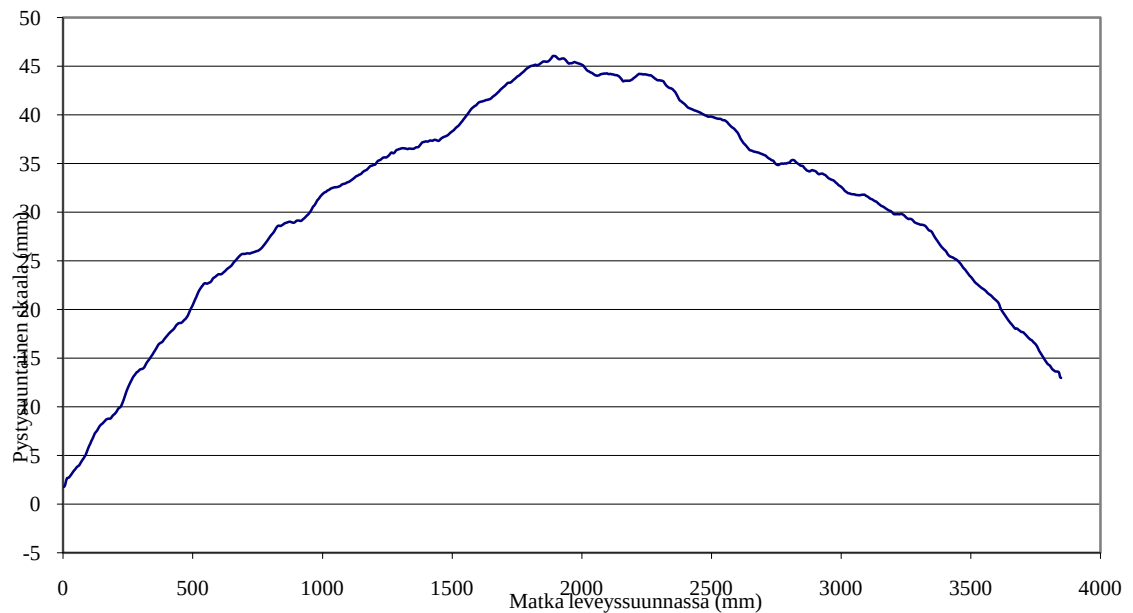


Töölönkatu, profiili 1, 2012. Max urasyvyys 9,0 mm, urien pinta-ala 76,4 cm^2

Töölönkatu profiili 1 on mitattu n. 1,5 m ennen suojatietä, joka sijaitsee juuri ennen Kivelänkadun tasa-arvoista liittymää. Tämän profiilin kohdalla suuri osa ajoneuvoista hidastaa, pysähtyy, lähtee liikkeelle tai kiihdyttää. Jarrutukset ovat usein voimakkaita, koska liittymässä on tässä ajosuunnassa heikot näkemäolosuhteet Kivelänkadulta oikealle tulevien ajoneuvojen suuntaan.

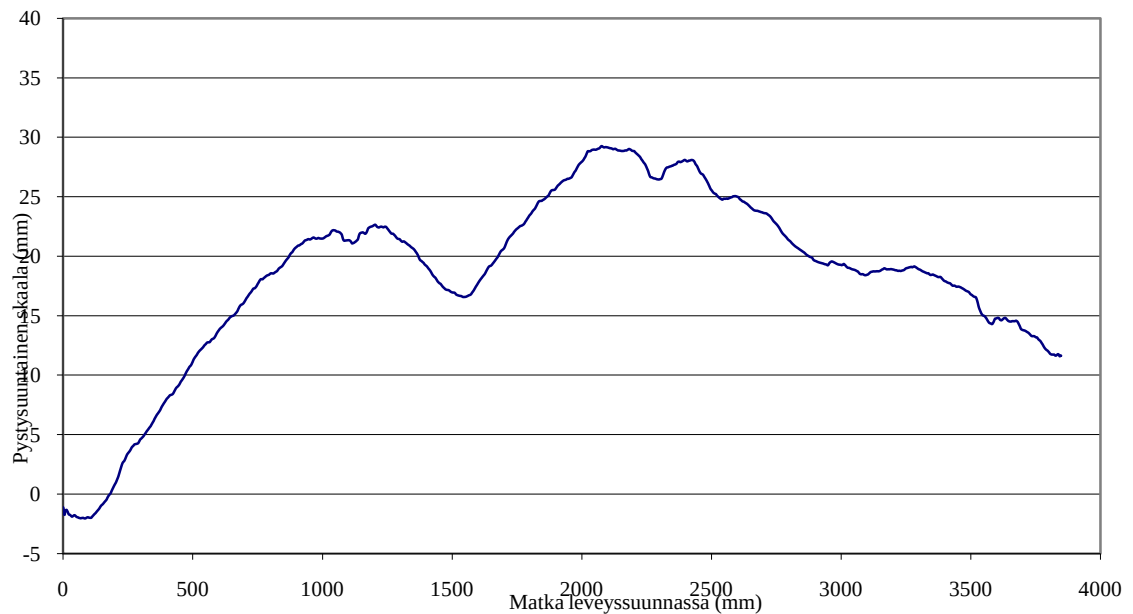


Töölönkatu, profiili 2, 2011. Max urasyvyys 2,5 mm, urien pinta-ala 18,0 cm²

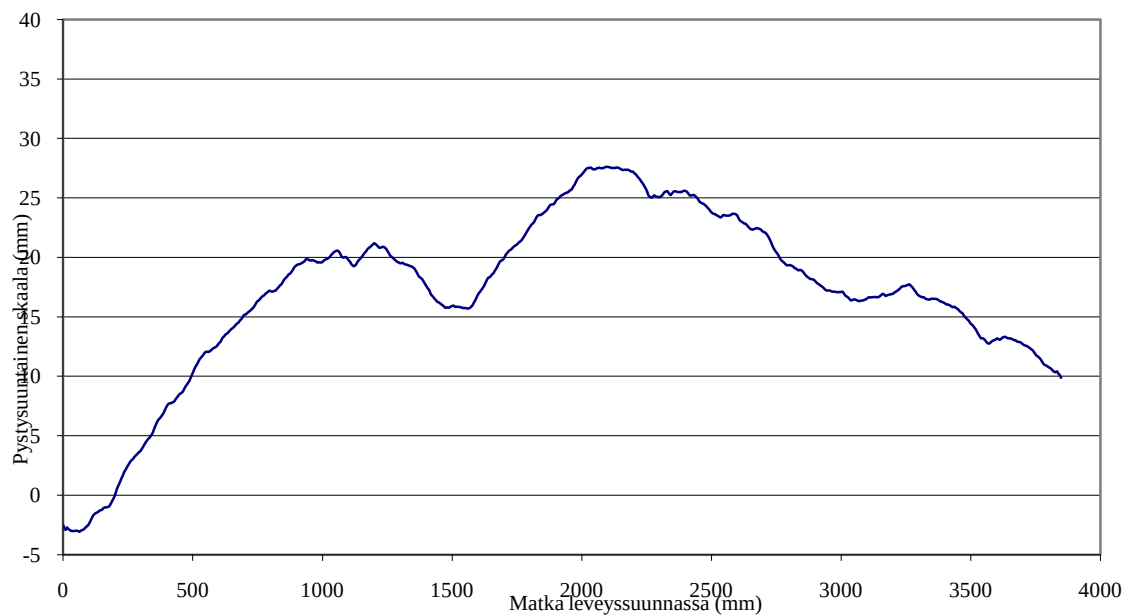


Töölönkatu, profiili 2, 2012. Max urasyvyys 2,5 mm, urien pinta-ala 18,4 cm²

Töölönkatu profiili 2 on mitattu n. 1,5 m Kivelänkadun liittymän pohjoispuoleisen suojatien jälkeen. Periaatteessa ajoneuvot kiihdyttävät suojatien jälkeen, mutta tämän profiilin kohdalla kiihdyttäminen on vähäistä, koska 45 m tästä profiilista eteenpäin ovat Runeberginkadun liittymän liikennevalot, jotka näyttävät Töölönkadun sivusuunnasta tulijoille punaista n. 80 % kiertoajasta. Lyhyen liittymävälin ja katu ympäristön ahtauden takia ajonopeudet tässä ympäristössä ovat useimmilla ajoneuvoilla hyvin alhaisia.

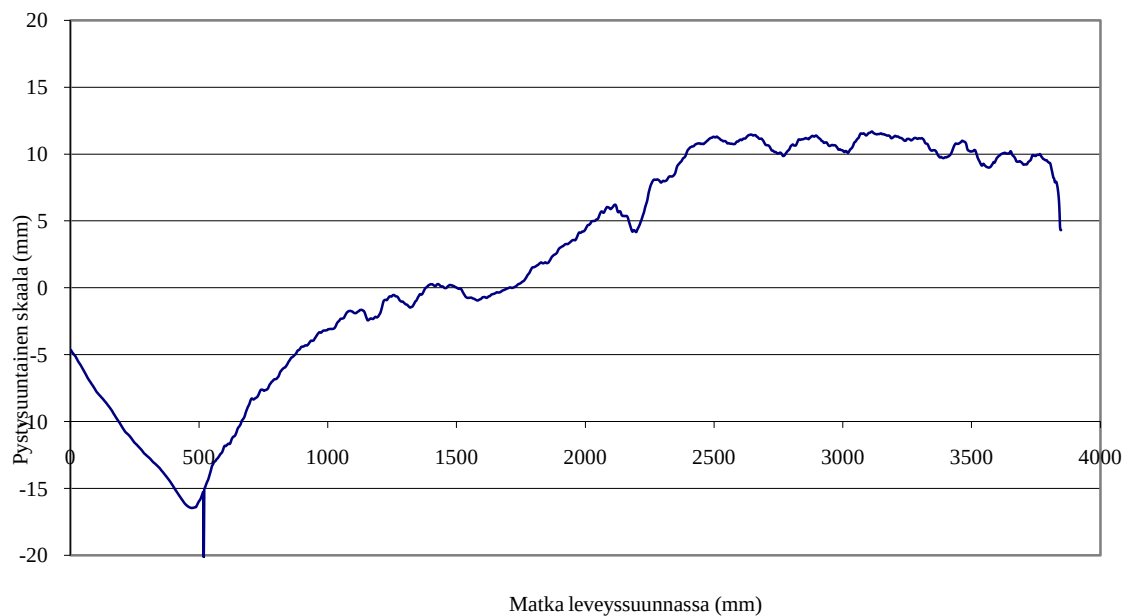


Töölönkatu, profiili 3, 2011. Max urasyvyys 8,7 mm, urien pinta-ala 56,0 cm^2

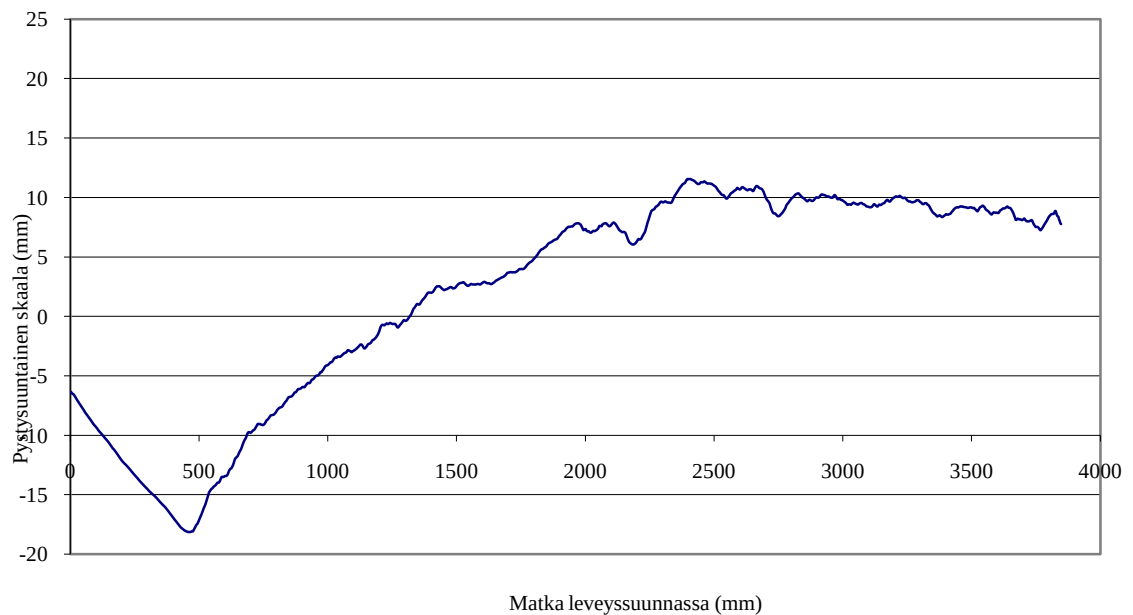


Töölönkatu, profiili 3, 2012. Max urasyvyys 8,7 mm, urien pinta-ala 57,2 cm^2

Töölönkatu profiili 3 on mitattu Kivelänkadun ja Runeberginkadun liittymien puolivälissä. Matkalla leveyssuunnassa 50...300 mm on erotettavissa kolmatta ajouraa muistuttava pinnanmuoto. Tämä sekä urien erikoinen sijainti ajokaistan poikkileikkauksella ja mittauslaitteen mittausalueella johtuvat siitä, että mittauskohteessa Töölönkadulla avattiin kesällä 2011 pyöräkaista. Profiilista on nähtävissä sekä pyöräkaistalle jäänyt entinen oikea ajoura että pyöräkaistan rakentamisen jälkeen muodostunut lievä vasen ura. Syvämpi nykyinen oikea ajoura lienee muodostunut likimain ennen pyöräkaistaa muodostuneen vanhan vasemman ajouran paikalle



Töölönkatu, profiili 4, 2011. Max urasyvyys 3,3 mm, urien pinta-ala 12,0 cm^2



Töölönkatu, profiili 4, 2012. Max urasyvyys 3,4 mm, urien pinta-ala 16,0 cm^2

Töölönkatu profiili 4 on mitattu 1 m ennen Runeberginkadun valo-ohjatun liittymän pyörätaskua ja pysäytysviivaa. Tämän profiilin kohdalla pysähtyvien ja liikkeelle lähtevien ajoneuvojen osuus on hyvin korkea. Myös tässä profiilissa on nähtävissä Töölönkadun profiilin 3 kaltainen ennen ja jälkeen pyöräkaistan rakentamisen muodostunut erikoinen kolmihuippuinen uramuoto sillä erotuksella, että pyöräkaistalle jäänyt entinen oikea ajoura on huomattavasti syvempi kuin nykyisellä ajokaistalla sijaitsevat urat.

Liite 10.

Urasyyvyysmittausten tilastollisissa analysoinnissa käytetyt muuttujat ja tiedot

Profiili	Urasyyvyys vasen (mm)		Urasyyvyys oikea (mm)		Urien poikkipinta-ala jhti. (cm ²)				Messityyppi	Rakelko	Nopraj	keskinop	Liikemuutos	KVL	
	syksy 2011	kevät 2012	muutos1	syksy 2011	kevät 2012	muutos2	syksy 2011	kevät 2012							muutos3
Kuusaarentie 1	17	19	2	18	21	3	159	187,4	28,4	1	1	50	46	1	19500
Kuusaarentie 2	18	20,5	2,5	17	19,5	2,5	176,6	199,7	23,1	1	1	50	46	1	19500
Kuusaarentie 3	16,5	18,7	2,2	17	18	1	179,25	193	13,8	1	1	50	46	1	19500
Kuusaarentie 4	16	19,7	3,7	14	16,7	2,7	172,5	195,1	22,6	1	1	50	46	1	19500
Kuusaarentie 5	17,7	20,3	2,6	13,7	16,5	2,8	161,5	183,2	21,7	1	1	50	46	1	19500
Meilahdentie 1	9,2	10	0,8	5	5	0	88,3	91,6	3,3	1,1	1,04	30	15	1,1	6300
Meilahdentie 2	8,3	10,6	2,3	13,3	15,6	2,3	144	170,5	26,5	1,1	1,04	30	25	1,5	6300
Meilahdentie 3	7	8	1	4	6	2	74,7	89,8	15,1	1,1	1,04	30	20	1,5	6300
Meilahdentie 4	7	10	3	9	9	0	107	123,5	16,5	1,1	1,04	30	33	1	6300
Meilahdentie 5	5,2	6	0,8	1	1,5	0,5	47,5	59,6	12,1	1,1	1,04	30	33	1	6300
Metsäläntie 1	11,7	12,6	0,9	10,7	12	1,3	154,2	174,8	20,6	1	1	60	43	1	16700
Metsäläntie 2	12,2	13,1	0,9	7	8,3	1,3	131,5	146,4	14,9	1	1	60	44	1	16700
Metsäläntie 3	15,5	17,2	1,7	12,8	13	0,2	193,9	209,7	15,8	1	1	60	45	1	16700
Metsäläntie 4	17	18,4	1,4	13	15,4	2,4	193,6	214	20,4	1	1	60	46	1	16700
Metsäläntie 5	16,2	17,6	1,4	12,2	13,3	1,1	193,4	216,7	23,3	1	1	60	48	1	16700
Pirkkolantie 1	3,8	4,8	1	4	5,2	1,2	59,4	71,4	12	1,1	0,95	50	48	1	8000
Pirkkolantie 2	6,3	7	0,7	5,9	7,3	1,4	90	108	18	1,1	0,95	50	48	1	8000
Pirkkolantie 3	4,3	6	1,7	5,6	6,5	0,9	81,5	97,2	15,7	1,1	0,95	50	48	1	8000
Pirkkolantie 4	7,6	8,7	1,1	6	8	2	90,5	130,35	39,85	1,1	0,95	50	48	1	8000
Veturitie 1	7,2	9,3	2,1	3,8	4,9	1,1	85,4	109,8	24,4	1	1	60	42	1,1	22000
Veturitie 2	7	8,1	1,1	4	4,1	0,1	78,1	95,8	17,7	1	1	60	43	1	22000
Veturitie 3	7,3	9,4	2,1	4	5,5	1,5	81,4	108,2	26,8	1	1	60	40	1,1	22000
Veturitie 4	7,5	7,8	0,3	4,3	5,7	1,4	78,3	108,3	30	1	1	50	36	1,5	22000
Vauhittie 1	2,2	2,7	0,5	1,5	1,9	0,4	18,2	22,5	4,3	1,1	1,04	50	36	1	8000
Vauhittie 2	2,4	2,7	0,3	1,8	2,3	0,5	21	26	5	1,1	1,04	50	36	1	8000
Vauhittie 3	1,9	2,6	0,7	2,2	2,5	0,3	17,9	25,7	7,8	1,1	1,04	50	34	1,1	8000
Vauhittie 4	4,2	4,9	0,7	3,5	4	0,5	39	43,8	4,8	1,1	1,04	50	35	1	8000
Töölönkatu 1	1,8	1,9	0,1	8,4	9	0,6	66,9	76,4	9,5	1,1	1,04	30	15	2	6000
Töölönkatu 2	2,5	2,5	0	2,5	2,5	0	18	18,4	0,4	1,1	1,04	30	22	1,1	6000
Töölönkatu 3	3,2	3,3	0,1	8,7	8,7	0	56	57,2	1,2	1,1	1,04	30	20	1,1	6000
Töölönkatu 4	2	2,5	0,5	3,3	3,4	0,1	12	16	4	1,1	1,04	30	8	2	6000

Liite 11.

Statistix:illa tehtyjen lineaaristen regressioanalyysien tulokset urasyvyysmittausten datasta

Selitetty muuttuja: Ajourien (vasen ja oikea) pinta-alan muutos (V009)

Selittävä muuttuja Liikenteen keskinopeus V013:

Statistix 9.0
10:12:32

11.5.2012,

Least Squares Linear Regression of V009

Predictor

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	-1.26061	4.77088	-0.26	0.7935
V013	0.47207	0.12370	3.82	0.0007

R-Squared	0.3343	Resid. Mean Square (MSE)	62.9383
Adjusted R-Squared	0.3113	Standard Deviation	7.93336
AICc	133.23		
PRESS	2044.9		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	916.54	916.536	14.56	0.0007
Residual	29	1825.21	62.938		
Total	30	2741.75			

Lack of Fit	14	679.35	48.5249	0.64	0.7987
Pure Error	15	1145.86	76.3908		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Selittävä muuttuja: Nopeusrajoitus V12

Statistix 9.0
10:17:27

11.5.2012,

Least Squares Linear Regression of V009

Predictor

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	-0.84557	6.57752	-0.13	0.8986
V012	0.36259	0.13658	2.65	0.0127

R-Squared	0.1955	Resid. Mean Square (MSE)	76.0575
Adjusted R-Squared	0.1678	Standard Deviation	8.72109
AICc	139.10		
PRESS	2477.7		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	536.08	536.079	7.05	0.0127
Residual	29	2205.67	76.057		
Total	30	2741.75			

Lack of Fit	1	3.58	3.5836	0.05	0.8325
Pure Error	28	2202.08	78.6458		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Selittävät muuttujat: Liikenteen keskinopeus V013 ja KVL V015

Statistix 9.0
10:15:04

11.5.2012,

Least Squares Linear Regression of V009

Predictor

Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	-1.60732	4.57657	-0.35	0.7281	0.0
V015	4.966E-04	2.630E-04	1.89	0.0694	1.5
V013	0.31396	0.14516	2.16	0.0392	1.5

R-Squared	0.4095	Resid. Mean Square (MSE)	57.8226
Adjusted R-Squared	0.3673	Standard Deviation	7.60412
AICc	132.16		
PRESS	2040.5		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1122.71	561.356	9.71	0.0006
Residual	28	1619.03	57.823		
Total	30	2741.75			

Lack of Fit	19	1026.47	54.0247	0.82	0.6597
Pure Error	9	592.56	65.8405		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Selittävä muuttuja: KVL V015

Statistix 9.0
10:18:09

11.5.2012,

Least Squares Linear Regression of V009

Predictor

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	5.87419	3.18109	1.85	0.0750
V015	8.248E-04	2.281E-04	3.62	0.0011

R-Squared	0.3108	Resid. Mean Square (MSE)	65.1565
Adjusted R-Squared	0.2871	Standard Deviation	8.07196
AICc	134.30		
PRESS	2138.6		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	852.21	852.206	13.08	0.0011
Residual	29	1889.54	65.157		
Total	30	2741.75			

Lack of Fit	5	837.58	167.515	3.82	0.0109
Pure Error	24	1051.96	43.832		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Liikenteen keskinopeus V013 ja uran pinta-ala lähtötilanteessa V007

Statistix 9.0
10:19:10

11.5.2012,

Least Squares Linear Regression of V009

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	-1.12407	4.50027	-0.25	0.8046	0.0
V007	0.05908	0.02755	2.14	0.0408	1.4
V013	0.30938	0.13917	2.22	0.0345	1.4
R-Squared	0.4282	Resid. Mean Square (MSE)			55.9897
Adjusted R-Squared	0.3874	Standard Deviation			7.48262
AICc	131.16				
PRESS	1884.9				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1174.04	587.018	10.48	0.0004
Residual	28	1567.71	55.990		
Total	30	2741.75			

Cases Included 31 Missing Cases 2

Liikenteen keskinopeus V013 ja vasemman uran urasyvyyden muutos V003

Statistix 9.0
10:20:19

11.5.2012,

Least Squares Linear Regression of V009

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	-1.08310	4.51618	-0.24	0.8122	0.0
V013	0.34412	0.13210	2.61	0.0145	1.3
V003	3.49452	1.67076	2.09	0.0457	1.3
R-Squared	0.4242	Resid. Mean Square (MSE)			56.3777
Adjusted R-Squared	0.3831	Standard Deviation			7.50851
AICc	131.38				
PRESS	1915.2				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1163.17	581.585	10.32	0.0004
Residual	28	1578.58	56.378		
Total	30	2741.75			

Lack of Fit	27	1266.08	46.892	0.15	0.9844
Pure Error	1	312.50	312.500		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Päällysteen maksimiraekoko V011 ja KVL V015

Statistix 9.0
10:24:20

11.5.2012,

Least Squares Linear Regression of V009

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	150.101	46.5379	3.23	0.0032	0.0
V015	6.130E-04	2.115E-04	2.90	0.0072	1.1
V011	-140.150	45.1411	-3.10	0.0043	1.1
R-Squared	0.4873	Resid. Mean Square (MSE)			50.2013
Adjusted R-Squared	0.4507	Standard Deviation			7.08529
AICc	127.78				
PRESS	1927.5				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1336.11	668.055	13.31	0.0001
Residual	28	1405.64	50.201		
Total	30	2741.75			
Lack of Fit	4	353.67	88.4186	2.02	0.1241
Pure Error	24	1051.96	43.8318		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Liikenteen keskinopeus V013 ja ajoneuvon liiketilan muutokset V014

Statistix 9.0
10:25:55

11.5.2012,

Least Squares Linear Regression of V009

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	-38.5221	12.4873	-3.08	0.0045	0.0
V013	0.83302	0.15708	5.30	0.0000	2.1
V014	21.1755	6.68973	3.17	0.0037	2.1
R-Squared	0.5097	Resid. Mean Square (MSE)			48.0071
Adjusted R-Squared	0.4747	Standard Deviation			6.92872
AICc	126.40				
PRESS	1704.3				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1397.55	698.774	14.56	0.0000
Residual	28	1344.20	48.007		
Total	30	2741.75			
Lack of Fit	16	742.578	46.4111	0.93	0.5661
Pure Error	12	601.621	50.1351		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Vasemman ajouran urasyvyyden muutos:
Selittävä muuttuja liikenteen keskinopeus V13

Statistix 9.0
 10:29:28

11.5.2012,

Least Squares Linear Regression of V003

Predictor

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	-0.05080	0.50186	-0.10	0.9201
V013	0.03661	0.01301	2.81	0.0087

R-Squared	0.2144	Resid. Mean Square (MSE)	0.69643
Adjusted R-Squared	0.1873	Standard Deviation	0.83453
AICc	-6.3938		
PRESS	22.500		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	5.5131	5.51311	7.92	0.0087
Residual	29	20.1966	0.69643		
Total	30	25.7097			

Lack of Fit	14	13.5519	0.96799	2.19	0.0726
Pure Error	15	6.6447	0.44298		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Selittävä muuttuja: V015 = Keskivuorokausiliikenne KVL (ajon/vrk)

Statistix 9.0
 15:00:30

stagarimitatut11-2, 7.6.2012,

Least Squares Linear Regression of V003

Predictor

Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	0.44148	0.32534	1.36	0.1853
V015	6.889E-05	2.332E-05	2.95	0.0062

R-Squared	0.2312	Resid. Mean Square (MSE)	0.68154
Adjusted R-Squared	0.2047	Standard Deviation	0.82556
AICc	-7.0639		
PRESS	22.930		

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	5.9450	5.94495	8.72	0.0062
Residual	29	19.7647	0.68154		
Total	30	25.7097			

Lack of Fit	5	10.3797	2.07594	5.31	0.0020
Pure Error	24	9.3850	0.39104		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Oikean ajouran urasyvyyden muutos:

Selittävät muuttujat: V013 = liikenteen keskinopeus, V014 = ajoneuvon liiketilan muutokset

Statistix 9.0
14:43:50

stagarimitatut11-2, 7.6.2012,

Least Squares Linear Regression of V006

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	-3.24308	1.42229	-2.28	0.0304	0.0
V013	0.06651	0.01789	3.72	0.0009	2.1
V014	1.70229	0.76196	2.23	0.0336	2.1
R-Squared	0.3376	Resid. Mean Square (MSE)			0.62280
Adjusted R-Squared	0.2903	Standard Deviation			0.78918
AICc	-8.2963				
PRESS	20.972				

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	8.8894	4.44468	7.14	0.0031
Residual	28	17.4384	0.62280		
Total	30	26.3277			

Lack of Fit	16	13.3004	0.83127	2.41	0.0643
Pure Error	12	4.1380	0.34483		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Selittävä muuttuja: V015 = Keskivuorokausiliikenne KVL (ajon/vrk)

Statistix 9.0
14:58:33

stagarimitatut11-2, 7.6.2012,

Least Squares Linear Regression of V006

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P
Constant	0.33254	0.33640	0.99	0.3311
V015	6.441E-05	2.412E-05	2.67	0.0123
R-Squared	0.1974	Resid. Mean Square (MSE)		0.72863
Adjusted R-Squared	0.1697	Standard Deviation		0.85360
AICc	-4.9928			
PRESS	24.404			

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	5.1975	5.19747	7.13	0.0123
Residual	29	21.1303	0.72863		
Total	30	26.3277			

Lack of Fit	5	9.0163	1.80325	3.57	0.0148
Pure Error	24	12.1140	0.50475		

Cases Included 31 Missing Cases 2

Liite 12. Urasyvyysmittauskohteiden sijainti ja ajosuunnat Helsingin kartalla



(Kartan lähde: Google Maps)

Liite 13.

AL-Profilometrin (4,0 m) kokoonpano ja tekniset tiedot

Valmistaja: Al-Engineering Oy
Leppälinnunpolku 26
02620 Espoo

AL-Profilometri koostuu seuraavista osista:

1. Mittauspalkki
 - laseranturi
 - siirtomoottori
 - pulssianturi
 - etu- ja takarajakatkaisimet
 - mittauksen aloitusrajakatkaisin
 - tukijalat
2. Tiedonkeruu
 - tiedonkeruukortti
 - 12/24 V invertteri laseria varten
 - tarvittava muu mittauselektroniikka
3. PC
 - 486 tai tehokkaampi
 - värigrafiikka vähintään VGA

Tekniset tiedot:

Mittausalue:

- korkeus 100... 300 mm
- pituus 100... 4000 mm

Laser:

- mittauspisteenä näkyvä punainen valo
- mittauspisteen halkaisija mittausalueella 2 mm
- resoluutio 0,05 mm

Nopeus:

- valittavissa, n. 1-8 m/min

Pisteväli:

- 1 tai 2 mm, käyttäjän valittavissa

Mittauspalkin laskennallinen maksimitaipuma palkin keskellä n. 0,6 mm.

LIITE 14.

Päällysteet, autolla tehtävät mittaukset
PANK ry / Laboratoriotuotanto

PANK-5207

PANK

PITUUSSUUNTAINEN TASAISUUS

IRI JA IRI4, PTM-AUTO

PÄÄLLYSTEALAN NEUVOTTELUKUNTA

Hyväksytty: 16.01.2004

Korvaa menetelmän:-

1. MENETELMÄN TARKOITUS

Päällysteiden pituussuuntaisen tasaisuuden mittaaminen palvelutasomittarilla (PTM-auto).

2. MENETELMÄN SOVELTAMISALUE

Menetelmä soveltuu päällystettyjen liikennealueiden (tiet, kadut, yms.) pituussuuntaisen tasaisuuden mittaamiseen.

3. MÄÄRITELMÄT

Tien pituussuuntainen tasaisuus mitataan kahdella suureella:

- IRI, kansainvälinen tasaisuusindeksi (International Roughness Index), aallonpituudet 0,5-50 m, yksikkönä mm/m,
- IRI-4, kuten IRI, mutta ilman epätasaisuuksia, jotka syntyvät yli 4 m aallonpituuksista.

Molemmat suuret mitataan tien oikean ajouran (tai sen oletetun paikan) kohdalta.

Mittaustulosten raportointi tehdään tilaajan etukäteen määrittelemälle raportointivälille (yleensä 100 m). IRI voidaan tarvittaessa raportoida myös 5 metrin osuuksille (muuttuja 5mIRI). Tulosten esittämistarkkuus on 0,1 mm/m.

4. KOEMENETELMÄ

4.1. Periaate

Tien pituussuuntaista epätasaisuutta kuvataan kansainvälisellä tasaisuusindeksillä (IRI). Se lasketaan pituussuuntaisesta profiilista laittamalla ”Golden Car” jousitusparametreilla varustettu ajoneuvo kulkemaan mitattua profiilia pitkin vakionopeudella 80 km/h. IRI on laskettava käyttäen ”Quarter Car Simulator” -parametreja seuraavasti:

$V = 80 \text{ km/h}$ (simuloinnin ajonopeus)

$k_t/M = 653 \text{ s}^{-2}$ (renkaan jousivakio/rungon massa)

$k_s/M = 63,3 \text{ s}^{-2}$ (jousituksen jousivakio/massa)

$u = 0,15$ (pyörän massa/rungon massa)

$c = 6,00 \text{ s}^{-1}$ (iskunvaimenninvakio/massa)

Uusien päällysteiden laadunvalvonnassa käytetään lisäksi IRI:n muunnelmia,

IRI-4, josta on karsittu pitkät aallonpituudet pois. IRI4 suodattimen vaimennus 4,5 metrin aallonpituudella on -3 dB ($\pm 1 \text{ dB}$) ja jyrkkyys 40 dB ($\pm 10 \text{ dB}$)/ oktaavi. IRI/IRI4:n laskentaan käytettävien, mittaushavainnoista laskettavien, profiilipisteiden väli saa olla enintään 250 mm (IRI-määritelmän mukainen). IRI:n tarkempi määritelmä on esitetty julkaisuissa /1/ ja /2/. Muita mittausperiaatteiden taustoja on esitetty muistiossa /3/.

4.2. Laitteisto

Pituussuuntaista tasaisuutta voidaan mitata kaikilla tähän tarkoitukseen rakennetuilla laitteilla, mikäli ne täyttävät kohdassa 4.3 esitetyt kalibrointi- ja tarkkuusvaatimukset. Laitteiden tekninen toiminta voi perustua mm. laser- tai ultraäänikameroihin ja kiihtyvyyssantureihin. Havaintovälin on pituussuunnassa oltava korkeintaan 80 millimetriä ja mittaussensorien resoluution pystysuunnassa korkeintaan 0,1 mm. Mittalaitteessa tulee olla kalibroitavissa oleva pituusmittauslaite, jonka tarkkuus on vähintään 0,1 %. Alle 1 km:n mittauksissa etäisyys tulee mitata vähintään 1 m:n tarkkuudella. Kunkin laitteiston tekniset yksityiskohdat on saatavissa joko mittauksen tai laitteiden toimittajilta.

4.3. Laitteiston hyväksyntäperiaatteet

Käytettävän laitteiston tulee läpäistä säännöllisin väliajoin (1-3 vuotta) tehtävät vertailumittaukset. Testien periaatteet on kuvattu muistiossa /4/. Pääperiaatteet ovat lyhyesti seuraavat:

- laitetoimittaja/mittauksen toimittaja vastaa laitteiden teknisestä kunnosta sekä mittauksen kohdistuvuudesta ”tosimitaan” (nämä asiat on pystyttävä esittämään pyydettyäessä)
- vertailumittauksissa tutkitaan sekä mittauksen toistettavuus että vertailtavuus vastaaviin muihin laitteisiin (yksi laite per toimittaja)
- laitetoimittaja/mittauksen toimittaja vastaa, että kaikki heidän laitteensa mittaavat samalla tavoin kuin kalibrointeihin osallistunut laitteisto
- laitetoimittaja/mittauksen toimittaja vastaa, että laitteiston kunto pysyy jatkuvasti kalibrointitestejä vastaavalla tasolla.

Vertailumittauksissa hyväksytään ne laitteistot, joiden mittauksen toistettavuus ja vertailtavuus on hyväksyttävissä tilastollisilla menetelmillä korkeintaan 5 prosentin riskitasolla (=laitteet mittaavat keskimäärin samalla tavalla 95 % todennäköisyydellä).

4.4. Mittaus

Mittaamisen käytännön ohjeet ovat mittauksen toimittajan vastuulla. Niiden lisäksi mittaukset tulee tehdä tilaajan laatuvaatimusten mukaisesti. Oleelliset laatuperiaatteet on esitetty ohessa, tarkemmat ohjeet on esitetty mittauksen toimittajien mittausohjeissa:

- mitattavan tien tulee olla riittävän kuiva (ei seisovaa vettä) ja puhdas (ei savea/soraa tms.) sekä lämpötilan mittalaitteen valmistajan suosittelemalla alueella
- mittaus tehdään yhden kerran kullakin kohteella. Jos mittaukset joudutaan uusimaan, tehdään ne uudelleen koko kohteelle mittaus tehdään muuta liikennettä häiritsemättä, jolloin tavallinen mittausnopeus on 30-80 km/h.

5. TULOSTEN ESITTÄMINEN

Tulostustapa (tiedosto, raportti, jne.) sovitaan mittauksen tilaajan kanssa.

Tulostuksessa ilmoitetaan vähintään seuraavat asiat:

- mittaus on tehty tämän menetelmäkuvauksen mukaan
- mahdolliset poikkeamat menetelmäkuvauksen mukaisesta järjestelystä
- kokeen suorituspäivämäärä
- käytetty mittalaite ja mittaajan nimi
- tutkitun päällysteen sijainti- ja tunnistetiedot johonkin paikkatietoon sidottuna (esim. tierekisteriosoite)
- mitatut tunnusluvut tilatulle tulostusvälille (esim. 100 m)
- mitattujen tunnuslukujen keskiarvo koko kohteelle
- mittausnopeuden keskiarvo tilatulle tulostusvälille
- muut tilaajan ilmoittamat tiedot, esim. päällystetyyppi ja tieluokka.

6. TARKKUUS

Mittausten toimittaja vastaa seuraavista mittaustarkkuuteen liittyvistä asioista:

- yksittäisen mittauksen tarkkuus
- mittauksen oikeellisuus ('tosimittaan' nähden)
- mittausten toistettavuuden tarkkuus

Tiedot on toimitettava mittausten tilaajalle pyydettyä.

7. VIITTEET

1. Sayers, M, ja Karamihas, S. (1998), The Little Book of Profiling. Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles. The Regent of the University of Michigan.
2. Sayers, M. W., et al., "Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements". World Bank Technical Paper Number 46, World Bank, Washington, DC (1986) 87 p.
3. Tiehallinto (2003), Päällystetyn tieverkon kuntomuuttajat 2003- 2007. Palvelujen suunnittelu, sisäinen muistio.
4. Tiehallinto (2002), Päällystetyn tieverkon palvelutasomittaukset 2003-2007. Tarjouspyynnön liite 6: Laatuvaatimukset.