

Tiehallinnon selvityksiä 1/2002

Harri Spoof, Sami Petäjä

Kevytpäällysteisten tierakenteiden kunnan kehittymisen ennustemallit

Tiehallinto

Helsinki 2002

ISSN 1457-9871
ISBN 951-726-857-2
TIEH 3200735
Edita Oy
Helsinki 2001

Julkaisua myy
Tiehallinnon palvelukeskus
Painotuotemyynti
Faksi 020 422 2652
e-mail julkaisumyynti@tiehallinto.fi
www.tiehallinto.fi/julk2.htm

Tiehallinto
Opastinsilta 12 A
PL 33
0521 HELSINKI
Puh. Vaihde

TIIVISTELMÄ

Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen –projektin yhtenä tehtävänä oli kehittää ennustemallit tien kunnan kehittämiseksi. Tien kuntoa kuvattiin tässä yhteydessä pitkäaikaisella epätasaisuudella, poikittaisella epätasaisuudella sekä päällysteen halkeilulla. Mallit luotiin erikseen PAB- ja ohutpäällysteisille AB-teille. Aineiston analysoinnissa huomioitiin sekä verkkotason että hanketason tarpeet, kuitenkin päätavoitteena luoda tieverkkotasoa palvelevat kunnan kehittämistä ennustavat mallit, jotka olisivat mahdollisimman helposti hyödynnettävissä eri tasoilla Tiehallinnon tieverkon kuntoa ennustavissa järjestelmissä.

Tien poikittaista epätasaisuutta kuvaavalle harjanteen korkeudelle kehitettiin kunnan kehittämistä ennustavat mallit, erikseen ilmastoalueittain ja päällystetyypeittäin. Etelä-Suomen aineistolla ohutpäällysteisten AB- ja PAB-teiden osalta harjanteen nopeutta selitti parhaiten päällysteen leveys, SCI450 ja KVL. Pohjois-Suomen PAB-teillä paras selittäjäkombinaatio harjanteen nopeudelle oli SCI450 ja päällysteen leveys.

Käytettävissä olevan aineiston perusteella ei saatu kehitettyä rakenteellisia selittäjiä sisältäviä malleja pituussuuntaiselle epätasaisuudelle, poikittaiselle epätasaisuudelle eikä päällystevaurioille. Tästä syystä vaihdettiin mallinnuksen lähestymistapaa analysointimenetelmään, jossa kohteen tulevaa rappeutumisenopeutta ennustetaan nykykunnan avulla. Nämä mallit soveltuvat hyvin käytettäväksi PMS-järjestelmissä, mutta niitä ei voi hyödyntää hanketasolla rakenteellisen suunnittelun yhteydessä. Mallintamismenetelmän lähtökohta on selittää kuntomuuttujan rappeutumisen kehittämisen funktionaalinen muoto mallinnettavalla aikajaksolla. Mikäli kohteen rappeutumisenopeus määritetään suoraan jakamalla toteutunut rappeutumistaso kohteen iällä saadaan tuloksena yleensä, joko liian nopea tai liian hidas nopeus, koska useimmiten käytännössä rappeutumisen lähtöarvo ei ole nolla ja/tai se ei noudata kehittämisen alkuvaiheessa lineaarista muotoa. Tätä mallinnusmenetelmää käyttäen kehitettiin kunnan kehittämisen ennustemallit pituussuuntaiselle epätasaisuudelle, poikittaiselle epätasaisuudelle sekä päällystevaurioille. Mallit kehitettiin erikseen PAB- ja ohutpäällysteisille AB-teille.

Viimeinen vaihe analysointityössä oli kehitettyjen kevytpäällysteisten teiden kunnan kehittämistä ennustavien mallien toimivuuden testaus. Koska mallien kehittämiseen käytetty aineisto ei kattanut kaikkia Suomen olosuhteita, tuli kehitettyjen mallien toimivuus testata riippumattomalla aineistolla. Testaus käsitti poikittaisen epätasaisuuden, pituussuuntaisen epätasaisuuden ja vauriosumman mallit. Harjanteen kasvunopeuden mallia ei voitu testata, koska kuntorekisteri ei sisällä harjanteen korkeutta muuttujana, eikä näin ollen ollut käytettävissä mallien testauksessa tarvittavaa riippumatonta aineistoa. Mallien testauksen tulos osoitti, että mallinnusaineiston rajoitukset eivät vaikuta mallien käyttökelpoisuuteen.

Projektissa kehitetyt mallit ovat hyödynnettävissä Tiehallinnon HIPS- ja PMS-järjestelmissä ja malleissa tarvittavat selittäjät ovat tienpitäjällä käytettävissä jo tällä hetkellä. Mallit ennustavat kunnan kehittymistä käytännön tilanteissa ja auttavat siten tienpitäjää ylläpidon ja investointien suunnittelussa.

Harri Spoof, Sami Petäjä : Kevytpäällysteisten tierakenteiden kunnan kehittämisen ennustemallit. [Pavement performance models for secondary roads with thin overlays]. Helsinki 2002. Tiehallinto, Tiehallinnon selvityksiä 1/2002. 60 s. + liitt. 12 s. ISBN 951-726-857-2, ISSN 1457-9871, TIEH 3200735

Keywords : secondary road, pavement, pavement performance, model, quality, evenness, cracking, test sections

ABSTRACT

One of the main objectives of the project "Development of pavement performance models and design methods for secondary roads with thin overlays" was to develop performance models for longitudinal unevenness, transverse unevenness and pavement cracking. The models were developed for use in the Pavement Management Systems of Finnra, which are called HIPS (Highway Investment Programming System) and PMSpro (Pavement Management System).

Because no long term pavement performance test section data were currently available from this type of road network, the first objective of this task was to select a sample of test sections from the existing road network. Test sections were selected based on experimental design with variations in climatical location, subgrade properties, traffic levels, overlay type and pavement age. In addition to the available network level information (from the national condition database, KURRE) more detailed project level type of measurements were done on the test sections.

Pavement performance models were developed for transverse unevenness, which was described as the ridge height between wheel paths. Separate models were developed for different pavement surface type (soft asphalt concrete and asphalt concrete) and climatical conditions. The explanatory variables in the models are Surface Curvature Index (SCI450), pavement surface width and annual average daily traffic (AADT).

Performance models including explanatory variables could not be developed with the existing data for longitudinal unevenness nor pavement distress. Therefore another analysis approach was selected to develop distress propagation models for these condition indicators respectively. Distress propagation models predict the change in a level of distress over time for a road section on the basis of observed distress at a certain moment in time. Distress propagation models are often practical because they do not require any knowledge of the factors explaining deterioration (i.e. layer thickness, material properties, climate factors). For this reason they are easy to use in a pavement management system when field data are available. The distress propagation models were developed separately for longitudinal unevenness and pavement distress clustered by pavement surface type (soft asphalt concrete and asphalt concrete).

Data used in the modelling did not cover all areas of the country. In order to check, if the developed models were applicable nationally, a model validation was done with independent data randomly selected from the national database of Finnra. The validation results showed that the shots in the modelling data do not affect the usability of models. This result was common for all models validated.

The benefits from this study for the practitioners of pavement management are as follows. The models produced are suited for use in the daily practice of pavement management. They require only input parameters that are readily available to the pavement manager. Further, they describe the part of the distress evolution, which is of relevance in the planning of pavement maintenance and rehabilitation. The distresses modelled are those which are essential for pavement management purposes. In all, the models presented in this report can help the pavement manager produce a system of prudent investment for his road network.

ALKUSANAT

Tielaitoksen johtoryhmä päätti käynnistää *Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusmenetelmien kehittäminen*-projektin kesällä 1999. Projekti toteutetaan yhteistyössä VTT:n Rakennus- ja Yhdyskuntatekniikan ja Oulun Yliopiston kanssa Tiehallinnon ja Tieliikelaitoksen ohjauksessa. Tutkimuksen tässä osavaiheessa (Osavaihe IV) kehitettiin kevytpäällysteisille teille kunnon kehittymistä ennustavat mallit. Osavaiheen IV päävastuu on VTT:n Rakennus- ja Yhdyskuntatekniikalla.

Seuraavat henkilöt ovat osallistuneet projektin ohjausryhmän kokouksiin:

Aarno Valkeisenmäki	Tieliikelaitos (konsultointi), puheenjohtaja
Panu Tolla	Tieliikelaitos (konsultointi)
Pertti Virtala	Tiehallinto (Hti)
Ismo Iso-Heiniemi	Tiehallinto (Hti)
Tuomas Toivonen	Tiehallinto (Hos)
Kari Lehtonen	Tiehallinto (Htl)
Tuomo Kallionpää	Tiehallinto (Htl)
Esko Ehrola	OY, koordinaattori
Jouko Belt	OY
Laura Apilo	VTT-YKI, koordinaattori
Jouko Törnqvist	VTT-YKI
Sami Petäjä	VTT-YKI, sihteeri
Harri Spoo	VTT-YKI, osavaihe IV vastuhenkilö

VTT Rakennus- ja Yhdyskuntatekniikassa tutkimuksen tekemiseen ja raportin laatimiseen ovat osallistuneet Harri Spoo ja Sami Petäjä. Lisäksi projektiryhmään on Oulun yliopiston puolelta osallistuneet Jouko Belt ja Esko Ehrola.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	11
2	AIKAISEMPIEN OSAVAIHEIDEN TULOKSET	13
2.1	Tien vaurioitumismekanismit	13
2.1.1	Roudan aiheuttamat halkeamat	13
2.1.2	Pituussuuntainen epätasaisuus	14
2.1.3	Poikkisuuntainen epätasaisuus	14
2.2	Tieverkkotason havaintotieaineiston analysointi	15
3	HAVAINTOTIEOTOKSEN VALINTA	17
3.1	Otoksen valinta osavaiheessa II	17
3.2	Otoksen valinta tässä osavaiheessa (IV)	19
4	HAVAINTOTIEAINEISTON TÄYDENTÄMINEN	22
4.1	Pudotuspainolaitemittaukset	22
4.2	Maatutkamittaukset	23
4.3	Vaurioinventointi ja PTM-mittaus	24
5	AINEISTON ANALYSOINTIVAIHEET	26
5.1	Analysointivaihe I	26
5.2	Analysointivaihe II	28
6	KUNNON ENNUSTEMALLIT	31
6.1	Mallinnettavat muuttujat	31
6.2	Harjanteen korkeus, HAR	32
6.2.1	Yleistä	32
6.2.2	Harjanteen kasvunopeuden mallit	33
6.3	Poikittainen epätasaisuus, PETA	35
6.3.1	Yleistä	35
6.3.2	Poikittaisen epätasaisuuden mallit	36
6.3.3	Poikittaisen epätasaisuuden mallien tulkinta	38
6.4	Pituussuuntainen epätasaisuus, IRI	39
6.4.1	Yleistä	39
6.4.2	Pituussuuntaisen epätasaisuuden mallit	40
6.4.3	Pituussuuntaisen epätasaisuuden mallien tulkinta	41
6.5	Vauriosumma, VS	42
6.5.1	Yleistä	42
6.5.2	Päällysteen vaurioitumisen mallit	43
6.5.3	Vauriomallien tulkinta	44
7	MALLIEN TOIMIVUUDEN TESTAUS (VERIFIOINTI)	46
7.1	Testausaineiston valinta	46
7.2	Mallien toimivuuden testauksen periaate	46
7.3	Mallien testauksen tulokset kuvaajina	47
7.3.1	Poikittainen epätasaisuus, PETA	48

7.3.2	Pituussuuntainen epätasaisuus, IRI	50
7.3.3	Vauriosumma, VS	52
7.4	Tulosten arviointi	54
8	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	56
9	KIRJALLISUUS	59
10	LIITTEET	60

1 JOHDANTO

Kevytpäällysteiset tiet ovat tyypillisesti poikkileikkaukseltaan kapeita ja usein myös tien luiskat ovat jyrkkiä, minkä vuoksi liikennekuormituksen aiheuttamat rasiukset ovat suuria lähellä tien reunaa. Lisäksi sitomattomat päällysrakennekerrokset ovat suhteellisen ohuita, mikä myös lisää liikennekuormituksen aiheuttamia rasiuksia. Tämän projektin yhteydessä kevytpäällysteisillä teillä tarkoitetaan ohutpäällysteisiä AB-teitä (paksuus luokkaa 40 ... 80 mm) sekä ÖS-, KAB- ja PAB-päällysteisiä teitä. Sellaiset ohutpäällysteiset tiet, joissa on kulutuskerroksen alapuolisia bitumilla tai sementillä sidottuja kerroksia jäävät tämän tarkastelun ulkopuolelle.

Ohutpäällysteisten teiden käyttäytymisen selvittämiseksi käynnistettiin Tielaitoksen rahoituksella vuonna 1999 laaja *Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusmenetelmien kehittäminen*- projekti. Tutkimuksen tavoitteina olivat kevytpäällysteisten teiden kuormituskäyttäytymisen selvittäminen ja kestoikämallien laatiminen Tiehallinnon tienpidon ohjaus- ja ylläpitojärjestelmiin (HIPS ja PMS) sekä kevytpäällysteisten teiden mitoitusmenettelyn kehittäminen. Tutkimus toteutettiin vaiheittain seuraavasti, joista tässä raportissa käsitellään tutkimuksen osavaihetta IV:

- I. Perusteosa
- II. Olemassa olevan havaintoaineiston kokoaminen, analysointi ja täydentäminen
- III. Lähtöaineiston täydentäminen
- IV. Kunnan kehittymisen ennustemallit
- V. Mitoitusmenettelyn kehittäminen

Tien rakenteellisen kunnan muuttumisen ennustamista ja kestoian mallintamista varten tarvitaan havaintotieaineistoa, jolla tarkoitetaan tieverkolta valittuja, yleensä noin 100-300 m pitkiä tieosuuksia, joiden kunnan kehittymistä seurataan useamman vuoden ajan. Kevytpäällysteisten tierakenteiden projektin osavaiheessa II valittiin otostiekohteet, joilta kerättiin aineistoa täydentämään kohteista olemassa olevaa kuntorekisteriaineistoa. Tälle aineistolle suoritettiin alustava analyysi osavaiheessa II.

Lisämittauksilla täydennetyn otostieaineiston analysoinnilla pyrittiin testaamaan ja edelleen kehittämään aikaisempien osavaiheen aikaansaamat hypoteesit ja tulokset. Tämä tapahtui analysoimalla edellä valittuja otoskohteita luotettavammalla ja tarkemmalla lisäaineistolla kuin mitä oli käytettävissä osavaiheessa II. Aineiston analysoinnissa huomioitiin sekä verkkotasoon että kohdetason tarpeet, kuitenkin päätavoitteena luoda tieverkkotasoa palvelevat kunnan kehittymistä ennustavat mallit, jotka olisivat mahdollisimman helposti hyödynnettävissä eri tasoilla Tiehallinnon tieverkon kuntoa ennustavissa järjestelmissä. Käytännön syistä tiekohdetasolla on käytössä tarkempaa tietoa tai aineistoa, kuin mitä on kohtuullisin kustannuksin mahdollista saada tieverkkotasolta.

Osavaiheen IV (Kevytpäällysteisten tierakenteiden kunnan kehittymistä ennustavat mallit) analysoinnin tavoitteena oli etsiä yhteyksiä ja luoda mallit tien kunnan kehittymistä kuvaavien muuttujien ja kunnan kehittymistä selittävien muuttujien välille. Tien kuntoa kuvataan tässä yhteydessä pitkittäisellä epätasaisuudella, poikittaisella epätasaisuudella sekä päällysteen halkeilulla. Näitä tulisi projektin aikaisempien osavaiheiden mukaan kuvata IRI:n kasvunopeudella, harjanteen ja/tai poikittaisen epätasaisuuden kasvunopeudella sekä pituushalkeamien ja/tai vauriosumman kasvunopeudella. Mallit pyrittiin luomaan erikseen PAB- ja ohutpäällysteisille AB-teille.

Osavaiheessa II käytettävissä olevalla aineistolla ei voinut tarkastella kohteita aikasarjoina, vaan kunnan muutosnopeudet määritettiin yhden (viimeisen) mitatun havainnon perusteella. Sen sijaan osavaiheessa IV voitiin tarkastella myös kunnan kehittämissprosessia. Tämän mahdollisti vuonna 2000 suoritettu vauriokartoitus yhdessä aikaisempien kuntorekisteritietojen kanssa. Aluksi tarkasteltiin mitä funktionaalista muotoa eri kuntomuuttujien kehittymisen aikasarjat noudattavat, jonka jälkeen todettua muotoa/nopeutta pyrittiin selittämään olemassa olevien muuttujien avulla. Mallinnuksessa käytettävissä oleva aineisto parani mm. vuonna 2000 suoritettujen pudotuspainolaitemittausten ja maatutkamittausten johdosta. Pudotuspainolaitemittaukset suoritettiin 50 m välein kun edelliset käytettävissä olevat tiedot ovat keskimäärin 500 m välein. Maatutkamittaus suoritettiin jatkuvana koko 50 km aineistolle päällysteen ja rakennekerrospaksuuksien määrittämiseksi.

2 AIKAISEMPIEN OSAVAIHEIDEN TULOKSET

2.1 Tien vaurioitumismekanismit

Tutkimusprojektin ensimmäisen osavaiheen tehtävänä oli kehittää vaurioitumishypoteesit kevytpäällysteisille teille. Osavaiheen I tulokset on esitetty raportissa ”Kevytpäällysteiden vauriomallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet”. Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumisen kannalta kriittisimpiä ja siten mitoitusmenettelyn kehittämisen lähtökohdaksi otettavia tekijöitä ovat roudan aiheuttamat halkeilut sekä tien pituus- ja poikkisuuntainen epätasaisuus [Belt et al., 2000].

2.1.1 Roudan aiheuttamat halkeamat

Roudan aiheuttamat halkeamat ovat pääosin pituussuuntaisia halkeamia. Pituushalkeamat johtuvat epätasaisesta routanoususta tien poikkisuunnassa, jolloin päällysrakenteen yläosaan syntyy vetorasituksia. Pituushalkeamien mitoittamisessa tarkastellaan laskennallisten routanousujen ja tien leveyden mukaista pituushalkeamariskiä.

Ajokaistahalkeamia esiintyy tyypillisesti tiekohdissa, missä rakenne sisältää jonkinlaisen epäjatkuvuuskohdan, jossa routivuserot ovat paikallisesti huomattavia. Tierakenteen epäjatkuvuuskohtana voi olla jokin rakenteen osa, kuten rumpu, salaoja, putkijohto tai päällysrakennepaksuuden muutos, jotka hyvin usein sisältävät routanousueroja tasoittavan siirtymäkiilarakenteen. Epäjatkuvuuskohdan voi aiheuttaa myös alusrakenteen materiaalin huomattava muuttuminen tai tien leventäminen.

Pituushalkeamia esiintyy tyypillisesti joko tien keskiosassa tai reunaosissa olevina halkeamina ja niiden sijainti riippuu tien leveydestä. Kun tie on leveydeltään luokkaa 7 – 9 m, pituushalkeama sijaitsee todennäköisemmin tien keskellä. Reunahalkeamat ovat tien keskiosiin muodostuvia halkeamia yleisempiä kapeilla teillä (5 – 6 m). Toisaalta reunahalkeamat ovat yleisiä hyvin leveillä teillä (11 – 12 m). [Tielaitos, 1991]

Selvimpänä edellytyksenä pituushalkeamien muodostumiselle on riittävä routanousuero tien keski- ja reunaosien välillä. Pituushalkeamien syntymiselle kriittisenä arvona pidetään 1,5 – 2,0 % kulmamutosta routanousun korkeudessa poikkileikkauksen keski- ja reunaosien välillä. Pelkästä suuresta maksimiroutanoususta ei siis välttämättä aiheudu pituushalkeamia, kun routanousu tapahtuu tasaisesti koko poikkileikkauksen leveydellä. [Belt et al., 2000]

2.1.2 Pituussuuntainen epätasaisuus

Pituussuuntainen epätasaisuus johtuu kevytpäällysteisillä teillä pääasiassa routanousujen epätasaisuudesta ja/tai alusrakenteen painumisesta. Toissijaisena syynä on liikennekuormitus. Keväällä, rakenteen sulaessa, routa-epätasaisuudet aiheuttavat dynaamisia kuormituslisiä, jolloin sulavaan päällysrakenteeseen syntyy helposti pysyviä muodonmuutoksia. Myös tasaisten routanousujen palautuminen voi olla epätasaisista ja siten aiheuttaa pituussuuntaista epätasaisuutta. Pituussuuntaista epätasaisuutta esiintyy usein myös alusrakenteen ollessa heikko (turve, savi) tai alusrakenteen materiaalin laadun vaihdellessa voimakkaasti, jolloin ajan myötä syntyy painumia. [Belt et al., 2000]

Oulun Yliopiston kestoikä tutkimuksen [Belt, 1999] koealueilla PAB-O –päällysteisillä teillä pituussuuntaiset epätasaisuudet ovat lisääntyneet 10 vuoden aikana sitä enemmän mitä suuremmat routanousut ovat. Routanousujen ollessa vähäisiä IRI-arvot eivät ole juurikaan lisääntyneet. Pituussuuntaista epätasaisuutta on myös alusrakenteen vaihtumiskohdissa, vaikkei esiintyisikään suuria routanousuja. Raskaan liikenteen määrä ja mahdollisesti myös päällysrakenteen yläosan ominaisuudet vaikuttavat pituussuuntaisen epätasaisuuden lisääntymiseen. Kevytpäällysteisellä tierakenteella sitomattoman kantavan kerroksen ominaisuuksilla on myös merkitystä, jos kantavan kerroksen materiaali on esim. herkkä vedelle. [Belt et al., 2000]

2.1.3 Poikkisuuntainen epätasaisuus

Poikkisuuntainen epätasaisuuden lisääntymisen perussyynä on liikennekuormitus. Toissijaisina syinä ovat routanousujen epätasaisuus ja hitaasti tapahtuva pohjamaan pysyvä deformatio (viruminen). Poikkisuuntainen epätasaisuus ilmenee ajolinjojen kohdalle syntyvänä urautumisena ja sitä kuvaa hyvin ajourien välisen harjanteen korkeus. [Belt et al., 2000]

Sidotun päällystekerroksen pysyvät muodonmuutokset (tiivistyminen, deformatio, kuluminen) eivät ole kevytpäällysteisten teiden kokonaisurautumisen kannalta kovinkaan merkityksellisiä, koska päällyste on ohut ja liikenne suhteellisen vähäistä. Hyvin huomattava osa kevytpäällysteisten teiden poikkisuuntaisesta epätasaisuudesta on seurausta heikkolaatuisissa tai epähomogeenisissa sitomattomissa rakennekerroksissa ja alusrakenteessa tapahtuvista pysyvistä muodonmuutoksista. [Belt et al., 2000]

Liikenteen kuormittaessa tierakennetta materiaali pyrkii siirtymään ajourien kohdalla alaspäin samalla syrjäyttäen vieressä olevaa materiaalia sivulle. Syrjäytyvä materiaali liikkuu sivulle ja ylöspäin pienintä vastusta kohden. Tienreunan puoleinen osa materiaalista pyrkii nousemaan myös ylöspäin. Vaakasuurtaisten pysyvien muodonmuutosten seurauksena tie levenee. Urautuminen on puolestaan seurausta ajourien kohdalla tapahtuvasta painumisesta sekä ajourien välissä tapahtuvasta materiaalien kohoamisesta. Tien levenemisen ja urautumisen välillä on selvä yhteys. Molemmat vauri-

oitumismekanismit liittyvät tierakenteen pysyviin muodonmuutoksiin. Mitä helpommin materiaali siirtyy vaakasuunnassa sitä nopeampaa on tien urautuminen. [Belt et al., 2000]

Poikkisuuntaista epätasaisuutta on yleisesti kuvattu PTM-autolla määritetyllä ulkouran syvyydellä. Kevytpäällysteisille teille on tyypillistä, että päällystetty piennar on kapea tai sitä ei ole lainkaan, minkä vuoksi liikennekuormitus välittyy rakenteeseen lähellä tien reunaa aiheuttaen reunaosassa painumista. Tällöin urautuminen ei ilmene kokonaisuudessaan ulkouran syvyydessä. PTM-autolla määritetyt ulkouran syvyydet ovatkin usein negatiivisia. Ajolinjojen vaihtelusta ja tien poikkileikkauksen kuperuudesta johtuen ulkouran syvyys on kapeilla teillä osoittautunut epäluotettavaksi poikkisuuntaisen epätasaisuuden kuvaajaksi. Ajourien välisen harjanteen korkeus on kapeilla teillä selvästi parempi poikkisuuntaisen epätasaisuuden tunnusluku kuin ulkouran syvyys. Kun poikkisuuntaisen epätasaisuuden arvioimiseksi määritetään suurin kaistalla oleva harjanteen korkeus vakioleveydellä (esim. ajourien välinen leveys 2,2 m), ei tien reunan painumisesta aiheudu vääristymää mittaustuloksiin. Tällä tavalla määritetty harjanteen korkeuden arvo on käytännössä aina positiivinen, minkä vuoksi mittaustulokset ovat keskenään vertailukelpoisia, huolimatta siitä, onko kaistalla selvä ulkoura tai ei. [Belt et al., 2000]

2.2 Tieverkkotason havaintotieaineiston analysointi

Tutkimusprojektin toisessa osavaiheessa kerättiin otostieaineisto kevyt- ja ohutpäällysteisten teiden kunnan muuttumisen mallintamiseksi ja analysoitiin kerätty aineisto. Osavaiheen II tulokset on esitetty raportissa ”Kevytpäällysteisten tierakenteiden projekti, havaintotieaineiston kokoaminen ja analysointi” [Spoof et al., 2000a].

Tutkimusaineistona käytettiin kuntotietorekisteristä valittua otosta. Otokseen valittavilta kohteilta on oltava mahdollisimman kattavasti rekisterissä yleistiedot ja kuntohistoria. Kohteiden valinnassa käytettiin muuttujina päällystetyyppiä, tien ja päällysteen leveyttä, luiskan kaltevuutta, liikennemäärätietoja, kuivatusolosuhdetietoja, pohjamaatietoa, vuosittaista pakkasmäärää, taipumatietoja pudotuspainolaitemittauksesta ja toimenpidehistoriatietoja. Lähtöhypoteesien mukaan selitettävät kuntomuuttujat ovat : harjanteen korkeus ajourien välissä, pituussuuntaiset halkeamat ja pituussuuntainen epätasaisuus.

Otosta täydennettiin PTM-mittauksilla, videokuvauksella ja maaperäkartoilla. Lisämuuttujien keräämisellä oli tavoitteena parantaa kunnan ennustemallien käyttökelpoisuutta. Otoksen valintaa rajoitti maaperäkartojen saatavuus. Etelä-Suomen alueelta on maaperäkartoja saatavissa hyvin. Sen sijaan Pohjois-Suomen alueelta niitä on saatavissa huonosti. Otokseen valittiin tiet Porin, Kokkolan ja Kuusamon alueilta. Osasta kohteita maaperä jouduttiin määrittämään peruskartasta. PTM-mittauksen yhteydessä kohteet videokuvattiin luiskan kaltevuuden ja kuivatuksen toimivuuden määrittämiseksi. M-

deokuvaus ei ole vielä riittävän tarkka menetelmä luiskan kaltevuuden ja kuivatusolosuhteiden määrittämiseksi.

Aikasarjojen puutteen takia IRI:n, harjanteen ja poikkisuuntaisen epätasaisuuden lasketut kasvunopeudet ovat epäluotettavia. Alkuarvo on jouduttu pitämään vakiona. Jatkossa on käytössä myös aikasarja-aineistoa, josta voidaan luotettavammin laskea kuntomuuttujien kasvunopeus.

Aineiston kuntoa selittävät muuttujat on kerätty pääosin verkkotason tarpeita varten eikä tutkimus- ja mallinnuskäyttöön. Pudotuspainolaitemittaukset on tehty keskimäärin yksi piste 500 m välein. Analysoinnissa otettiin mukaan vain ne 100 m kohteet, joista oli olemassa PPL-mittaustieto, kun kunnan selittäjänä käytettiin jotain taipumatietoa. Osavaiheessa III mitattiin 50 km otos pudotuspainolaitteella 50 m välein.

Lisämuuttujien määrittämisessä ongelmaksi tuli aineiston epätasapaino. Pohjamaatyypeistä enemmistö oli moreenia, luiskan kaltevuusluokka oli loiva suurimmassa osassa aineistoa ja lähes kaikki kohteet tulkittiin hyväksi kuivatukseksi. Pakkassumma toimii epäloogisesti aineistossa. PAB-teiden kunto muuttuu hitaammin Kuusamon alueella kuin muualla. Syynä on mm. vallitseva mitoituskäytäntö ja rakentamisen aikaiset laatuvaatimukset.

Tarkasteltaessa yhtä kuntomuuttujaa ja selittävää muuttujaa kerrallaan, ei ole havaittavista voimakasta riippuvuutta selitettävien ja selittävien muuttujien välillä. PAB-teillä SCI450 ja päällysteen leveys selittävät parhaiten IRI:n, harjanteen korkeuden ja poikittaisen epätasaisuuden muutosta. Epätasainen routanousu aiheuttaa tien tasaisuuden muuttumista. Analysoinnissa ei löydetty yhteyttä routanousua selittävien muuttujien ja tien kunnan muuttumisen välillä. Tässä aineistossa on kuitenkin liian vähän taipumamittauksia hypoteesien testaamiseksi luotettavasti. PAB-teillä pituushalkeamien ja vauriosumman kasvunopeutta ei pystytty selittämään tällä aineistolla. Kaikkien selittäjäkombinaatioiden selitysasteet olivat alhaiset. Ohutpäällysteisillä AB-teillä ei löydetty selviä yhteyksiä käytettyjen x-muuttujien ja selitettävien muuttujien välillä tällä aineistolla. Ohutpäällysteisten AB-teiden aineisto on puolet pienempi kuin PAB-teiden aineisto tässä tutkimuksessa. Ohutpäällysteisillä AB-teillä käyttökelpoisten ennustemallien kehittämistä vaikeuttaa vuosittaisen kunnan muuttumisen ja mittaustarkkuuden välinen epäedullinen vuorosuhde. Kunnan vuosittainen muutos voi olla pienempi kuin käytettävä mittaustarkkuus.

3 HAVAITOTIEOTOKSEN VALINTA

3.1 Otoksen valinta osavaiheessa II

Osavaiheessa II valittiin aluksi noin 600 km havaintotieaineisto. Yksityiskohtaisesti havaintotieotoksen valinta osavaiheessa II on esitetty raportissa ”Kevytpäällysteisten tierakenteiden projekti, havaintotie-aineiston kokoaminen ja analysointi”. Raportissa on selostettu myös kuntotietoaineiston täydentäminen hankkimalla kunnan kehittymistä selittäviä lisämuuttujia. [Spoof et al., 2000a]

Yhden kohteen pituus on kuntorekisterissä 100 m, joten kohteiden lukumäärä on noin 6000 kpl. Kohteiden valitsemiseksi kuntotietoaineistosta luotiin koesuunnittelumatriisi. Tavoitteena oli täyttää matriisi mahdollisimman laajasti ja tasaisesti eri osissa. Kohteiden esivalinnassa pyrittiin mahdollisimman kattavaan otokseen ilmastollisesti (pakkasmäärä), geoteknisesti (pohjamaa) ja tien ominaisuuksien perusteella (tien leveys, päällystetyyppi, päällysteen ikä, liikennemäärä).

Kohteet valittiin ilmastoalueen ja päällystetyypin mukaan seuraavasti :

- Etelä-Suomi, ohut AB-tiet, 900 kpl
- Etelä-Suomi, PAB-tiet, 1700 kpl
- Väli-Suomi, ohut AB-tiet, 700 kpl
- Väli-Suomi, PAB-tiet, 1400 kpl
- Pohjois-Suomi, PAB-tiet, 1400 kpl

Tälle aineistolle tehtiin syys-lokakuussa 1999 VTT:n PTM-autolla tasaisuuden ja uraisuuden mittaus ja samassa yhteydessä digitaalinen videokuvauk. Seuraavaksi havaintotieaineiston lajittelua jatkettiin siten, että jokaiselle 100 metrin kohteelle pitää olla tieto pohjamaasta, luiskan kaltevuudesta, liikennemäärästä ja vaurioitumishistoria. Näillä ehdoilla havaintotieaineisto supistui yhteen neljännekseen (150 km). Samassa yhteydessä pyrittiin videotulkinnalla selvittämään kohteiden kuivatusolosuhteita. Tämä osottautui kuitenkin vaikeaksi, eikä tietoa voitu hyödyntää analysoinnissa.

Liitteessä 1 on esitetty koesuunnittelumatriisi. Tummennetut solut ilmaisevat sen, missä soluissa havaintotieaineistossa on yksi tai useampi kohde. Matriisin täyttäminen kauttaaltaan ei ole mahdollista, koska esimerkiksi tien leveys ja liikennemäärä ovat riippuvaisia toisistaan. [Spoof et al., 2000a]

Taulukoissa 3.1 ja 3.2 on esitetty, kuinka suuri osa koesuunnittelumatriisin soluista on täytetty tietyssä osaa matriisia. Matriisin täyttymistä on tarkasteltu liikennemäärän, tien leveyden ja pohjamaan tyyppien suhteen.

Taulukko 3.1. Solujen täyttyminen koesuunnittelumatriisissa KVL:n ja tien leveyden suhteen.

Alue	Päällystetyyppi	KVL pieni	KVL suuri	Leveys pieni	Leveys suuri
Etelä-S	PAB	14 / 24	16 / 24	21 / 24	24 / 24
	ohut AB	12 / 24	9 / 24	14 / 24	7 / 24
Väli-S	PAB	9 / 24	9 / 24	8 / 24	10 / 24
	ohut AB	10 / 24	7 / 24	4 / 24	13 / 24
Pohjois-S	PAB	11 / 24	11 / 24	7 / 24	15 / 24

Taulukko 3.2. Solujen täyttyminen koesuunnittelumatriisissa pohjamaan tyyppin suhteen.

Alue	Päällystetyyppi	Hiekka – Sr - Kallio	Moreeni	Turve - savi - siltti
Etelä-S	PAB	10 / 16	10 / 16	10 / 16
	ohut AB	4 / 16	8 / 16	9 / 16
Väli-S	PAB	7 / 16	8 / 16	3 / 16
	ohut AB	7 / 16	9 / 16	1 / 16
Pohjois-S	PAB	7 / 16	10 / 16	5 / 16

Taulukoissa 3.3 ja 3.4 on esitetty raja-arvot, joiden mukaan otosaineisto on jaettu matriisiin soluihin.

Taulukko 3.3. Aineiston ryhmittely PAB-teillä.

	Matala	Korkea
KVL	Alle 600	Yli 600
Tien leveys	Alle 6,5 m	Yli 6,5 m
Ilmastoalue	Etelä	Pohjoinen
Vauriosumma	Alle 20 m ²	Yli 20 m ²
Luisikan kaltevuus	1/3	1/2
Pohjamaa	Hk, Sr	Mr Tv, Sa, Si

Taulukko 3.4. Aineiston ryhmittely ohutpäällysteisillä AB-teillä.

	Matala	Korkea	
KVL	Alle 1300	Yli 1300	
Tien leveys	Alle 8 m	Yli 8 m	
Ilmastoalue	Etelä	Pohjoinen	
Vauriosumma	Alle 20 m ²	Yli 20 m ²	
Luisikan kaltevuus	1/3	1/2	
Pohjamaa	Hk, Sr	Mr	Tv, Sa, Si

3.2 Otoksen valinta tässä osavaiheessa (IV)

Havaintotieaineistoa analysoitaessa osavaiheessa II todettiin, että kuntorekisteriaineisto ei ole kerätty tutkimustarkoituksessa ja se sisältää merkittäviä puutteita kunnan ennustemallien kehittämiseksi pelkän kuntorekisteriaineiston avulla. [Spoof et al., 2000a]

Tässä osavaiheessa (IV) päädyttiin hankkimaan 50 km aineisto, joka sisältää 500 kpl 100 metrin kohdetta. Aineiston kokoa rajoitti lisämittausten aiheuttamat kustannukset. Tehtävät lisämittaukset on oltava myös sellaisia, että ne voidaan tehdä tieverkkotasolla kohtuullisin kustannuksin. Valituille kohteille suoritettiin taipumamittaukset pudotuspainolaitteella 50 metrin välein, päällysteen ja rakennekerrosten paksuudet jatkuvana maatutkamittauksena. Kohteille tehtiin lisäksi vuosittaiset tasaisuus- ja uraisuusmittaukset sekä vaurioinventointi.

Kohteet valittiin osavaiheen II aineistosta siten, että koesuunnittelumatriisin jokaisesta solusta tulee kohteita valituksi ja kohteiden määrä per solu on samaa suuruusluokkaa. Keskimäärin jokaisesta solusta aineistoon valittiin viisi kohdetta eli 500 tiemetriä. Käytännön syistä kohteet pyrittiin valitsemaan siten, että samalta tieltä/tieosalta valitaan mahdollisimman monta kohdetta. Taulukossa 3.5 on luettelo kohteiden osoitetiedoista ja kohteiden alkupiste ja loppupiste.

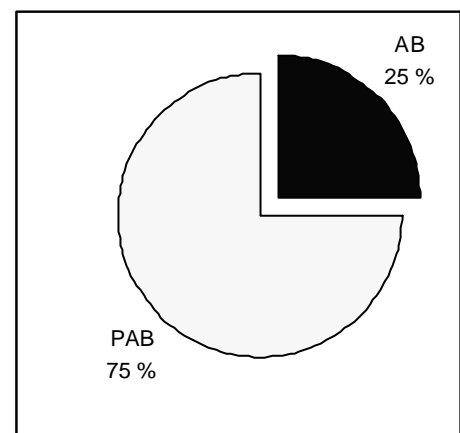
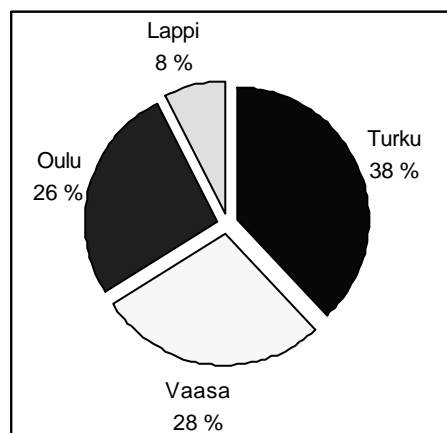
Taulukko 3.5. Kohteiden tierekisteriosoitteet.

Tiepiiri	Tie	Tieosa	Alkupiste	Loppupiste	Pituus
Turku	43	6	1200	2000	800
Turku	196	4	3800	5200	1400
Turku	210	2	2300	2800	500
Turku	1960	1	300	3100	2800
Turku	1960	1	4400	4700	300
Turku	1960	2	500	1500	1000
Turku	1960	2	4400	5100	700
Turku	2172	1	0	2400	2400
Turku	2172	1	3100	3900	800
Turku	2172	1	5300	5800	500
Turku	2556	1	300	1000	700
Turku	2560	1	100	400	300
Turku	2560	1	2500	3000	500
Turku	12473	2	3200	5000	1800
Turku	12691	2	3800	4700	900
Turku	12691	3	0	900	900
Turku	12779	1	0	800	800
Turku	12779	2	0	1800	1800
Turku	13003	1	1000	1500	500
Turku	13165	1	2200	3200	1000
Vaasa	28	9	1500	2100	600
Vaasa	750	1	200	1700	1500
Vaasa	775	1	2500	3100	600
Vaasa	775	1	4900	6400	1500
Vaasa	775	7	3200	5100	1900
Vaasa	775	8	0	800	800
Vaasa	775	8	1600	2000	400
Vaasa	775	8	2900	3200	300
Vaasa	775	8	5500	6100	600
Vaasa	7714	1	1700	2100	400
Vaasa	17975	1	100	900	800
Vaasa	17975	1	3000	4100	1100
Vaasa	17987	1	900	1600	700
Vaasa	17988	1	100	600	500
Vaasa	18037	2	0	1900	1900
Oulu	5	354	1100	2600	1500
Oulu	8420	1	0	1000	1000
Oulu	8690	1	3000	5000	2000
Oulu	8690	2	0	1000	1000
Oulu	8690	2	2000	3600	1600
Oulu	18858	1	2400	3400	1000
Oulu	18858	2	1000	2800	1800
Oulu	18864	1	3000	3500	500
Oulu	18864	1	4500	6000	1500
Oulu	18865	1	1000	2000	1000
Lappi	81	25	1000	1500	500
Lappi	863	15	1200	2500	1300
Lappi	863	15	5700	7600	1900

Taulukossa 3.6 on esitetty kohteiden jakautuminen piireittäin. Yhteensä kohteita on 506 kappaletta eli noin 50 kilometriä. Maantieteellisesti kohteet on valittu siten, että kaksi kolmasosaa on Etelä- ja Keski-Suomen alueelta ja yksi kolmasosa on Pohjois-Suomesta. Päällystetyypeittäin aineistosta yksi neljäsosa on ohutpäällysteisiä AB-teitä ja kolme neljäsosaa on PAB-teitä. Kuvassa 3.1 on esitetty piirakkadiagrammeina aineiston jakautuminen tiepiireittäin ja päällystetyypeittäin.

Taulukko 3.6. Kohteiden jakauma tiepiireittäin.

Tiepiiri	ohut AB	PAB	Yhteensä
Turku	68	136	186
Vaasa	58	78	136
Oulu	-	129	129
Lappi	-	37	37
Summa	126	380	506



Kuva 3.1. Tutkimuskohteiden jakautuminen tiepiireittäin ja päällystetyypeittäin.

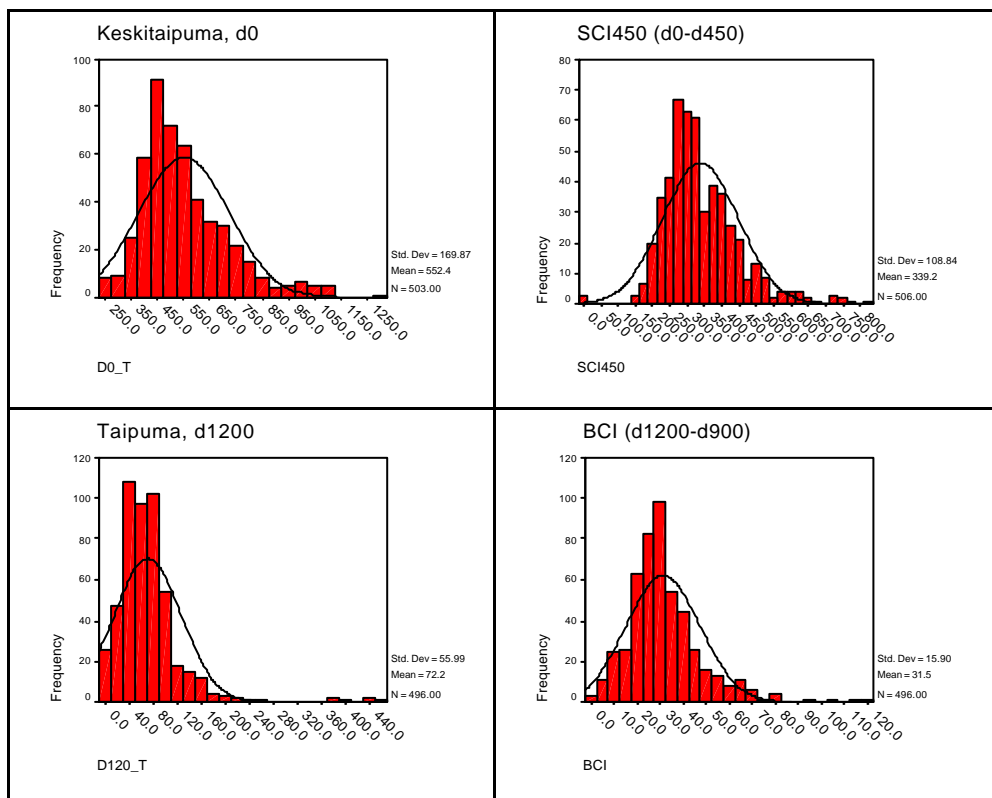
4 HAVAINTOTIEAINEISTON TÄYDENTÄMINEN

Havaintoaineiston kuvaus on esitetty koko aineiston osalta osavaiheen II raportissa. Tässä luvussa esitetään aineiston kuvaus niiltä osin kuin aineisto poikkeaa osavaiheiden II ja IV välillä. Aineiston muuttujien jakaumien kuvaus on esitetty liitteessä 2 päällysteen iän, pakkasmäärän, KVL:n, kuormituskertaluvin, tien leveyden, päällysteen leveyden ja pohjamaatyypin osalta. Näiden muuttujien osalta aineisto on sama osavaiheissa II ja IV. [Spoof et al., 2000a]

4.1 Pudotuspainolaitemittaukset

Kuntotietorekisterissä on keskimäärin joka viidennellä 100 metrin osuudella taipumatieto pudotuspainolaitemittauksesta. 500 metrin välein kerättävä tieto on tilastollisten mallien kannalta liian puutteellista. Tämän takia mitattiin 50 km otos 50 m välein, jolloin jokaiselta 100 metrin jaksolta mitattiin kaksi pistettä. Mittaukset teki Tielaitos elo-syyskuussa 2000.

Jokaisesta mittauspisteestä mitataan taipumat 0, 200, 300, 450, 600, 900 ja 1200 mm etäisyydeltä kuormituslevyn keskeltä sekä päällysteen lämpötila ja voima. Taipumat ovat lämpötilakorjattu Tiehallinnon kuntorekisterin (Kurre) lämpötilakorjauskaavoilla vastaamaan +20°C lämpötilaa [Spoof et al. 2000b].



Kuva 4.1. Kohteiden taipumamittaustietojen jakaumat.

Kuvassa 4.1 on esitetty koko aineiston (506 kohdetta) jakaumat. Keskitäipuman, d_0 keskiarvo on 552 μm ja hajonta on 170 μm . Taipuman d_{1200} keskiarvo on 72 μm ja hajonta on 56 μm .

4.2 Maatutkamittaukset

Kuntotietorekisterissä on hyvin vähän kohteita, joista on tieto päällysteen ja sitomattomien kerrosten paksuuksista. Tämän tutkimuksen teistä ainoastaan Maantieltä 863 oli paksuustietoa tiedossa. VTT Yhdyskuntatekniikka mittasi kohteet maatutkalla elo-syyskuussa 2000.

Maatutkaus soveltuu olemassa olevan tierakenteen rakennekerrosrajojen määrittämiseen. Maatutkaus on nopea ja taloudellinen tapa hankkia jatkuva pituusprofiili tierakenteesta. Käyttämällä eri taajuisia antennejä voidaan luotaussyvyyteen ja -tarkkuuteen vaikuttaa. Kerrosrajojen tulkinnan tarkkuus riippuu referenssiaineiston määrästä ja laadusta. Tulkinnassa tarvittavat päällysteen ja kantavan kerroksen todelliset dielektrisyysvakiot lasketaan referenssitietojen perusteella. Muiden kerrosten dielektrisyysvakiot voidaan mitata esimerkiksi dielektrisyysmittarilla, maatutkakairauksella tai määrittää maatutkatuloksista referenssiaineiston avulla.

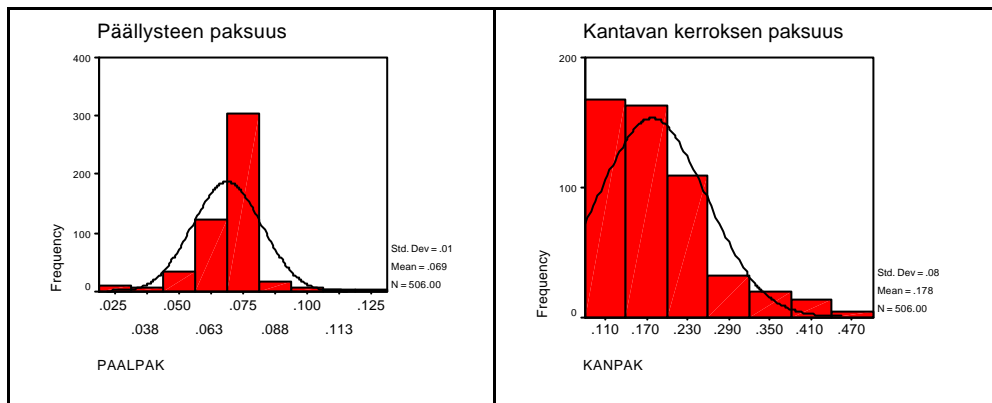
Tierakenteen tutkimiseen käytetään ensisijaisesti jatkuvaa maatutkaluotausta, jolloin vastaanotettu signaali voidaan tulostaa jatkuvana profiilina. Kun tunnetaan aallon nopeus, voidaan heijastusten aikaerosta laskea aallon kulkema matka ja edelleen määrittää eri kerrosten rajapinnat. Tämän laskennan ja tulkinnan laadun takaamiseksi tarvitaan myös pistemäistä referenssitietoa, jonka avulla rajapinnat voidaan tarkistaa. Jatkuvalla maatutkaluotauksella voidaan luoda pitkän, yhtenäisen mittaustuloksen pituusprofiili. Jatkuva maatutkaus voidaan tehdä myös tien poikkisuuntaan, jolloin voidaan selvittää poikkisuuntaista rakennekerrospaksuuksien vaihtelua mm. painuneen tierakenteen muotoa tai tierakenteen paksuutta sivukaltevassa maastossa.

Jatkuvaa luotausta tehtäessä tutkaa kuljetetaan auton perässä tai puomirakenteen avulla auton edessä. Mittausten poikkisuuntainen sijainti on kohdekohtaista ja riippuu mittausten tavoitteesta. Kun halutaan selvittää päällysrakenteiden kokonaispaksuudet, mittaus kannattaa suorittaa urien välialueelta. Jos taas ollaan kiinnostuneita päällysrakenteen jäljellä olevasta paksuudesta tai rakennekerrosten kunnosta, mittaukset on syytä sijoittaa mahdollisimman tarkasti ajouriin.

Tutka-aallon pituus ja tunkeutumissyvyys määrittävät eri antennien käyttöalueen. Yhdellä antennilla ei voida riittävällä tarkkuudella mitata koko tierakennetta. Maatutkaus on aina tarpeen suorittaa vähintään kahdella antennilla. Korkeataajuisilla antennilla (1 – 2,5 GHz) mitataan tien pintarakennetta eli päällysteen ja kantavan kerroksen paksuutta. Matalamman taaju-

den omaavilla antennilla (100 – 500 MHz) mitataan tien alempia rakennekerroksia ja alusrakennetta sekä vaurioiden syytä. [Korkiala-Tanttu, 2001]

Kuvassa 4.2 on esitetty koko aineiston (506 kohdetta) jakaumat. Aineistossa päällysteen paksuuden keskiarvo on 69 mm ja keskihajonta on 10 mm. Yli puolella kohteista päällysteen paksuus on välillä 70 – 80 mm mikä vastaa kahta päällystekerrosta.



Kuva 4.2. Päällysteen ja kantavan kerroksen paksuuksien jakaumat.

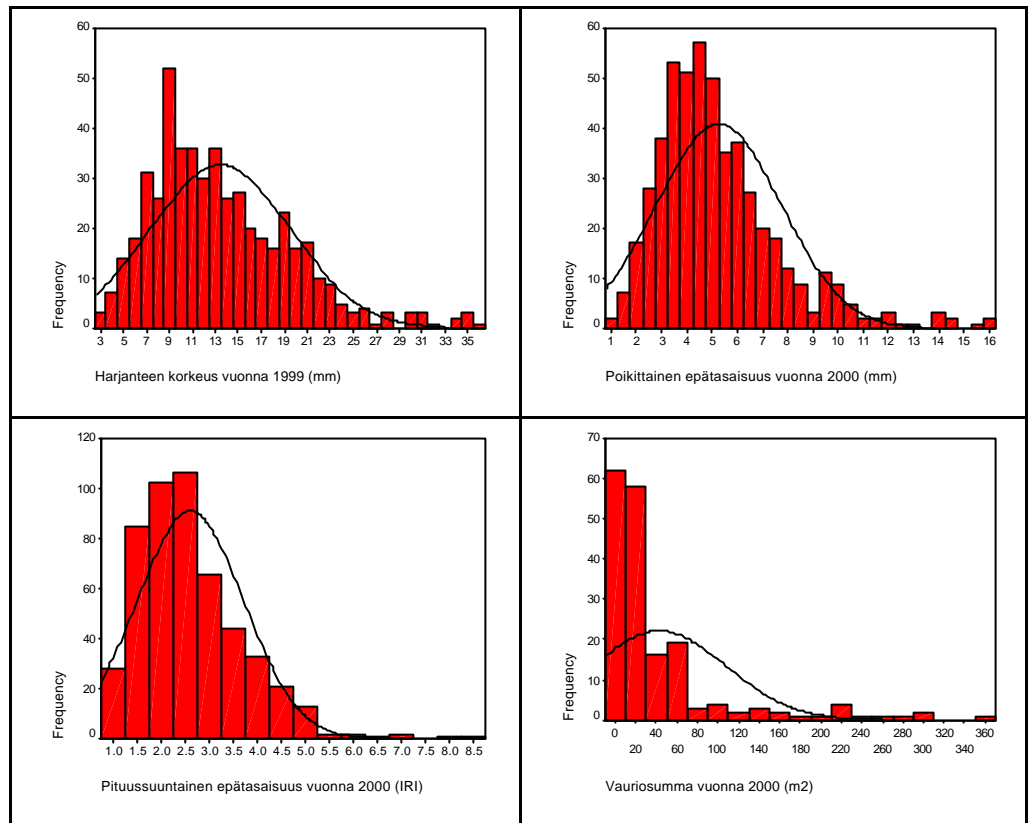
Kantavan kerroksen paksuuden keskiarvo on 178 mm ja hajonta on 80 mm. Kantavan kerroksen paksuus vähäliikenteisillä teillä on 100 – 150 mm päällysrakenneluokasta riippuen. Mittausten perusteella tutkittujen rakenteiden kantavan kerroksen paksuudet on hieman normeja suuremmat.

4.3 Vaurioinventointi ja PTM-mittaus

Tutkimuskohteet vaurioinventoitiin keväällä 2000 osana Tiehallinnon vuosittaisista PVI-ohjelmaa. Jokainen tie lukuunottamatta kaikkein vilkkaiten liikennöityjä teitä vaurioinventoidaan keskimäärin kolmen vuoden välein. Mitä enemmän kohteelta vaurioinventointikertoja käytettävissä, sitä paremmin voidaan kohteen vaurioitumisnopeutta mallintaa.

Pituussuuntaista epätasaisuutta mitataan IRI-arvona. Kohteet on mitattu pituussuuntaisen tasaisuuden osalta vuosittain ja PTM-mittauksista on olemassa hyvät aikasarjat.

Harjanteen korkeustietoa ei ole tallennettu Tiehallinnon kuntorekisteriin. Tutkimusaineisto perustuu VTT Yhdyskuntatekniikan suorittamiin PTM-mittauksiin vuonna 1999.



Kuva 4.3. Harjanteen korkeuden, poikkisuuntaisen epätasaisuuden, pituussuuntaisen epätasaisuuden ja vauriosumman jakaumat.

Kuvassa 4.3 on esitetty koko aineiston (noin 500 kohdetta) jakaumat. Harjanteen korkeuden keskiarvo on 13,0 mm ja keskihajonta on 6,1 mm. Harjanteen korkeuden jakauma noudattaa hyvin normaalijakaumaa. Lähes koko aineisto on jakautunut välille 5 – 25 mm. Harjanteen korkeudelle ei ole olemassa tienpidon ohjausjärjestelmissä toimenpiderajaa. Sen voidaan arvioida olevan 20 - 25 mm.

Poikittainen epätasaisuus, PETA kuvaa samaa asiaa kuin harjanteen korkeus, mutta lasketaan PTM-mittausdatasta eri algoritmilla kuin harjanteen korkeus. Tässä aineistossa PETAn keskiarvo on 5,0 mm. Myöskään PETAlle ei ole määritetty toimenpiderajaa tienpidon ohjausjärjestelmissä.

Pituussuuntaisen epätasaisuuden, IRIn keskiarvo on 2,6 mm/m ja hajonta on 1,1 mm/m. Liikennemääräluokassa 350 - 1500 keskimääräinen tasaisuus on noin 2,2 mm/m, joten tämä aineisto ei juurikaan poikkea tämän liikennemääräluokan koko Suomen tiestöstä. Liikennemääräluokan toimenpideraja on 4,1 mm/m PMSpro-järjestelmässä.

Vauriosumman jakaumasta voidaan todeta, että jakauma on kovin huipukas ja vino. Vauriosumma on alle 20 suurimmassa osassa kohteita ja ainoastaan muutamissa kohteissa vauriosumman arvo ylittää 60. Koska muutamit kohteet ovat erittäin vaurioituneita nousee aineiston keskiarvo kuitenkin jopa 43 m²:n.

5 AINEISTON ANALYSOINTIVAIHEET

Analysoinnin tavoitteena oli kehittää kevytpäällysteisten teiden kunnan kehittymistä ennustavat mallit. Mallien primäärinä tavoitteena on palvella tieverkkotason kunnan kehittymisen ennusteita. Lisäksi mallien avulla pyrittiin antamaan tukea osavaiheessa V kehitettävälle mitoitusmenetelmälle. Mallinnus suoritettiin erikseen tien pituussuuntaiselle ja poikittaiselle epätasaisuudelle sekä päällystehalkeamille. Tämän tarkastelun yhteydessä selvitettiin rappeutumista selittävät muuttujat sekä tarkasteltiin muuttujien välisiä yhteyksiä rappeutumisen kasvunopeuksien kanssa. Havaintotieaineiston tilastollinen analyysi suoritettiin SAS- ja SPSS-ohjelmistoilla.

5.1 Analysointivaihe I

Analysoinnissa käytettiin ns. 50 km:n aineistoa, josta oli käytävissä Tiehallinnon kuntorekisteritietojen (KURRE) lisäksi projektin aikaisempien osavaiheiden mittaustietoja, kuten esimerkiksi tarkempi PPL-mittaus sekä maatumkaus. Kuntorekisterissä on mittaustietohistoriaa pituussuuntaiselle epätasaisuudelle (IRI), poikittaiselle epätasaisuudelle (PETA) sekä päällystevaurioille (VS). Harjanteen kasvunopeutta ei ole taltioitu kuntorekisteriin, joten siitä oli käytössä ainoastaan yksi, VTT:n vuonna 1999 suorittama, mittaushavainto.

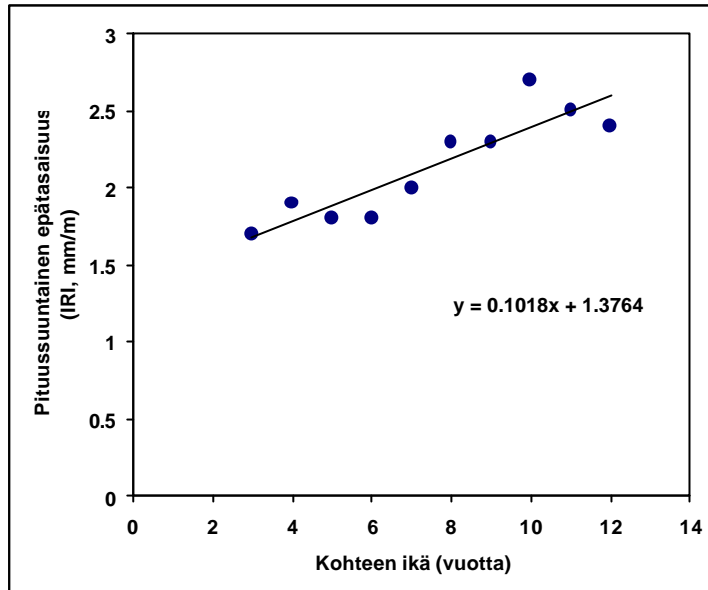
Mittaushistorian perusteella muodostettiin kaikille kohteille pituussuuntaiselle epätasaisuudelle (IRI), poikittaiselle epätasaisuudelle (PETA) sekä päällystevaurioille (VS) aikasarja kunnankehittämiseksi ja päällysteen iälle. Päällysteen ikä määritettiin edellisestä päällystystoimenpiteestä. Lineaarisen mallin kulmakerroin a (kaava 5.1) kuvaa kohteen rappeutumisen nopeutta. Rappeutumisen nopeuden määrittämisestä on esimerkki kuvassa 5.1.

$$K = a * \text{ikä} + b, \quad (5.1)$$

missä	K	= kuntotila (IRI, PETA tai VS)
	ikä	= kohteen ikä
	a, b	= regressioparametreja

Aikasarjalle asetettiin seuraavat minimikriteerit, jotta kohde hyväksyttäisiin osaksi varsinaista mallinnusta:

- Vähintään kolme havaintoa per aikasarja.
- Aikasarjan kulmakertoimen on oltava positiivinen (rappeutumisasteen arvon kasvettava ajassa).
- Yksittäiset poikkeavat havainnot on poistettu.



Kuva 5.1. Esimerkki IRI:n kehittymisen aikasarjasta (kohde 4), jossa kohteen IRI:n kasvunopeus on 0,10 mm/m vuodessa.

Harjanteen kasvunopeus määritettiin yhden mittaushavainnon ja harjanteen lähtöarvon (3 mm) perusteella kaavan 5.2 mukaan. Esimerkki määrittämisestä on esitetty kuvassa 5.2

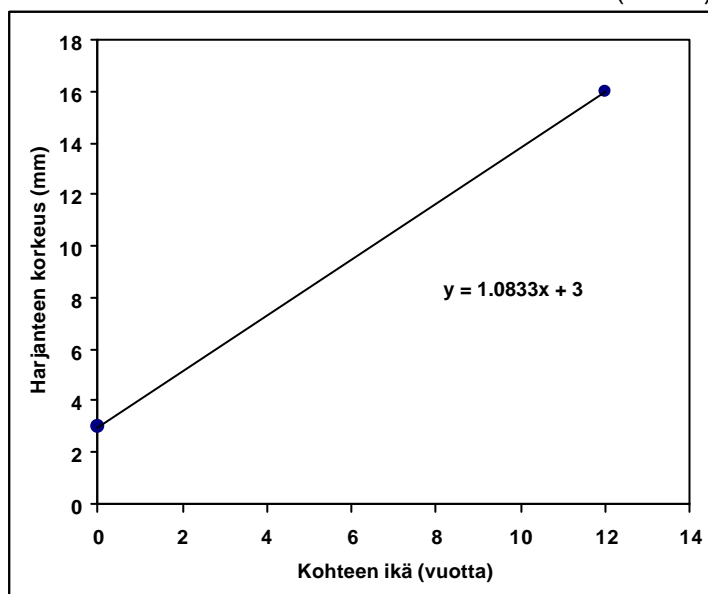
$$HN = (\text{har99} - 3) / \text{ikä99}, \quad (5.2)$$

missä

HN = harjanteennopeus

har99 = harjanteen korkeus vuonna 1999 (mm)

ikä99 = kohteen ikä vuonna 1999 (vuotta)



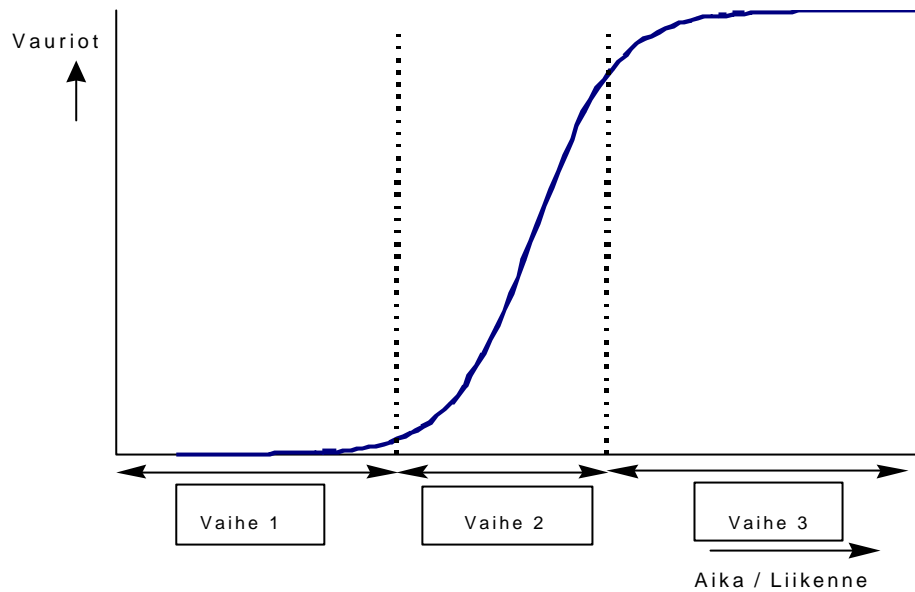
Kuva 5.2. Esimerkki harjanteen kasvunopeuden määrittämisestä (kohde 798) jossa kohteen harjanteen kasvunopeus on 1,08 mm vuodessa.

Eri kuntomuuttujille pyrittiin ensisijaisesti kehittämään kunnan kehittymistä ennustavat mallit, joissa edellä määritetyn vaurioitumisnopeuden selittäjinä käytetään tien rakenteellisia ominaisuuksia sekä tiehen kohdistuvia kuormitustekijöitä (liikenne ja ilmasto). Aineistoa luokiteltiin myös tarvittaessa esimerkiksi ilmaston, päällystetyypin, liikennemäärän tai rakenteellisten muutujien perusteella. Tämän tyyppinen malli soveltuu sekä rakenteen suunnitteluvaiheessa tehtävään kunnan kehittymisen arviointiin (hanketaso) että olemassa olevan tien kunnan kehittymisen ennustamiseen (verkkotaso).

5.2 Analysointivaihe II

Koska vaiheen I analyysi tuotti rakenteellisilla selittäjillä kunnan kehittymismallin ainoastaan harjanteen kasvunopeudelle (tästä tarkemmin luvussa 6) muutettiin mallinnusmenetelmää pituussuuntaiselle epätasaisuudelle (IRI), poikittaiselle epätasaisuudelle (PETA) sekä päällystevaurioille (VS). Uuden vaihtoehdoisen mallinnusmenetelmän tavoitteena oli kehittää mallit kunnan kehittymiselle olemassa oleville tiekohteille, joilla vaurioituminen oli alkanut (koskee lähinnä vauriosummaa). Periaatteena on, että tiekohteen tulevaa kunnan kehittymistä ennustetaan tien sen hetkiselällä kuntotilalla, eli kohteen tulevaa kunnan kehittymistä selitetään mittaushetken kuntotilalla [European Commission, 1999]. Aineistoa luokiteltiin myös tarvittaessa esimerkiksi Ilmaston, päällystetyypin, liikennemäärän tai päällysteen leveyden perusteella. Koska tässä mallinnusmenetelmässä ei käytetä rakenteellisia muutujia selittäjinä, voitiin analyysissä käyttää osavaiheessa II kerättyä ns. 600 km:n aineistoa.

Mallintamismenetelmän lähtökohta on selittää rappeutumismuuttujan funktionaalinen muoto ja mikäli se ei ole lineaarinen se pyritään transformoimaan sellaiseksi. Vaikka rappeutumisen kehittyminen koko elinkaaren aikana ei noudattaisikaan lineaarista muotoa, ei se sinänsä ole mikään ongelma esitetylle mallinnusmenetelmälle, koska ennustemalleilla pyritään ainoastaan ennustamaan tulevaa käyttäytymistä eikä mennyttä kehityshistoriaa. Malleja ei myöskään voi käyttää tiekohteen rappeutumisasteen lähtöarvon määrittämiseen. Sen sijaan tärkeää on, että rappeutumiskehitys noudattaa mahdollisimman hyvin lineaarista muotoa sillä alueella, jolla ennuste pyritään tekemään. Tästä esimerkkinä periaatekuva kuormituskestävyysvaurioitumisen vaiheista kuvassa 5.3.



Kuva 5.3. Kuormituskestävyysvaurioitumisprosessin vaiheet.

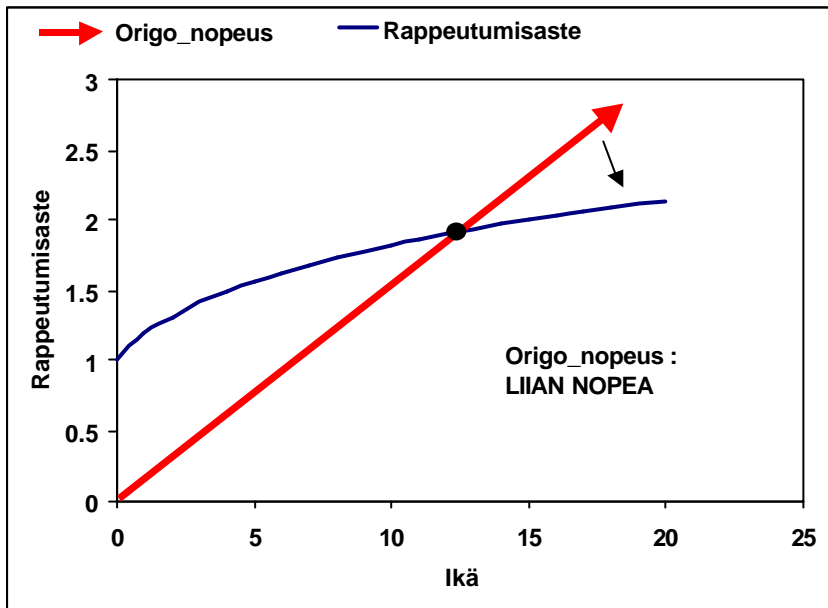
Kuormituskestävyysvaurioitumisprosessi sisältää seuraavat kolme vaihetta:

1. Vaurioitumaton vaihe (päätyy vaurioitumisen alkamiseen).
2. Vaurioitumisen kehitysvaihe (ehtona että vaurioituminen on alkanut).
3. Vaurioitumisen loppuvaihe, jossa vaurioituminen lähestyy maksimiarvoaan (ei yleensä esiinny tieverkolla).

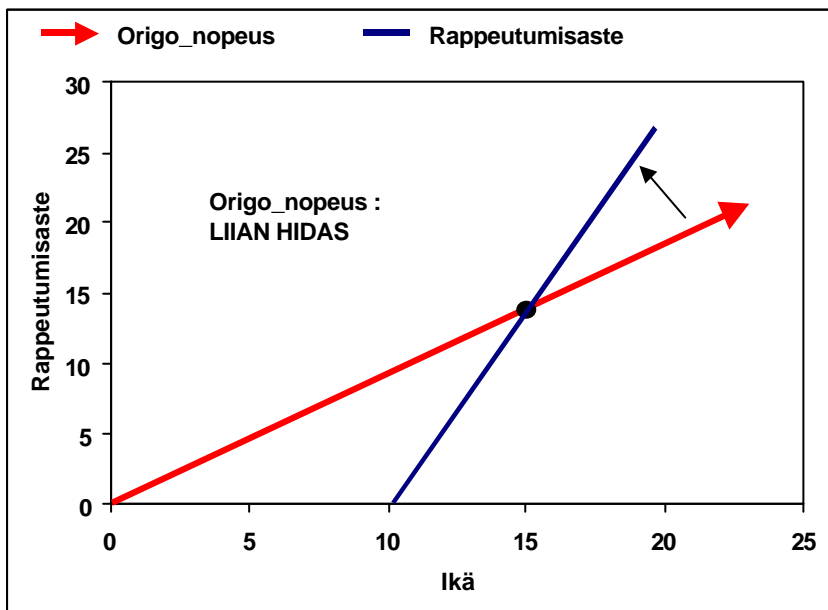
Vaurioitumisen kehittymisen ennustamisen kannalta kiinnostavinta on vaihe 2 ja sen noudattama funktionaalinen muoto. Eri yhteyksissä on voitu todeta, mm. koetiekoetulosten perusteella, vaurioitumisen noudattavan kohtuullisen hyvin lineaarista funktionaalista muotoa vaiheen kaksi aikana. Vastaavalla tavalla voidaan todeta lineaarinen vaihe muillakin rappeutumismuuttujilla.

Mikäli kohteen rappeutumisenopeus määritetään suoraan jakamalla toteutunut rappeutumistaso kohteen iällä saadaan tuloksena yleensä, joko liian nopea tai liian hidas nopeus. Näin määritettyä rappeutumisenopeutta kutsutaan tässä raportissa nimellä ”**origo_nopeus**”. Origo_nopeuden käyttämisen edellytyksenä tulevan rappeutumisen ennustamiseen on, että rappeutumisen lähtöarvo on nolla ja rappeutuminen kehittyy lineaarisesti ajassa. Useimmiten kuitenkin rappeutumisen lähtöarvo ei ole nolla ja/tai se ei noudata kehittymisen alkuvaiheessa lineaarista muotoa.

Esimerkiksi pituussuuntaisella ja poikittaisella epätasaisuudella on yleensä lähtöarvo, joka on isompi kuin nolla ja epälineaarinen jakso kehityksen alussa johtuen mm. alkutiivistymisestä (kuva 5.4). Käyttämällä origo_nopeutta ennustamiseen johtaa tässä tapauksessa liian nopeaan ennusteeseen. Päällystevaurioituminen taas alkaa yleensä aikaviiveellä, varsinkin kuormituskestävyysvaurioiden osalta, aiheuttaen vastaavasti liian hitaan ennusteen (kuva 5.5). Origo_nopeutta ei siis voi käyttää kuvaamaan kohteen tulevaa rappeutumiskehitystä.



Kuva 5.4. Periaatekuva liian nopeasta origo_nopeudesta.




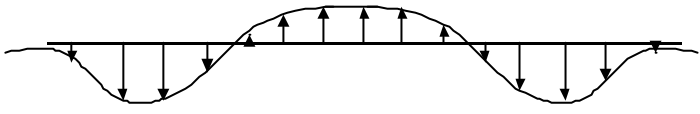
Kuva 5.5. Periaatekuva liian hitaasta origo_nopeudesta.

6 KUNNON ENNUSTEMALLIT

6.1 Mallinnettavat muuttujat

Mallinnuksen tavoitteena oli kehittää kevytpäällysteisten teiden kunnan kehittymistä ennustavat mallit. Mallien tavoitteena on palvella Tiehallinnon tieverkkotason järjestelmiä ennustettaessa kevytpäällysteisten teiden kunnan kehittymistä. Mallinnus suoritettiin erikseen tien pituussuuntaiselle ja poikittaiselle epätasaisuudelle sekä päällystehalkeamille. Taulukossa 6.1 on esitetty mallinnettavien kuntomuuttujien määritelmät. Tarkastelun yhteydessä selvitettiin rappeutumista selittävät muuttujat sekä tarkasteltiin muuttujien välisiä yhteyksiä rappeutumisen kasvunopeuksien kanssa.

Taulukko 6.1. Selitettävien muuttujien (y-muuttujat) määritelmät.

Kuntomuuttuja	Määritelmä
Harjanne	Ajourien välisen harjanteen korkeus, (mm). 
Pituussuntainen epätasaisuus	IRI "International Roughness Index", (mm/m).
Poikittainen epätasaisuus	Mittausantureiden lukemien poikkeamien (perustasosta) itseisarvojen keskiarvo, (mm). 
Vauriosumma	Tiehallinnon kuntorekisterin vauriosumma, (m ²). $VS = [0,3 * (\text{pituushalkeamat/kapeat}) + 1 * (\text{pituushalkeamat/leveät}) + 0,1 * (\text{saumahalkeamat/kapeat}) + 0,5 * (\text{saumahalkeamat/leveät}) + 2,5 * (\text{poikkihalkeamat/kapeat}) + 5 * (\text{poikkihalkeamat/leveät}) + 1 * (\text{verkkohalkeamat}) + 1 * (\text{reunapainumat}) + 1 * (\text{reiät}) + 1 * (\text{purkautumat})]$

Kaikille kuntomuuttujille määritettiin mahdollisuuksien mukaan kohdekohtaiset aikasarjat ja rappeutumisnopeudet (y-muuttujat), joita sitten pyrittiin selittämään kohteesta olevilla tiedoilla (x-muuttujat) ja aineistoa tarvittaessa luokittelemalla. Aikasarjojen ja rappeutumisnopeuksien määrittäminen ja käytettävät analysointimenetelmät on kuvattu luvussa 5.

6.2 Harjanteen korkeus, HAR

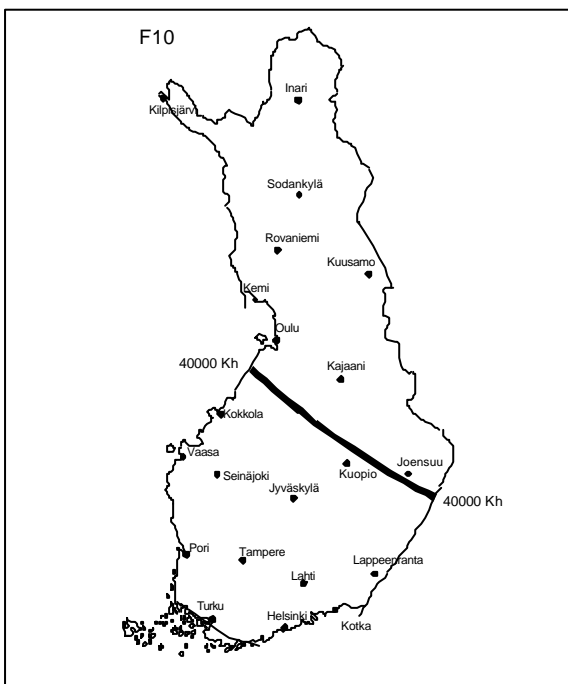
6.2.1 Yleistä

Tiehallinnon kuntorekisteri (Kurre) ei sisällä muuttujana harjanteen korkeutta. Tästä syystä kohteitten harjanteen nopeus määritettiin vuoden 1999 mittauksien ja harjanteen lähtöarvon (oletuksena 3 mm) välisen yhteyden avulla. Aineiston jakaumat harjanteen nopeudelle on esitetty luvussa 4.

Mallinnuksessa käytettiin selittäjinä kaikkia tietokannassa kohteesta olevia muuttujia kuten:

- Rakennetiedot (maatutkauksen avulla saadut päällysteen ja kantavan kerroksen paksuudet, tien leveys, luiskan kaltevuus, maalajitiedot sekä onko kohde rakennettu tai rakentamaton).
- Vastetiedot (kaikki PPL-mittausten taipuma-arvot ja tunnusluvut, kuten SCI300, SCI450 ja BCI).
- Liikenne-, ilmasto- sekä päällystetyyppitiedot.

Lineaarisen regression mallinnus suoritettiin SPSS tilasto-ohjelmalla, STEPWISE menetelmällä. Analysoinnissa päädyttiin parhaaseen lopputulokseen luokittelemalla aineisto päällystetyypin (ohut AB / PAB) ja ilmaston (etelä / pohjoinen) mukaan. Ilmastoluokkien raja-arvo on kerran 10 vuodessa toistuva pakkasmäärä $F_{10} = 40.000$ (Kh). Kuvassa 6.1 on esitetty käyrä, $F_{10} = 40.000$ (Kh), karttapohjassa.



Kuva 6.1. F_{10} -kartta ja 40000 Kh isotermi.

6.2.2 Harjanteen kasvunopeuden mallit

Etelä-Suomen aineistolla PAB-teiden osalta harjanteen nopeutta selitti parhaiten päällysteen leveys. Seuraavaksi parhaiten päällysteen leveyden kanssa selitysastetta paransi SCI450 ja lopuksi KVL. Muut muuttujat eivät enää merkittävästi parantaneet mallin selitysastetta.

Pohjois-Suomen PAB-teillä paras selittäjäkombinaatio harjanteen nopeudelle oli SCI450 ja päällysteen leveys. Pohjois-Suomen aineistolla KVL ei toiminut selittäjänä harjanteen nopeudelle, eikä johtanut loogisiin tuloksiin.

Etelä-Suomen ohutpäällysteisillä AB-teillä harjanteen nopeutta parhaiten selittävät muuttujat olivat samat kuin Etelä-Suomen PAB-teillä, mutta järjestys oli eri. Ohutpäällysteisillä AB-teillä paras selittäjä oli SCI450. Seuraavaksi tuli KVL ja lopuksi päällysteen leveys.

Mallinnusryhmän suuret odotukset maatutkamittausten tuottamien päällysteen- ja kantavan kerroksen paksuustietojen hyödynnettävyydestä kuntomuuttujien mallinnuksessa tuotti valitettavasti pettymyksen. Paksuustietojen selitysastetta parantava vaikutus jäi harjanteen malleissa parhaimmillaan noin 1%-yksikön tasolle. Jatkossa saatiin todeta vastaava ilmiö myös muidenkin kuntomuuttujien osalta. Projektin alussa esitettyyn kysymykseen koko tieverkon maatutkaamisen tuottamasta hyödystä kestoikämalleille on valitettavasti todettava, että käytettävissä olevan aineiston perusteella ei voitu todeta maatutkamittaustuloksista tulkittujen rakennekerrospaksuuksien selittävän tien rappeutumislmiöitä, eikä siten projektin tulosten perusteella voida suositella näin toimittavaksi. Aineistoa ei kuitenkaan ollut valittu maatutkamittausten arviointia varten, vaan kunnan kehittymismallien kehittämistä varten. Näin ollen esitettyä arviota maatutkamittausten tarpeellisuudesta ei tulisi yleistää eikä siitä tule vetää liian pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Asialle riittää varmasti vielä paljon tutkimustarvetta.

Seuraavassa on esitetty harjanteen kasvunopeutta ennustavat mallit kevytpäällysteisille teille (kaavat 6.1 – 6.3). Mallien tilastolliset tunnusluvut ovat kokonaisuudessaan esitetty liitteessä 3.

Etelä-Suomi, PAB-tiet (N = 210, R² = 0,42):

$$HN = 1,82 - 0,31 * PLEV + 0,0033 * SCI450 + 0,00053 * KVL, \quad (6.1)$$

Etelä-Suomi, ohut AB-tiet (N = 104, R² = 0,34):

$$HN = 3,03 - 0,46 * PLEV + 0,0019 * SCI450 + 0,00041 * KVL, \quad (6.2)$$

Pohjois-Suomi, PAB-tiet (N = 153, R² = 0,36):

$$HN = 0,56 - 0,17 * PLEV + 0,0045 * SCI450, \quad (6.3)$$

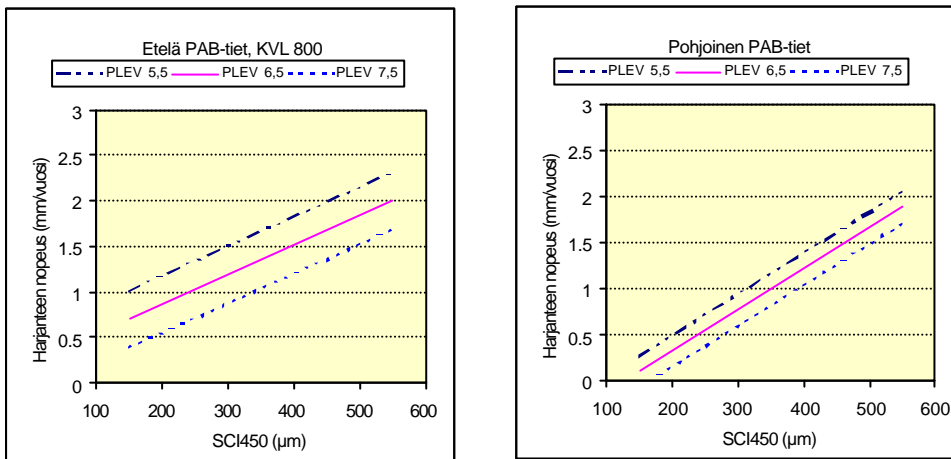
missä

HN = harjanteen kasvunopeus, mm/vuosi
 PLEV = päällysteen leveys, m

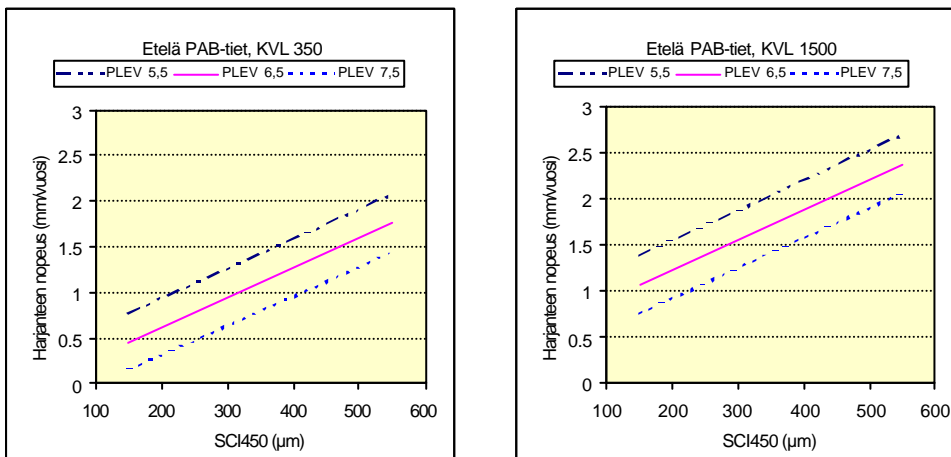
SCI450 = taipumaerotus, $d_0 - d_{450}$, μm
 KVL = tien keskimääräinen vuorokausiliikenne.

Kaikista kolmesta mallista voi todeta, että muuttujien kertoimilla on oikeat etumerkit, ne ovat loogisia ja noudattavat siten tietekniikan teorioita. Päällysteen leveyttä lisättäessä harjanteen kasvunopeus hidastuu, eli mitä leveämpi tie sitä hitaampi rappeutuminen. Jos vastaavasti taipumaerotus SCI450 kasvaa nopeutuu harjanteen kasvuvauhti, eli mitä heikompi tierakenne sitä suurempi rappeutumisenopeus. Ja lopuksi, jos samalla tiellä on isompi liikennemäärä tien harjanteen kasvunopeus myös kasvaa.

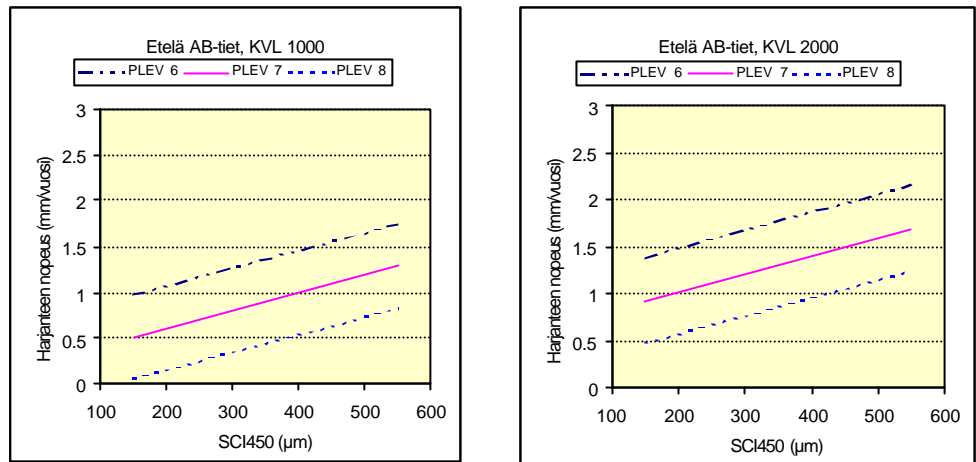
Mallien kuvaajat ovat esitetty kuvissa 6.2 – 6.4.



Kuva 6.2. Keskimääräinen liikenne PAB-teillä etelässä vs. pohjoinen.



Kuva 6.3. Etelän PAB-teillä matala vs. korkea liikenne.



Kuva 6.4. Etelän ohutpäällysteisillä AB-teillä matala vs. korkea liikenne.

Kuvista 6.2 – 6.4 voi todeta mm. seuraavaa:

- Jos PAB-tien leveys kasvaa metrillä pienenee harjanteen nopeus vuodessa noin 0,3 mm. Pohjoisessa muutos on hieman pienempi. Ohutpäällysteisillä AB-teillä vastaava muutos on noin 0.5 mm.
- Aineiston perusteella pohjoisessa harjanteen nopeus on noin 30% hitaampaa kuin vastaavalle tielle etelässä.
- Kun liikennemäärä kaksinkertaistuu PAB-teillä etelässä, niin harjanteen nopeus kasvaa noin 25%. Ohutpäällysteisillä AB-teillä vastaava liikennemäärän muutos johtaa noin 50% kasvuun harjanteen nopeudessa.
- PAB-teiden harjanteen kasvunopeus on noin 70% nopeampi kuin vastaavilla ohutpäällysteisillä AB-teillä.

6.3 Poikittainen epätasaisuus, PETA

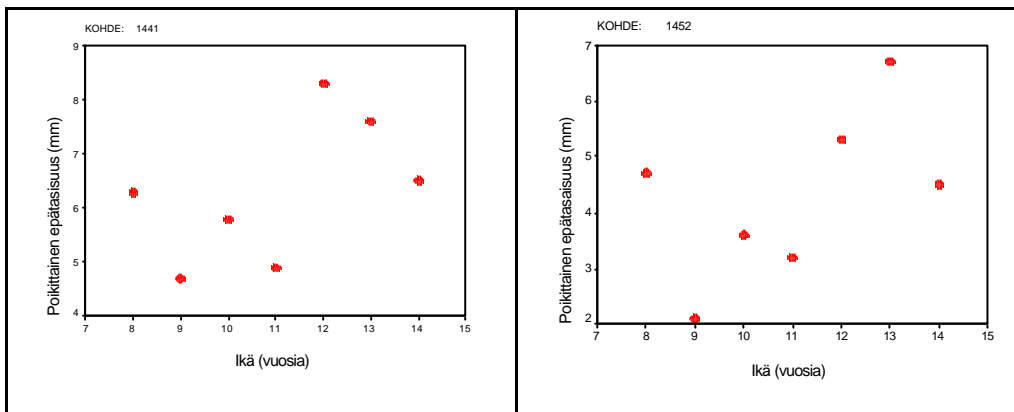
6.3.1 Yleistä

Poikittaisen epätasaisuuden (PETA) analysoinnin aluksi luotiin Tiehallinnon kuntorekisterin (Kurre) mittaushistoriasta kohteille aikasarjat kunnan kehittymiselle suhteessa päällysteen ikään. Päällysteen ikä määritettiin edellisestä päällystystoimenpiteestä. Poikittaisen epätasaisuuden kasvunopeutta kuvattiin lineaarisella mallilla aikaisemmin esitetyllä tavalla (kaava 5.1). Mallinnettavien aikasarjojen kriteerit on esitetty luvussa 5.

Mallinnuksessa käytettiin selittäjinä kaikkia tietokannassa kohteesta olevia muuttujia kuten:

- Rakennetiedot (maatutkauksen avulla saadut päällysteen ja kantavan kerroksen paksuudet, tien leveys, luiskan kaltevuus, maalajitiedot sekä onko kohde rakennettu tai rakentamaton).
- Vastetiedot (kaikki PPL-mittausten taipuma-arvot ja tunnusluvut, kuten SCI300, SCI450 ja BCI).
- Liikenne-, ilmasto- sekä päällystetyyppitiedot.

Aikasarjojen kasvunopeuksien määrittämisessä ongelmia aiheutti aineistossa esiintyvät suuret hajonnat. Peräkkäisten vuosien mittauservot käyttäytyivät usein hyvin epäjohdonmukaisesti, kuten kuvassa 6.5 olevat esimerkit osoittavat.



Kuva 6.5. Esimerkkejä poikittaisen epätasaisuuden aikasarjojen hajonnoista.

Käytävissä olevan aineiston perusteella ei saatu kehitettyä malleja edellä mainituilla selittäjillä. Tästä syystä vaihdettiin mallinnuksen lähestymistapaa analysointimenetelmään, jossa kohteen tulevaa rappeutumisenopeutta ennustetaan nykykunnan avulla. Menetelmä on tarkemmin esitetty luvussa 5.2. Samalla otettiin mallinnuksessa käyttöön laajempi ns. 600 km:n aineisto.

6.3.2 Poikittaisen epätasaisuuden mallit

Mallinnuksen periaatteena on, että tiekohteen tulevaa poikittaisen epätasaisuuden kehittymistä ennustetaan sen nykytilan toteumalla, eli se minkä kuntotilan kohde on saavuttanut nykyään mennessä selittää kohteen tulevaa kunnan kehittymistä. Mikäli kohteen poikittaisen epätasaisuuden kasvunopeus määritetään suoraan jakamalla toteutunut kuntotaso kohteen iällä saadaan tuloksena liian suuri nopeus, koska poikittaisella epätasaisuudella on yleensä lähtöarvo, joka on isompi kuin nolla ja epälineaarinen jakso kehityksen alussa johtuen mm. alkutiivistymisestä. Näin määritettyä rappeutumisenopeutta (jakamalla kohteen rappeutumisaste suoraan kohteen iällä) kutsutaan tässä raportissa nimellä ”origo_nopeus”.

Aineiston jokaiselle kohteelle on siten määritetty seuraavat kaksi eri rappeutumisnopeutta poikittaiselle epätasaisuudelle:

- Origo_nopeus, joka saadaan jakamalla poikittaisen epätasaisuuden nykyarvo kohteen iällä (määritetty edellisestä päällystystoimenpiteestä)
- Aikasarja-nopeus, joka saadaan kohteen aikasarjan regressiosuoran kulmakertoimesta (regressioparametri a kaavassa 5.1).

Mallinnuksen tavoitteena oli selittää aikasarjojen nopeutta (kohteiden todellisia nopeuksia) origo_nopeudella. Tulokseksi saadut mallit poikittaisen epätasaisuuden kehittymiselle kevytpäällysteisillä teillä on esitetty kaavoissa 6.4 ja 6.5. Mallit kehitettiin erikseen PAB ja ohut AB päällysteille, joiden aineisto ja kuvaajat on esitetty kuvissa 6.6 ja 6.7. Mallien tilastolliset tunnusluvut ovat kokonaisuudessaan esitetty liitteessä 4.

PAB-tiet (N = 1360, $R^2 = 0,49$):

$$\text{PETA_NOP} = 0,47 * \text{Origo_NOP} + 0,075, \quad (6.4)$$

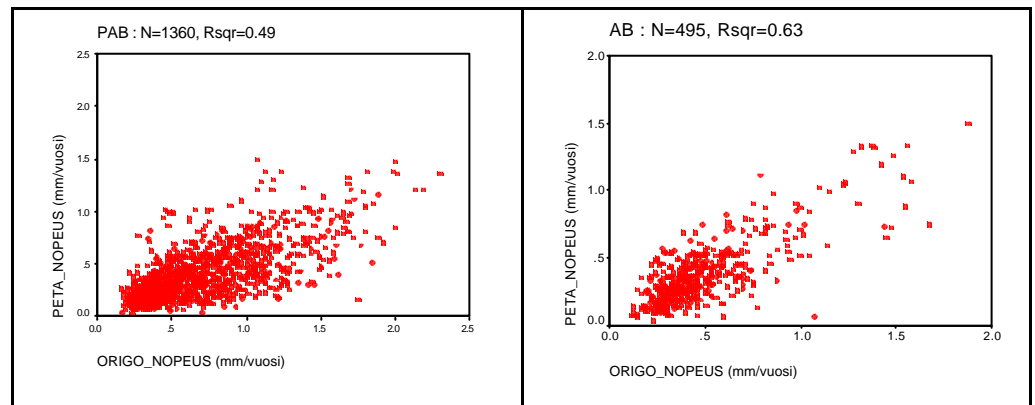
ohut AB-tiet (N = 495, $R^2 = 0,63$):

$$\text{PETA_NOP} = 0,68 * \text{Origo_NOP} + 0,040, \quad (6.5)$$

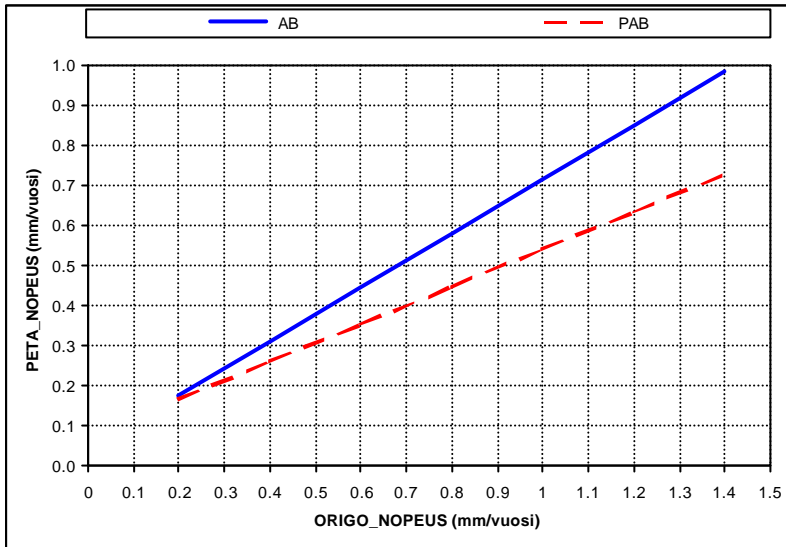
missä

PETA_NOP = poikittaisen epätasaisuuden kasvunopeus (mm/vuosi)

Origo_NOP = kohteen nykykunto / kohteen iällä (mm/vuosi).



Kuva 6.6. Poikittaisen epätasaisuuden mallinnusaineisto.



Kuva 6.7. Poikittaisen epätasaisuuden mallien kuvaajat.

6.3.3 Poikittaisen epätasaisuuden mallien tulkinta

Poikittaisen epätasaisuuden kehittymisen ennustamisessa malleja voidaan hyödyntää seuraavalla tavalla:

- Valitaan ennustettavalta 100 metrin osuudelta viimeinen mittaustulos (esimerkiksi 6,8 mm) ja määritetään päällysteen ikä edellisestä päällystystoimenpiteestä (esimerkiksi 8 vuotta).
- Lasketaan kohteen Origo_nopeus jakamalla poikittaisen epätasaisuuden arvo kohteen iällä.

$$6,8 \text{ mm} / 8 \text{ vuotta} = 0,85 \text{ mm/vuosi}$$

- Lasketaan poikittaisen epätasaisuuden kehittymisnopeus sijoittamalla Origo_nopeuden arvo päällystetyypistä riippuen kaavaan 6.4 tai 6.5.

PAB: $PETA_NOP = 0,47 * 0,85 + 0,075 = 0,47 \text{ mm/vuosi}$

tai

ohut AB: $PETA_NOP = 0,68 * 0,85 + 0,040 = 0,62 \text{ mm/vuosi}$

Tuloksena poikittaisen epätasaisuuden kasvunopeudelle saadaan siten 0,47 mm vuodessa, jos kyseessä on PAB-tie ja 0,62 mm vuodessa mikäli kyseessä on ohutpäällysteinen AB-tie. Kun kohteen rappeutumisnopeus on tiedossa voidaan esimerkiksi laskea minä vuonna kohteen kuntotila saavuttaa määrätyn raja-arvon (toimenpiderajan). Vastaavalla tavalla voidaan ennustaa koko alempiluokkaisen tieverkon rappeutumisnopeudet ja rappeutumisajankohdat.

6.4 Pituussuuntainen epätasaisuus, IRI

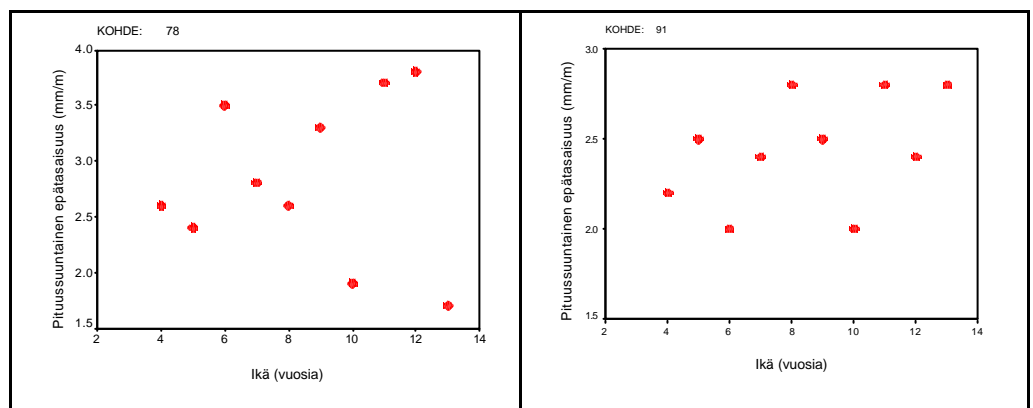
6.4.1 Yleistä

Pituussuuntaisen epätasaisuuden (IRI) analysoinnin aluksi luotiin Tiehallinnon kuntorekisterin (Kurre) mittaushistoriasta kohteille aikasarjat kunnan kehittymiselle suhteessa päällysteen ikään. Päällysteen ikä määritettiin edellisestä päällystystoimenpiteestä. Pituussuuntaisen epätasaisuuden kasvunopeutta kuvattiin lineaarisella mallilla aikaisemmin esitetyllä tavalla (kaava 5.1). Mallinnettavien aikasarjojen kriteerit on esitetty luvussa 5.

Mallinnuksessa käytettiin selittäjinä kaikkia tietokannassa kohteesta olevia muuttujia kuten:

- Rakennetiedot (maatutkauksen avulla saadut päällysteen ja kantavan kerroksen paksuudet, tien leveys, luiskan kaltevuus, maalajitiedot sekä onko kohde rakennettu tai rakentamaton).
- Vastetiedot (kaikki PPL-mittausten taipuma-arvot ja tunnusluvut, kuten SCI300, SCI450 ja BCI).
- Liikenne-, ilmasto- sekä päällystetyyppitiedot.

Aikasarjojen kasvunopeuksien määrittämisessä ongelmia aiheutti aineistossa esiintyvät suuret hajonnat. Peräkkäisten vuosien mittauserot käyttäytyivät usein hyvin epäjohdonmukaisesti, kuten kuvassa 6.8 olevat esimerkit osoittavat.



Kuva 6.8. Esimerkkejä pituussuuntaisen epätasaisuuden aikasarjojen hajonnoista.

Käytettävissä olevan aineiston perusteella ei saatu kehitettyä malleja edellä mainituilla selittäjillä. Tästä syystä vaihdettiin mallinnuksen lähestymistapaa analysointimenetelmään, jossa kohteen tulevaa rappeutumisko- peutta ennustetaan nykykunnan avulla. Menetelmä on tarkemmin esitetty

luvussa 5.2. Samalla otettiin mallinnuksessa käyttöön laajempi ns. 600 km:n aineisto.

6.4.2 Pituussuuntaisen epätasaisuuden mallit

Mallinnuksen periaatteena on, että tiekohteen tulevaa pituussuuntaisen epätasaisuuden kehittymistä ennustetaan sen nykytilan toteumalla, eli se minkä kuntotilan kohde on saavuttanut nykyikään mennessä selittää kohteen tulevaa kunnan kehittymistä. Mikäli kohteen pituussuuntaisen epätasaisuuden kasvunopeus määritetään suoraan jakamalla toteutunut kuntotaso kohteen iällä saadaan tuloksena liian suuri nopeus, koska pituussuuntaisella epätasaisuudella on yleensä lähtöarvo, joka on isompi kuin nolla ja joskus myös epälineaarinen jakso kehityksen alussa johtuen mm. rakenteen alkutiivistymisestä. Näin määritettyä rappeutumisenopeutta (jakamalla kohteen rappeutumisaste suoraan kohteen iällä) kutsutaan tässä raportissa nimellä "origo_nopeus".

Aineiston jokaiselle kohteelle on siten määritetty seuraavat kaksi eri rappeutumisenopeutta pituussuuntaiselle epätasaisuudelle:

- Origo_nopeus, joka saadaan jakamalla pituussuuntaisen epätasaisuuden (IRI:n) nykyarvo kohteen iällä (määritetty edellisestä päällystystoimenpiteestä)
- Aikasarja-nopeus, joka saadaan kohteen aikasarjan regressiosuoran kulmakertoimesta (regressioparametri a kaavassa 5.1).

Mallinnuksen tavoitteena oli selittää aikasarjojen nopeutta (kohteiden todellisia nopeuksia) origo_nopeudella. Tulokseksi saadut mallit pituussuuntaisen epätasaisuuden kehittymiselle kevytpäällysteisillä teillä on esitetty kaavoissa 6.6 ja 6.7. Mallit kehitettiin erikseen PAB ja ohut AB päällysteille, joiden aineisto ja kuvaajat on esitetty kuvissa 6.9 ja 6.10. Mallien tilastolliset tunnusluvut ovat kokonaisuudessaan esitetty liitteessä 5.

PAB-tiet (N = 2557, R² = 0,35):

$$\text{IRI_NOP} = 0,40 * \text{Origo_NOP} - 0,0096, \quad (6.6)$$

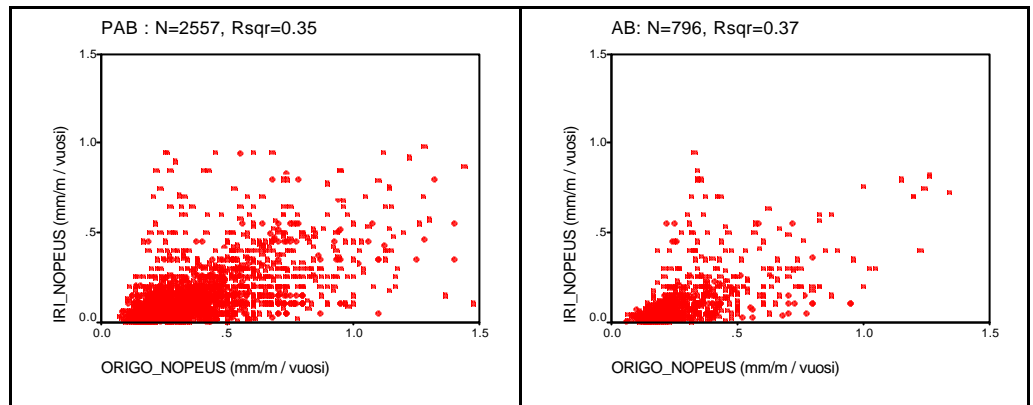
ohut AB-tiet (N = 797, R² = 0,37):

$$\text{IRI_NOP} = 0,46 * \text{Origo_NOP} + 0,018, \quad (6.7)$$

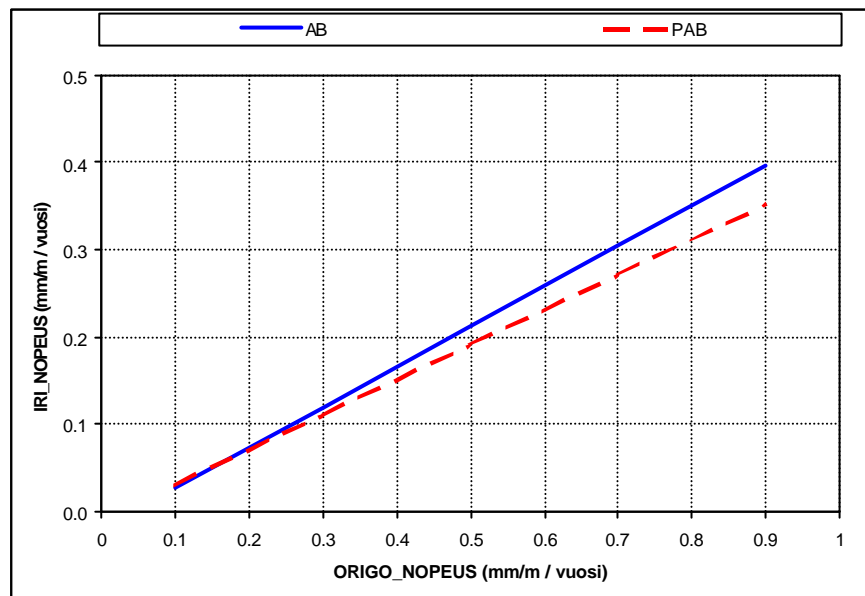
missä

IRI_NOP = pituussuuntaisen epätasaisuuden kasvunopeus (mm/m / vuosi)

Origo_NOP = kohteen nykykunto / kohteen iällä (mm/m / vuosi).



Kuva 6.9. Pituussuuntaisen epätasaisuuden (IRI) mallinnusaineisto.



Kuva 6.10. Pituussuuntaisen epätasaisuuden (IRI) mallien kuvaajat.

6.4.3 Pituussuuntaisen epätasaisuuden mallien tulkinta

Pituussuuntaisen epätasaisuuden kehittymisen ennustamisessa malleja voidaan hyödyntää seuraavalla tavalla:

- Valitaan ennustettavalta 100 metrin osuudelta viimeinen IRI:n mittaus-tulos (esimerkiksi 2,8 mm/m) ja määritetään päällysteen ikä edellisestä päällystystoimenpiteestä (esimerkiksi 7 vuotta).
- Lasketaan kohteen Origo_nopeus jakamalla IRI:n arvo kohteen iällä.

$$2,8 \text{ mm/m} / 7 \text{ vuotta} = 0,40 \text{ mm/m / vuosi}$$

- Lasketaan IRI:n kehitysnopeus sijoittamalla Origo_nopeuden arvo päällystetyypistä riippuen kaavaan 6.6 tai 6.7.

PAB: $IRI_NOP = 0,40 * 0,40 - 0,0096 = 0,15 \text{ mm/m / vuosi}$

tai

ohut AB: $IRI_NOP = 0,46 * 0,40 - 0,018 = 0,17 \text{ mm/m / vuosi}$

Tuloksena pituussuuntaisen epätasaisuuden (IRI:n) kasvunopeudelle saadaan siten 0,17 mm/m vuodessa, jos kyseessä on PAB-tie ja 0,15 mm/m vuodessa mikäli kyseessä on ohutpäällysteinen AB-tie. Kun kohteen rappeutumismopeus on tiedossa voidaan esimerkiksi laskea minä vuonna kohteen kuntotila saavuttaa määrätyn raja-arvon (toimenpiderajan). Vastaavalla tavalla voidaan ennustaa koko alempiluokkaisen tieverkon rappeutumismopeudet ja rappeutumisajankohdat.

6.5 Vauriosumma, VS

6.5.1 Yleistä

Päällystevaurioiden (vauriosumma) analysoinnin aluksi luotiin Tiehallinnon kuntorekisterin (Kurre) mittaushistoriasta kohteille aikasarjat kunnan kehittymiselle suhteessa päällysteen ikään. Päällysteen ikä määritettiin edellisestä päällystystoimenpiteestä. Vauriosumman kasvunopeutta kuvattiin lineaarisella mallilla aikaisemmin esitetyllä tavalla (kaava 5.1). Mallinnettavien aikasarjojen kriteerit on esitetty luvussa 5. Vauriosumman aikasarjojen muodostaminen poikkesi edellä esitetyistä kuntomuuttujista (PETA ja IRI) siten, että nyt oli käytettävissä huomattavasti lyhyemmät aikasarja historiat. Vaurioinventointi suoritetaan kohteilla noin joka kolmas vuosi kun vastavasti PTM mittaukset suoritetaan joka vuosi. Tästä syystä kohteiden aikasarjat sisälsivät pääsääntöisesti ainoastaan kolme tai neljä havaintoa.

Mallinnuksessa käytettiin selittäjinä kaikkia tietokannassa kohteesta olevia muuttujia kuten:

- Rakennetiedot (maatutkauksen avulla saadut päällysteen ja kantavan kerroksen paksuudet, tien leveys, luiskan kaltevuus, maalajitiedot sekä onko kohde rakennettu tai rakentamaton).
- Vastetiedot (kaikki PPL-mittausten taipuma-arvot ja tunnusluvut, kuten SCI300, SCI450 ja BCI).
- Liikenne-, ilmasto- sekä päällystetyyppitiedot.

Käytettävissä olevan aineiston perusteella ei saatu kehitettyä malleja edellä mainituilla selittäjillä. Tästä syystä vaihdettiin mallinnuksen lähestymistapaa analysointimenetelmään, jossa kohteen tulevaa rappeutumismopeutta ennustetaan nykykunnan avulla. Menetelmä on tarkemmin esitetty luvussa 5.2. Samalla otettiin mallinnuksessa käyttöön laajempi ns. 600 km:n aineisto.

6.5.2 Päällysteen vaurioitumisen mallit

Mallinnuksen periaatteena on, että tiekohteen tulevaa vauriosumman kehittymistä ennustetaan sen nykytilan toteumalla, eli se minkä kuntotilan kohde on saavuttanut nykyikään mennessä selittää kohteen tulevaa kunnan kehittymistä. Mikäli kohteen vauriosumman kasvunopeus määritetään suoraan jakamalla toteutunut kuntotaso kohteen iällä saadaan tuloksena liian pieni nopeus, koska päällysteen vaurioitumisella on yleensä alkuviive, eli vaurioituminen ei ala välittömästi vaan vasta muutaman vuoden kuluttua tehdystä toimenpiteestä. Näin määritettyä vaurioitumisnopeutta (jakamalla kohteen vauriosumma suoraan kohteen iällä) kutsutaan tässä raportissa nimellä "origo_nopeus".

Aineiston jokaiselle kohteelle on siten määritetty seuraavat kaksi eri rappeutumisenopeutta vauriosummalle:

- Origo_nopeus, joka saadaan jakamalla vauriosumman nykyarvo kohteen iällä (määritetty edellisestä päällystystoimenpiteestä)
- Aikasarja-nopeus, joka saadaan kohteen aikasarjan regressiosuoran kulmakertoimesta (regressioparametri a kaavassa 5.1).

Mallinnuksen tavoitteena oli selittää aikasarjojen nopeutta (kohteiden todellisia nopeuksia) origo_nopeudella. Tulokseksi saadut mallit vauriosumman kehittymiselle kevytpäällysteisillä teillä on esitetty kaavoissa 6.8 ja 6.9. Mallit kehitettiin erikseen PAB ja ohut AB päällysteille, joiden aineisto ja kuvaajat on esitetty kuvissa 6.11 ja 6.12. Mallien tilastolliset tunnusluvut ovat kokonaisuudessaan esitetty liitteessä 6.

PAB-tiet (N = 1424, R² = 0,79):

$$VS_NOP = 1,46 * Origo_NOP + 0,095, \quad (6.8)$$

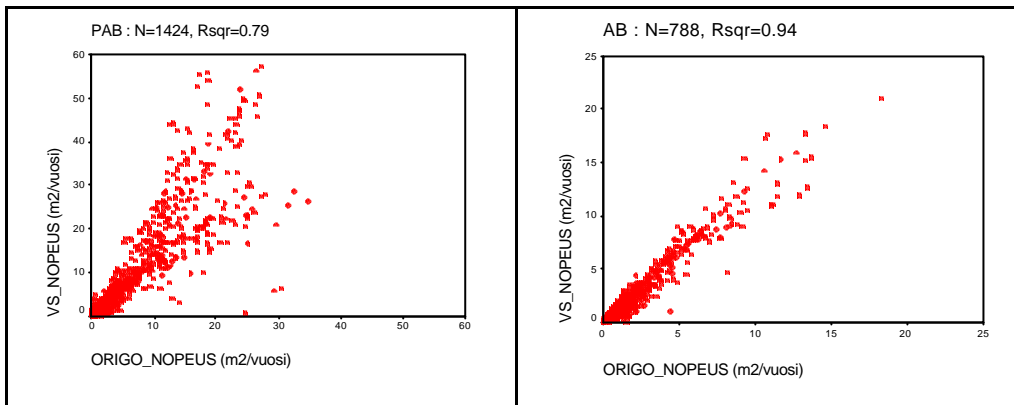
ohut AB-tiet (N = 788, R² = 0,94):

$$VS_NOP = 1,23 * Origo_NOP - 0,044, \quad (6.9)$$

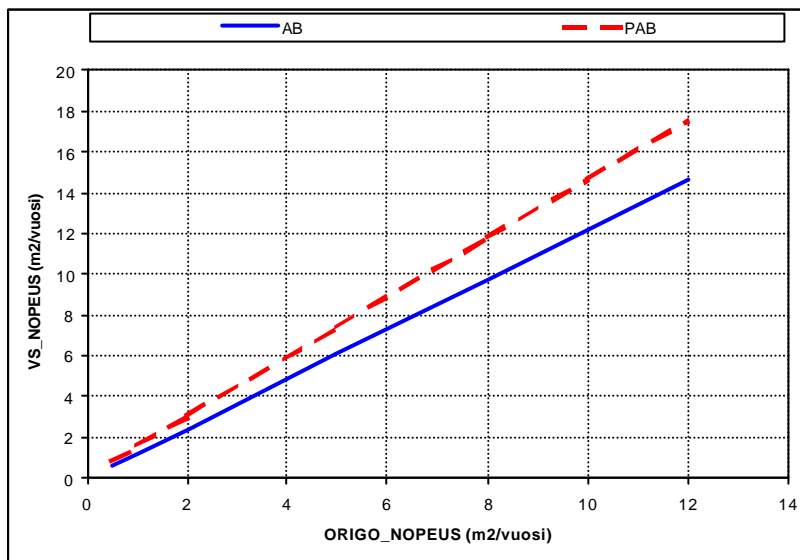
missä

VS_NOP = vauriosumman kasvunopeus (m²/vuosi)

Origo_NOP = kohteen nykykunto / kohteen iällä (m²/vuosi).



Kuva 6.11. Päällysteen vaurioitumisen (vauriosumma) mallinnusaineisto.



Kuva 6.12. Päällysteen vaurioitumisen (vauriosumma) mallien kuvaajat.

6.5.3 Vauriomallien tulkinta

Vauriosumman kehittymisen ennustamisessa malleja voidaan hyödyntää seuraavalla tavalla:

- Valitaan ennustettavalta 100 metrin osuudelta viimeinen vaurioinventointitulok (esimerkiksi 26 m²) ja määritetään päällysteen ikä edellisestä päällystystoimenpiteestä (esimerkiksi 11 vuotta).
- Lasketaan kohteen Origo_nopeus jakamalla vauriosumman arvo kohteen iällä.

$$26 \text{ m}^2 / 11 \text{ vuotta} = 2,36 \text{ m}^2/\text{vuosi}$$

- Lasketaan vauriosumman kehittymisnopeus sijoittamalla Origo_nopeuden arvo päällystetyypistä riippuen kaavaan 6.8 tai 6.9.

PAB: $VS_NOP = 1,46 * 2,36 + 0,095 = 3,5 \text{ m}^2/\text{vuosi}$

tai

ohut AB: $VS_NOP = 1,23 * 2,36 - 0,044 = 2,9 \text{ m}^2/\text{vuosi}$

Tuloksena vauriosumman kasvunopeudelle saadaan siten $3,5 \text{ m}^2$ vuodessa, jos kyseessä on PAB-tie ja $2,9 \text{ m}^2$ vuodessa mikäli kyseessä on ohutpäällysteinen AB-tie. Kun kohteen vaurioitumisnopeus on tiedossa voidaan esimerkiksi laskea minä vuonna kohteen kuntotila saavuttaa määrätyn raja-arvon (toimenpiderajan). Vastaavalla tavalla voidaan ennustaa koko alempiluokkaisen tieverkon vaurioitumisnopeudet ja vaurioitumisajankohdat.

7 MALLIEN TOIMIVUUDEN TESTAUS (VERIFIOINTI)

7.1 Testausaineiston valinta

Viimeinen vaihe analysointityössä oli kehitettyjen kevytpäällysteisten teiden kunnan kehittymistä ennustavien mallien testaus. Koska mallien kehittämiseen käytetty aineisto ei kata esimerkiksi kaikkia Suomen ilmasto-olosuhteita tuli mallit testata riippumattomalla aineistolla, joka edustaa mahdollisimman hyvin mallien käyttöaluetta. Testauksen tavoitteena on todentaa riippumattomalla aineistolla mallien käyttökelpoisuus.

Mallien kehittämisessä oli käytetty kohteita Turun, Vaasan, Oulun ja Lapin tiepiirien alueelta. Jäljellä olevista tiepiireistä arvottiin kolme piiriä joiden alueelta testauskohteet valittaisiin. Valituiksi tiepiireiksi tulivat Savo-Karjala, Häme ja Uusimaa. Näistä tiepiireistä valittiin satunnaisesti ohutpäällysteisiä AB ja PAB kohteita Tiehallinnon kuntorekistereistä (Kurre) siten, että testauskohteiden lopulliseksi lukumääräksi saatiin noin 1000 – 3000 kohdetta (kappaletta 100 metrin osuutta) per testattava malli. Testausaineistolle käytettiin vastaavia kriteerejä, kuin mitä edellä käytettiin mallinnusaineistolle.

7.2 Mallien toimivuuden testauksen periaate

Mallien toimivuuden testauksen periaatteena oli, että satunnaisesti valituille riippumattomille kohteille määritetään Kurren kuntohistorian perusteella eri kuntomuuttujille aikasarjat. Testaus käsitti poikittaisen epätasaisuuden, pituussuuntaisen epätasaisuuden (IRI) ja vauriosumman mallit. Harjanteen kasvunopeuden mallia ei voitu testata, koska kuntorekisteri ei sisällä harjanteen korkeutta muuttujana, eikä näin ollen ollut käytettävissä mallien testauksessa tarvittavaa riippumatonta aineistoa.

Aikasarjoista laskettiin lineaarisella regressiolla kohdekohtaiset rappeutumisenopeudet (regression kulmakerroin) erikseen kaikille kuntomuuttujille. Aikasarjoista laskettuja rappeutumisenopeuksia kutsutaan tässä yhteydessä nimellä ”**Testausaineiston aikasarjasta laskettu nopeus**”. Sillä ymmärretään rappeutumisenopeutta, jota kohde noudattaa tulevaisuudessa.

Tämä rappeutunopeus on tietysti myös ennuste itsessään, koska kukaan ei voi tietää mitä tulevaisuudessa todellisuudessa tapahtuu. Mutta kuten aiemmin kappaleessa 5.2 on esitetty koko mallinnushypoteesi perustuu määrättyihin perusolettamuksiin joista päällimmäisenä on, että kuntomuuttuja noudattaa lineaarista käyttäytymismuotoa mallinnettavalla alueella (vaihe 2 kuvassa 5.3). Näinollen tämän perusolettamuksen perusteella voidaan aikasarjoista laskettujen regressiokulmakertoimien avulla laskea kohteille kuntotilat tulevaisuudessa. Nämä lasketut tulevaisuuden kuntotilat ovat niitä joihin mallien ennusteita testauksessa verrataan. Kohteen viimeisestä mittaushavainnosta ja kohteen sen hetkisestä iästä määritettiin kohdekohtaiset origo_nopeudet jakamalla kohteen kuntotila mittaushetkellä olevalla iällä (katso kappale 5.2). Origo_nopeuksien ja kehitettyjen mallien avulla koh-

teille laskettiin eri kuntomuuttujille mallien tuottama rappeutumisnopeus sijoittamalla origo_nopeuden arvo kyseisiin malleihin. Tätä rappeutumisnopeutta kutsutaan tässä yhteydessä nimellä ”**Mallin ennustama nopeus**”.

Lopuksi mallien testausaineistolla verrattiin edellä mainittujen rappeutumisnopeuksien (”testausaineisto aikasarjasta laskettu nopeus” ja ”mallin ennustama nopeus”) laskennallisia kuntotiloja kahtena eri ajankohtana. Ensin tarkasteltiin kuntotilan poikkeamia kolmen vuoden päässä nykyhetkestä (riippumatta kohteen iästä nykyhetkellä). Tällä testillä haluttiin arvioida mallien soveltuvuutta päällystysohjelman suunnitteluun.

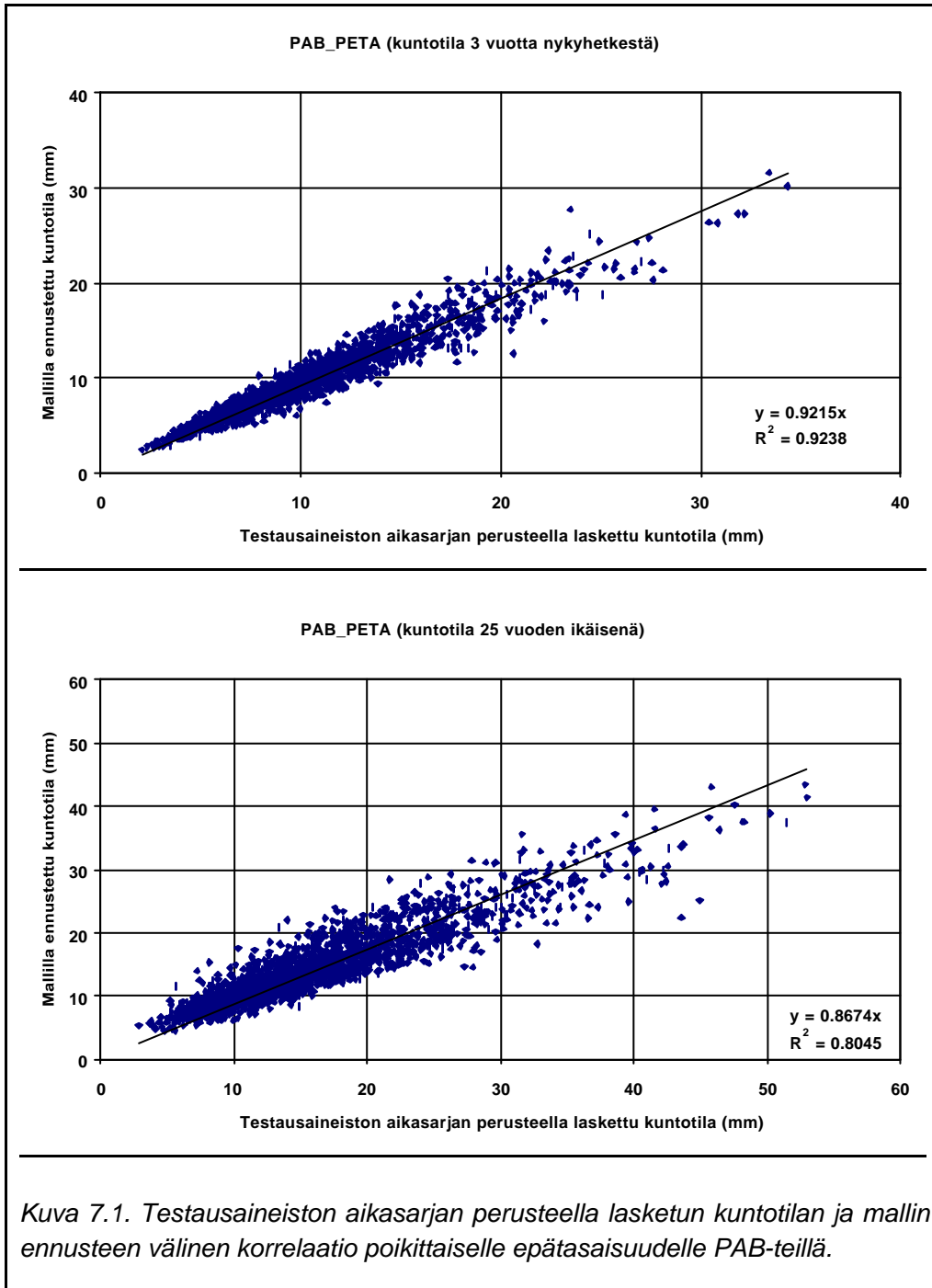
Lisäksi suoritettiin tarkastelu, jossa verrattiin poikkeamia kuntotilassa, kun kohde saavuttaa 25 vuoden iän. Tässä tapauksessa ennusteen pituus vaihteli kohteittain johtuen kohteen nykyiästä, ollen keskimäärin 10 vuoden suurusluokkaa. Tarkoituksena oli testata mallien toimivuutta tieverkon kuntotasotarkasteluille, jotka tehdään pidemmälle aikavälille. Testauksen tulokset on esitetty kuvaajina seuraavassa luvussa ja tulosten tulkinta luvussa 7.4.

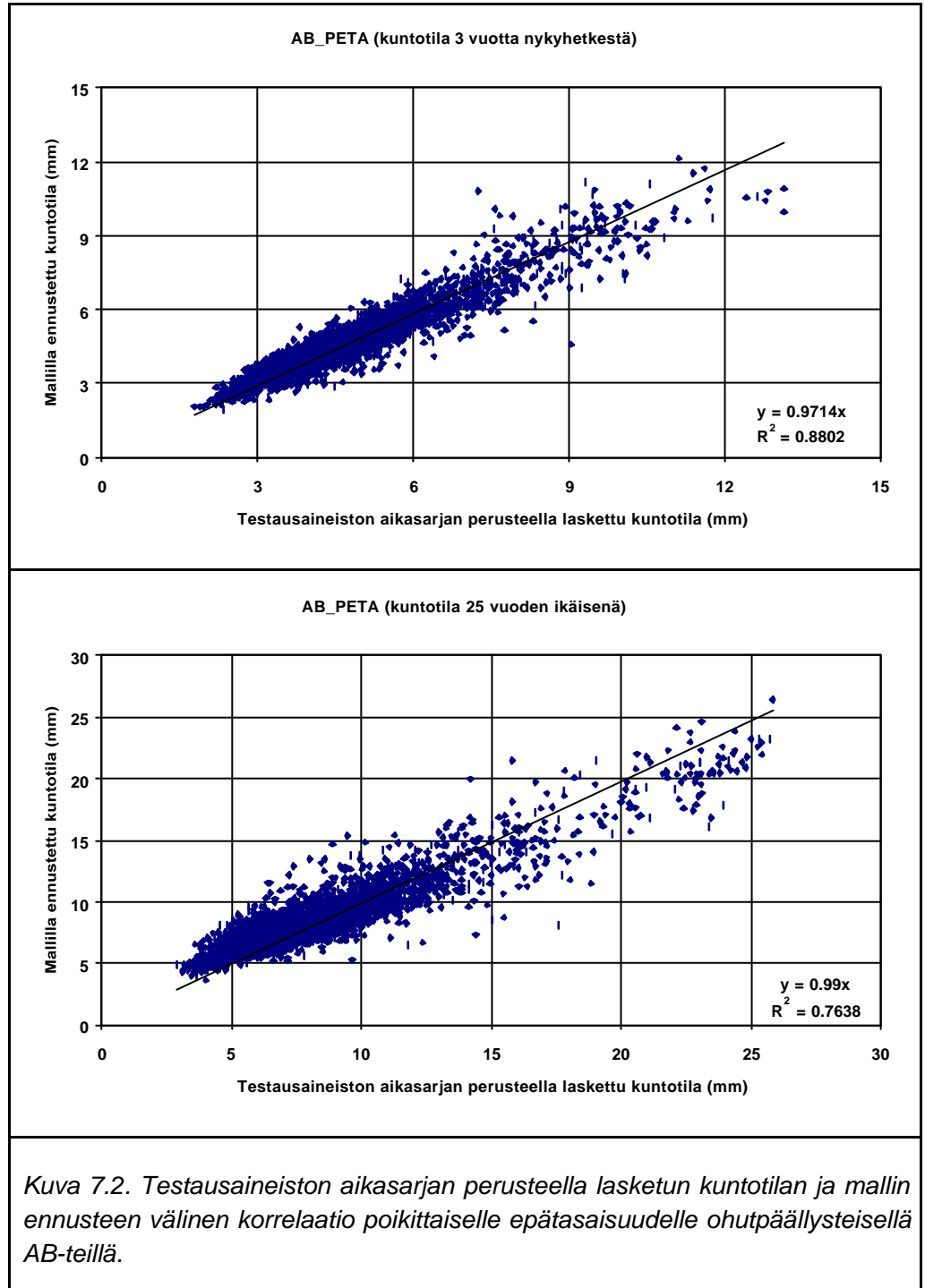
7.3 Mallien testauksen tulokset kuvaajina

Seuraavassa on esitetty kuvaajina mallien toimivuuden testauksen tulokset. Kuvaajat on esitetty kuntomuuttujittain ja päällystetyypeittäin siten, että samassa kuvassa on päällekkäin ensin ylhäällä lyhyt ennuste (kuntotila 3 vuotta nykyhetkestä) ja alempana pitkä ennuste (kuntotila kohteiden saavuttaessa 25 vuoden iän). Kuvissa on x-akselina testausaineiston aikasarjasta laskettu kuntotila ja y-akselina kehitettyjen mallien ennustama kuntotila.

7.3.1 Poikittainen epätasaisuus, PETA

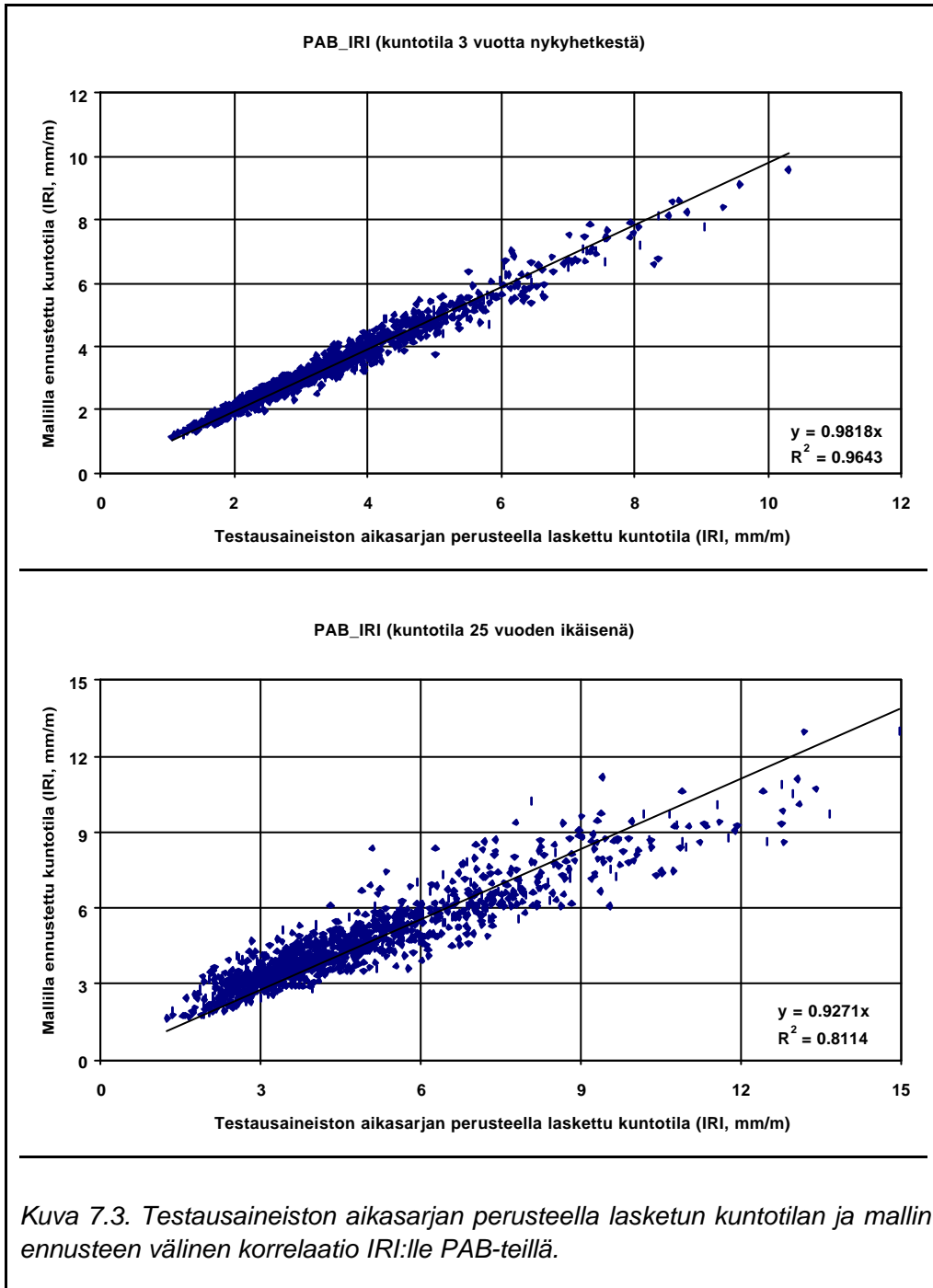
PAB-tiet (n=1949)

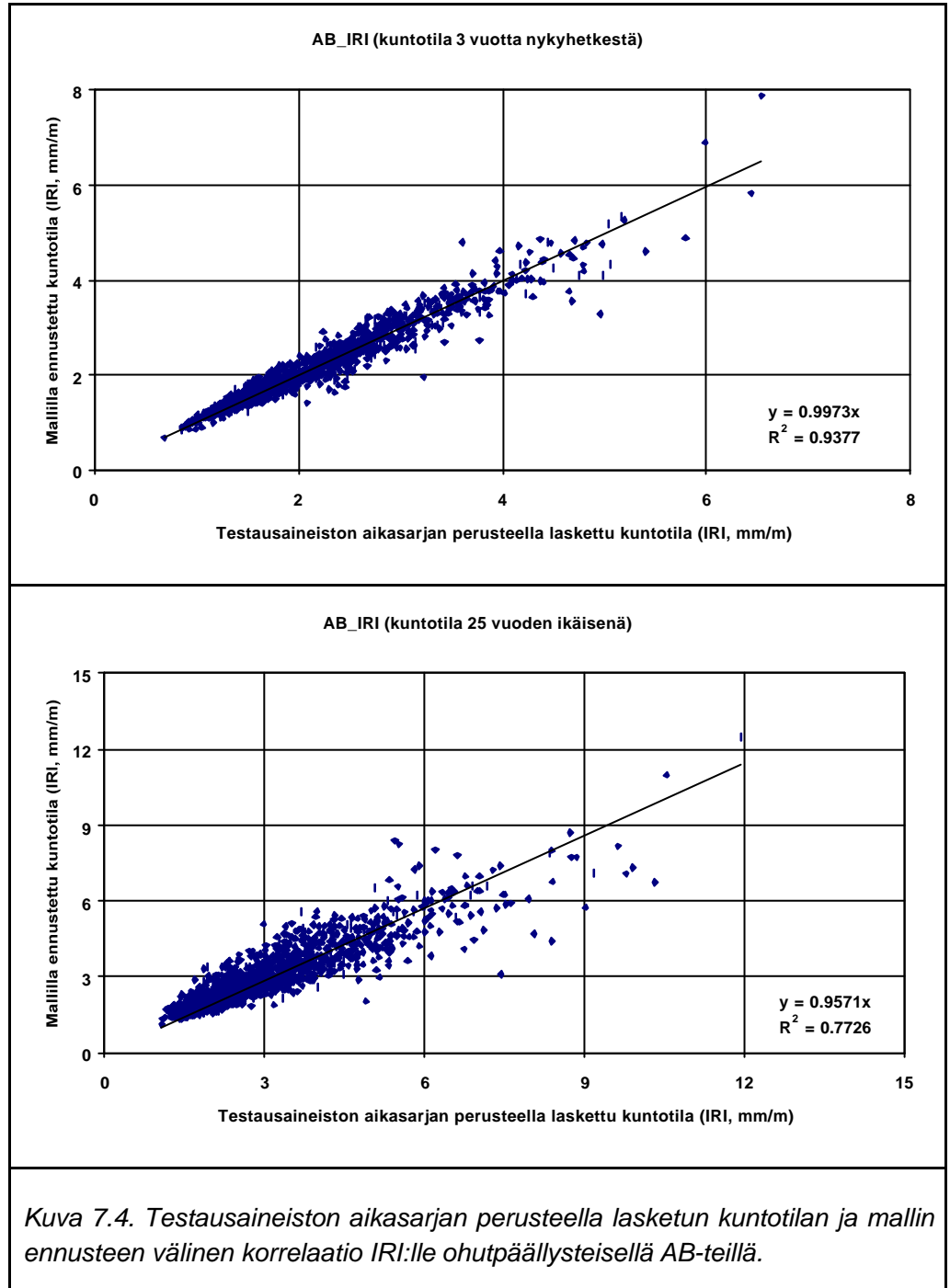


ohut AB-tiet (n=2610)

7.3.2 Pituussuuntainen epätasaisuus, IRI

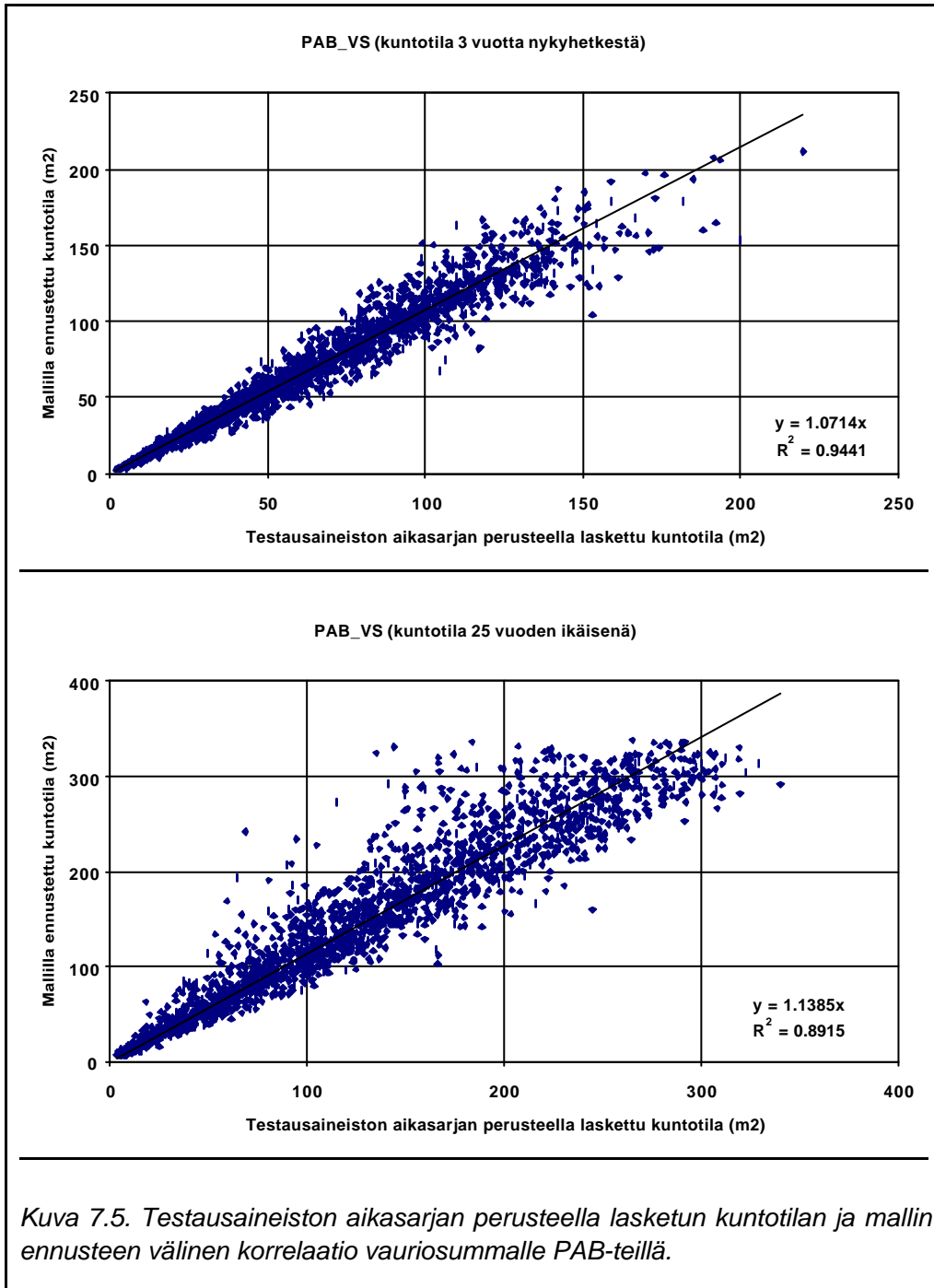
PAB-tiet (n=1274)

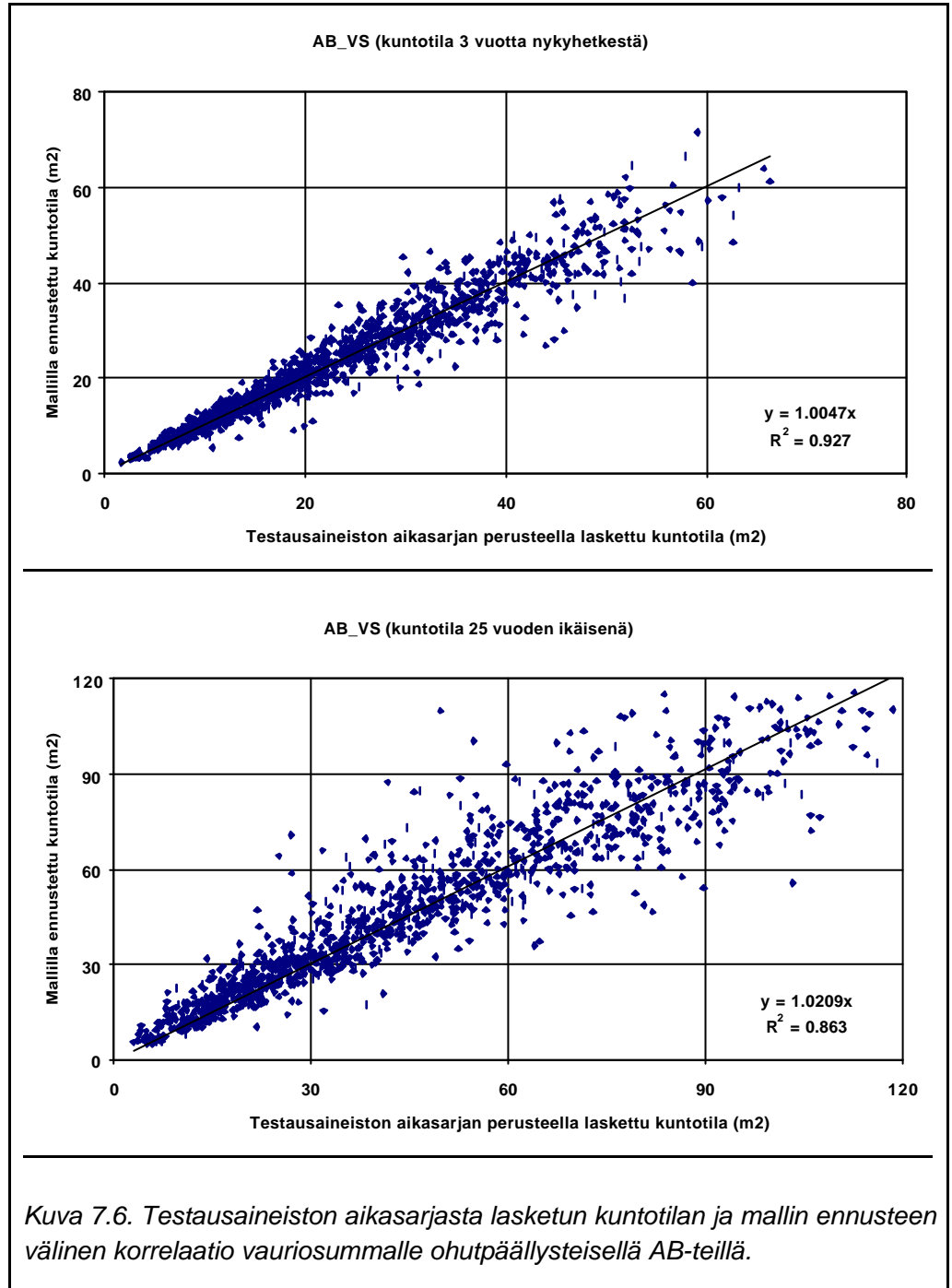


ohut AB-tiet (n=1454)

7.3.3 Vauriosumma, VS

PAB-tiet (n=2143)



ohut AB-tiet (n=1264)

7.4 Tulosten arviointi

Mallien testauksen tuloksista voidaan todeta, että kaikki mallit (12 kappaletta) ennustivat kuntotilaa hyvin testausaineistolla. Testausaineistot vaihtelivat satunnaisesti kooltaan eri malleilla 1264 ja 2610 havainnon välillä. Kuvista 7.1 – 7.6 voidaan todeta, että kakkien testausten aineistot pysyvät hyvin x-y suoran tuntumassa, eikä suurta hajontaa tai vinoumaa esiinny. Testauksen tunnusluvut on esitetty taulukoissa 7.1 ja 7.2. Taulukkojen "kulma-kerroin"-arvon tulisi olla mahdollisimman lähellä arvoa yksi, jolloin mallin ennusteen ja testaustuloksen poikkeama on vakio kuntotilasta riippuen. Samoin "korrelaatio"-arvon tulisi olla mahdollisimman lähellä arvoa yksi, jolloin tulosten hajonta on pieni.

Taulukko 7.1. Aikasarjoista laskettujen ja mallien ennustamien kuntotilojen väliset tunnusluvut nykyhetkestä kolmen vuoden päähän tehdylle ennusteelle.

Kuntomuuttuja	Päällystetyyppi	Kulma-kerroin	Korrelaatio R ²
Poikittainen epätasaisuus	PAB	0,92	0,92
	ohut AB	0,97	0,88
Pituussuuntainen epätasaisuus, IRI	PAB	0,98	0,96
	ohut AB	1,00	0,94
Vauroisumma	PAB	1,07	0,94
	ohut AB	1,00	0,93

Taulukko 7.2. Aikasarjoista laskettujen ja mallien ennustamien kuntotilojen väliset tunnusluvut 25 vuoden kohdeikään tehdylle ennusteelle.

Kuntomuuttuja	Päällystetyyppi	Kulma-kerroin	Korrelaatio R ²
Poikittainen epätasaisuus	PAB	0,87	0,80
	ohut AB	0,99	0,76
Pituussuuntainen epätasaisuus, IRI	PAB	0,93	0,81
	ohut AB	0,96	0,77
Vauroisumma	PAB	1,14	0,89
	ohut AB	1,02	0,86

On luonnollista, että kun ennuste kuntotilalle tehdään 25 vuoden kohdeikään syntyä enemmän hajontaa, kuin jos ennuste tehdään nykyhetkestä kolmen vuoden päähän. Testauksen perusteella kuitenkin pitkienkin ennusteiden tunnusluvut ovat hyvällä tasolla.

Mallien testauksen perusteella voidaan näin ollen todeta, että mallit ovat käyttökelpoisia eikä mallinnusaineiston rajoitukset, jotka jouduttiin toteuttamaan kohteiden valintaprosessissa (esimerkiksi maantieteelliseen sijainnin perusteella) vaikuta mallien käyttökelpoisuuteen.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Projektin tässä osavaiheessa (Kevytpäällysteisten tierakenteiden kunnan kehittymistä ennustavat mallit) kehitettiin mallit tien kunnan kehittymistä kuvaavien muuttujien ja kunnan kehittymistä selittävien muuttujien välille. Tien kuntoa kuvattiin tässä yhteydessä pitkittäisellä epätasaisuudella, poikittaisella epätasaisuudella sekä päällysteen halkeilulla. Näitä tulisi projektin aikaisempien osavaiheiden mukaan kuvata IRI:n kasvunopeudella, harjanteen ja/tai poikittaisen epätasaisuuden kasvunopeudella sekä pituushalkeamien ja/tai vauriosumman kasvunopeudella. Mallit luotiin erikseen PAB- ja ohutpäällysteisille AB-teille. Aineiston analysoinnissa huomioitiin sekä verkkotasoon että hanketason tarpeet, kuitenkin päätavoitteena luoda tieverkkotasoa palvelevat kunnan kehittymistä ennustavat mallit, jotka olisivat mahdollisimman helposti hyödynnettävissä eri tasoilla Tiehallinnon tieverkon kuntoa ennustavissa järjestelmissä.

Lisämittauksilla täydennetyin otostieaineiston analysoinnilla testattiin ja edelleen kehitettiin aikaisempien osavaiheen aikaansaamat hypoteesit ja tulokset. Tämä tapahtui analysoimalla edellä valittuja otoskohteita luotettavammalla ja tarkemmalla lisäaineistolla kuin mitä oli käytettävissä projektin aikaisemmissa vaiheissa. Mallinnuksessa käytettävissä oleva aineisto parani mm. vuonna 2000 suoritettujen pudotuspainolaitemittausten ja maatumittamittausten johdosta. Pudotuspainolaitemittaukset suoritettiin 50 m välein kun edelliset käytettävissä olevat tiedot ovat keskimäärin 500 m välein. Maatumittaus suoritettiin jatkuvana koko 50 km aineistolle päällysteen ja rakennekerrospaksuuksien määrittämiseksi.

Eri kuntomuuttujille pyrittiin ensisijaisesti kehittämään kunnan kehittymistä ennustavat mallit, joissa vaurioitumisnopeuden selittäjinä käytetään tien rakenteellisia ominaisuuksia sekä tiehen kohdistuvia kuormitustekijöitä (liikenne ja ilmasto).

Tien poikittaista epätasaisuutta kuvaavalle harjanteen korkeudelle kehitettiin kunnan kehittymistä ennustavat mallit, erikseen ilmastoalueittain ja päällystetyypittäin. Etelä-Suomen aineistolla ohutpäällysteisten AB- ja PAB-teiden osalta harjanteen nopeutta selitti parhaiten päällysteen leveys, SCI450 ja KVL. Pohjois-Suomen PAB-teillä paras selittäjäkombinaatio harjanteen nopeudelle oli SCI450 ja päällysteen leveys. Pohjois-Suomen aineistolla KVL ei toiminut selittäjänä harjanteen nopeudelle, eikä johtanut loogisiin tuloksiin.

Maatumittamittausten tuottamien päällysteen- ja kantavan kerroksen paksuustietojen hyödyntäminen kuntomuuttujien mallinnuksessa paransi parhaimmillaan selitystasoa vain noin 1%-yksikön verran. Projektin alussa esitettyyn kysymykseen koko tieverkon maatumittamisen tuottamasta hyödyistä kestoikäkalleille on valitettavasti todettava, että käytettävissä olevan aineiston perusteella ei voitu todeta maatumittamustuloksista tulkittujen rakennekerrospaksuuksien selittävän tien rappeutumislähtöä, eikä siten projektin tulosten perusteella voida suositella näin toimittavaksi. Aineistoa ei kuitenkaan ollut valittu maatumittamusten arviointia varten, vaan kunnan

kehittymismallien kehittämistä varten. Näin ollen esitettyä arviota maatutkamittausten tarpeellisuudesta ei tulisi yleistää eikä siitä tule vetää liian pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Asialle riittää varmasti vielä paljon tutkimustarvetta.

Käytettävissä olevan aineiston perusteella ei saatu kehitettyä rakenteellisia selittäjiä sisältäviä malleja pituussuuntaiselle epätasaisuudelle (IRI), poikittaiselle epätasaisuudelle (PETA) eikä päällystevaurioille (VS), koska selitysasteet olivat liian huonot. Tästä syystä vaihdettiin mallinnuksen lähestymistapaa analysointimenetelmään, jossa kohteen tulevaa rappeutumismuutosta ennustetaan nykykunnan avulla. Nämä mallit soveltuvat hyvin olemassa olevan tien kunnan kehittämisen ennustamiseen (PMS-käyttöympäristö), mutta niitä ei voi hyödyntää hanketasolla rakenteellisen suunnittelun yhteydessä.

Mallintamismenetelmän lähtökohta on selittää kuntomuuttujan rappeutumisen kehittämisen funktionaalinen muoto mallinnettavalla aikajaksolla. Eri yhteyksissä on voitu todeta, mm. koetiekoetulosten perusteella, kuntomuuttujien noudattavan kohtuullisen hyvin lineaarista funktionaalista muotoa käytännön tienpidon kannalta kiinnostavalla alueella. Kuitenkin mikäli kohteen rappeutumismuutos määritetään suoraan jakamalla toteutunut rappeutumistaso kohteen iällä saadaan tuloksena yleensä, joko liian nopea tai liian hidas nopeus, koska useimmiten käytännössä rappeutumisen lähtöarvo ei ole nolla ja/tai se ei noudata kehittämisen alkuvaiheessa lineaarista muotoa. Esimerkiksi pituussuuntaisella ja poikittaisella epätasaisuudella on yleensä lähtöarvo, joka on isompi kuin nolla ja epälineaarinen jakso kehityksen alussa johtuen mm. alkutiivistymisestä, kun taas päällystevaurioituminen alkaa yleensä aikaviiveellä, varsinkin kuormituskestävyysvaurioiden osalta.

Edellä kuvatulla mallinnusmenetelmällä kehitettiin ennustemallit pituussuuntaiselle epätasaisuudelle (IRI), poikittaiselle epätasaisuudelle (PETA) sekä päällystevaurioille (VS). Mallit kehitettiin erikseen PAB- ja ohutpäällysteisille AB-teille. Mallien selitysasteet olivat kohtuulliset/hyvät ja selkeästi paremmat kuin aikaisemmin esitetyt.

Viimeinen vaihe analysointityössä oli kehitettyjen kevytpäällysteisten teiden kunnan kehittämistä ennustavien mallien toimivuuden testaus. Koska mallien kehittämiseen käytetty aineisto ei kata esimerkiksi kaikkia Suomen ilmasto-olosuhteita tuli mallit testata riippumattomalla aineistolla, joka edustaa mahdollisimman hyvin mallien käyttöaluetta. Testaus käsitti poikittaisen epätasaisuuden, pituussuuntaisen epätasaisuuden (IRI) ja vauriosumman mallit. Harjanteen kasvunopeuden mallia ei voitu testata, koska kuntorekisteri ei sisällä harjanteen korkeutta muuttujana, eikä näin ollen ollut käytettävissä mallien testauksessa tarvittavaa riippumatonta aineistoa.

Mallien toimivuuden testaus suoritettiin kahdelle eri ennusteelle, lyhyt ja pitkä. Ensin tarkasteltiin kuntotilan poikkeamia kolmen vuoden päässä nykyhetkestä. Tällä testillä haluttiin arvioida mallien soveltuvuutta päällystysohjelman suunnitteluun. Lisäksi suoritettiin tarkastelu, jossa verrattiin poik-

keamia kuntotilassa, kun kohde saavuttaa 25 vuoden iän. Tässä tapauksessa ennusteen pituus vaihteli kohteittain johtuen kohteen nykyiästä, ollen keskimäärin 10 vuoden suurusluokkaa. Tällä haluttiin testata mallien toimivuutta tieverkon kuntotasotarkasteluille, jotka tehdään pidemmälle aikavälille.

Mallien testauksen tuloksista voidaan todeta, että kaikki mallit (12 kappaletta) ennustivat kuntotilaa hyvin testausaineistolla. Mallit ovat siten käyttökelpoisia eikä mallinnusaineiston rajoitukset, jotka jouduttiin toteuttamaan kohteiden valintaprosessissa vaikuta mallien käyttökelpoisuuteen. Tässä osavaiheessa kehitetyt verkkotason mallit ovat siten otettavissa käyttöön Tiehallinnon ohjausjärjestelmissä.

Tulevaisuudessa havaintoteiden lukumäärää ja niiden seuranta tulisi karvoittaa kokonaisuutena ja koko päällystetyn tieverkon kannalta. On varsin selvää ja kansainvälisestäikin tunnustettua, että ainoa tapa luoda luotettavat kestoikämallit on laadukkaan havaintotieaineiston avulla. Tämän aineiston hankkiminen vaatii hyvää koesuunnittelua, oikeiden asioiden mittaamista ja seuranta sekä ennen kaikkea malttia ja aikaa. Pitkäaikaikäkäyttäytymistä ei yksinkertaisesti pysty selvittämään lyhyessä ajassa.

Tässä "Kevytpäällysteisten tierakenteiden projektissa" valittiin otos tiekohteita alemmalta tieverkolta, joilta tutkittiin paljon asioita kahden vuoden aikana. Nämä kohteet eivät kuitenkaan vielä ole tämän perusteella ns. pitkäaikaiseurannassa olleita havaintotiekohteita.

TPPT-projektissa hyödynnetyt havaintotiet (entiset SHRP-LTPP) on taas valittu vain kuormituskestävyydestarkastelua varten, liikennemäärältään keskinkertaiselta tai vilkkaalta osalta tieverkkoa, lukuun ottamatta kaikista vilkkaampia teitä, joilla on voimakas kuluminen nastarenkaiden johdosta. Aineisto ei varsinaisesti sisällä kohteita, joissa rappeutuminen aiheutuu ensisijaisesti ilmasto-olosuhteista.

Jatkossa tulisi siksi valita kohtuullinen määrä tiekohteita (hyödyntämällä olemassa olevat aineistot mahdollisuuksien mukaan) päällystetyltä tieverkolta siten, että erilaiset olosuhteet (liikenne ja ilmasto) ja rakennetyypit olisivat mahdollisimman hyvin edustettuina. Tämä on ainoa tapa saada tulevaisuudessa kehitettyä parempia ja luotettavampia kunnan kehittymistä ennustavia malleja, jotka myös sisältävät rakenteellisia muuttujia selittäjinä. Sellaisten mallien hyödynnettävyys mahdollisuudet ovat erittäin laajat kuten esimerkiksi:

- Hanketasolla ja hankinnoissa
- Ohjelmatasolla ja ylläpidossa
- Verkkotasolla ja ohjelmoinnissa
- Elinkaaritarkastelun eri vaiheissa.

9 KIRJALLISUUS

Belt, J., 1999. Kestoikä tutkimus, loppuraportti. Oulu: Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion tutkimusselostuksia 2/1999.

Belt, J., Lämsä, V.P., Liimatta & L., Ehrola, E., 2000. Kevytpäällysteteiden vauriomallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet. Helsinki: Tielaitos, Tuotanto, Konsultointi. Tielaitoksen selvityksiä 18/2000. TIEL 3200607.

European Commission, 1999. PARIS - Performance Analysis of Road Infrastructure. Brussels: Final Report for Publication, RO-96-SC.404. ISBN 92-828-7827-9.

Korkiala-Tanttu, L. & Onninen, H., 2001. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994 – 2001, TPPT menetelmäkuvaus. Tien rakennekerrostutkimukset. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka.

Spoof, H. & Petäjä, S., 2000a. Kevytpäällysteisten teinrakenteiden projekti, havaistotieaineiston kokoaminen ja analysointi. Helsinki: Tielaitos, Tiehallinto. Tielaitoksen selvityksiä 51/2000. TIEL 3200637.

Spoof, H., Petäjä, S. & Ruotoistenmäki, A., 2000b. Tien rakenteellinen kunto. Taipumien lämpötilakorjaus ja kuormituskestävyysmallit. Espoo: VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 524.

Tielaitos, Tiehallinto, 1991. Routavaurio- ja kuivatustutkimus, Pituushalkeamat osa 2. Helsinki: Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 1/1991.

10 LIITTEET

- Liite 1. Koesuunnittelumatriisi
- Liite 2. Selittäjien jakaumakuvia
- Liite 3. Harjanteen korkeuden kunnan kehittymismallin tilastolliset tunnusluvut.
- Liite 4. Poikittaisen epätasaisuuden kunnan kehittymismallin tilastolliset tunnusluvut.
- Liite 5. Pituussuuntaisen epätasaisuuden (IRI) kunnan kehittymismallin tilastolliset tunnusluvut.
- Liite 6. Päällysteen vaurioitumisen (vauriosumman) kunnan kehittymismallin tilastolliset tunnusluvut.