

TIEN RAKENTEELLINEN KUNTO

Taipumien lämpötilakorjaus ja kuormituskestävyysmallit

Harri Spoo
Sami Petäjä
Antti Ruotoistenmäki

VTT Yhdyskuntatekniikka
Tutkimusraportti 524

Espoo, helmikuu 2000

Alkusanat

Tämä tutkimus on tehty Tien rakenteellinen kunto –projektin ja Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelman (TPPT) yhteisrahoitteisena projektina. Oheinen julkaisu on tutkimuksen vuoden 1999 töiden raportti. Osa tuloksista on esitetty myös TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus raportissa.

Tutkimuksen ovat suorittaneet ja raportin ovat kirjoittaneet VTT Yhdyskuntatekniikan yksiköstä Harri Spoof ja Sami Petäjä. Lisäksi tutkimukseen on osallistunut Antti Ruotoistenmäki ennen siirtymistään Inframan Oy:n palvelukseen. Tutkimuksessa suoritetuista vaurioinventoinneista vastasi VTT Yhdyskuntatekniikan yksiköstä Seppo Koivisto.

Kestoikämallien kehittämisessä hyödynnettiin aineistoa ja asiantuntemusta myös Ruotsista. VTI:n (Statens väg- och transportforskningsinstitut) osalta yhteistyöhön osallistuivat Lars-Göran Wågberg ja Nils-Gunnar Göransson.

Projektin ohjausryhmään ovat kuuluneet:

Pertti Virtala, Hti, puheenjohtaja
Ismo Iso-Heiniemi, Hti
Tuomas Toivonen, Hos
Juha-Matti Vainio, Tuotanto / Konsultointi
Seppo Järvinen / Inframan Oy

Espoossa, tammikuussa 2000

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat	1
1. Johdanto	5
2. Pudotuspainomittausten lämpötilakorjaus	6
2.1 Tausta	6
2.2 Kenttämittausaineiston kuvaus	6
2.3 Laskennalliset taipumat	6
2.4 Taipumien lämpötilakorjausyhtälöt	7
2.5 Päälysteen lämpötilamalli	12
3. Mittausdatan normalisointi ja kalibrointi	14
3.1 Tavoitteet	14
3.2 Vaurioinventointitapojen vertailu	14
3.3 Case-mittaukset	16
3.4 Inventointitulokset 100 metrin osuuksista	17
3.5 Tielaitoksen kalibrointimittaukset	19
3.6 Tulokset kohdekeskiarvoittain	20
3.7 Yhteenveto	24
4. Vaurioitumismallien kehittäminen kestopäälysteisille teille	25
4.1 Vaurioitumisprosessi	25
4.2 Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan mallintaminen	26
4.2.1 Mallintamisen periaatteet	26
4.2.2 Mallien tausta	28
4.2.3 PARIS-mallien kalibrointiaineiston kuvaus	28
4.2.4 Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan ennustemalli	29
4.2.5 Ennustemallin käyttörajoitukset	31
4.2.6 Ennustemallin kalibroinnin vaikutus	32
4.2.7 Mallin tulkinta ja laskentaesimerkki	33
4.3 Kuormituskestävyysvaurioitumisen kehittymisen mallintaminen	36
4.3.1 Mallintamisen periaatteet	36
4.3.2 Vaurioindeksin määrittäminen	36
4.3.3 Kohteiden valintakriteerit	37
4.3.4 Vaurioitumisen kehittymisen funktionaalinen muoto	37
4.3.5 Vaurioitumisnopeuden jakaumat	38
4.3.6 Vaurioitumisnopeuden mallintaminen	40
4.3.7 Vaurioitumisnopeus iän suhteen	40
4.3.7 Mallien tulkinta	41
5. Johtopäätökset ja suositukset	42
6. Kirjallisuus	43
7. Liitteet	44

1. Johdanto

Tien rakenteellinen kunto määritetään ehjälle päällysteelle pudotuspainolaitteella, jolla mitataan tienpinnan taipumaviiva, ns. taipumasuppilo dynaamisen kuormituksen alaisena. Suomessa tieverkon rakenteellista kuntoa seurataan pudotuspainomittauksin kattavan mittausohjelman avulla. Päällysteen ollessa rikki kuvataan rakenteellista kuntoa vaurioitumisasteella, joka saadaan vaurioinventoinnin tuloksena. Tiestön rakenteellista kuntoa kuvaavia tietoja tarvitaan lähinnä tiestön ylläpidon ja korvausinvestointien ohjauksessa, ohjelmoinnissa ja hankinnassa. Projektin tuloksena tulisi löytyä jokaista tehtäväkokonaisuutta palvelevia rakenteen kestävyttä kuvaavia tunnuslukuja ja muuttujia.

Projektin vuoden 1997 tutkimuksissa selvitettiin tien rakenteellista kuntoa kuvaavia pudotuspainolaitteella mitatusta taipumasuppilosta määritettäviä tunnuslukuja. Tulosten perusteella pudotuspainolaitteen taipumasuppilosta laskettava Surface Curvature Index kuvaa sidotun päällysteen väsymisvaurioitumista liikennesäilytyksen vaikutuksesta. Tämä mekanismi ja sen vaikutus tierakenteen kuntoon ja kestoikään tunnetaan melko hyvin. Tuloksena saatiin lisäksi, että on kehitettävä menetelmä lämpötilakorjauksen tekemiseksi koko mitatulle taipumasuppilolle /VTT, 435, 1997/.

Vuoden 1998 aikana projektissa kehitettiin lämpötilakorjausyhtälöt mitatulle taipumasuppilolle sekä yhtälöt päällysteen lämpötilan laskemiseksi tien pintalämpötilan perusteella /VTT, 480, 1999/. Päällysteen lämpötilan avulla mitatut taipumat voidaan korjata vertailulämpötilaan. Koska yhtenä vuoden 1998 tuloksiin perustuvana suosituksena oli, että tulevaisuudessa tulisi mitata taipuma d300 kehitettiin vuoden 1999 aikana lämpötilakorjausyhtälö myös taipumalle d300. Nämä yhtälöt ovat esitetty kokonaisuudessaan luvussa 2. Koska taipuma d300:n mittaaminen päätettiin toteuttaa siirtämällä 450 mm:n etäisyydellä oleva geofoni 300 mm:n etäisyydelle, kehitettiin lisäksi malli taipumien d300 ja d450 laskemiseksi, jotta historialliset ja tulevat pudotuspainomittaus tulokset ovat yhteensovitettavissa.

Kestoikämallien aineistona on käytetty tutkimustason havaintotieaineistoa, joka on vaurioinventoitu kävelen. Tielaitoksen tuotantomittausten vaurioinventointi suoritetaan hitaasti liikkuvasta autosta, joka kokemusten perusteella johtaa erilaiseen lopputulokseen. Kehitetyn vaurioitumisnopeutta ennustavan kestoikämallin käytön edellytyksenä on, että vaurioinventointiaineisto vastaa mallien kehittämiseen käytettyä aineistoa. Vuoden 1999 aikana suoritettiin case-mittauksia, joiden avulla tehtiin eri vaurioinventointimenetelmien vertailu. VTT suoritti syksyllä 1999 case-mittaukset otokselta tiekohteita, jotka olivat Tielaitoksen inventointiohjelmassa vuoden 1999 keväällä. Tavoitteena oli menetelmän kehittäminen vaurioinventointiaineiston normalisoimiseksi vaurioitumismallien tarvitsemaan muotoon sekä aiemmin kerättyjen vauriotietojen kalibroimiseksi siten, että niitä voidaan hyödyntää tieverkon kunnan arvioinnissa. Tulokset on esitetty luvussa 3.

PARIS-projektissa kehitettiin kestoikämallit kuormituskestävyyssvaurioille sekä halkeamien alkamisajankohdan että halkeamien kehittymisnopeuden ennustamiseksi. Kyseiset mallit perustuvat ympäri Eurooppaa kerättyyn havaintotieaineistoon. Ennen mallien käyttöä ne tulisi kalibroida paikallisiin olosuhteisiin. Tien rakenteellinen kunto projektin vuoden 1999 työnä PARIS-projektissa kehitetyt vaurioitumismallit kalibroitettiin pohjoismaisiin olosuhteisiin. Työ suoritettiin yhteistyössä Ruotsin VTI:n (Statens väg- och transportforskningsinstitut) kanssa, koska suomalainen havaintotieaineisto ei yksinään riitä mallien muodostamiseen, vaan tarvittiin myös ruotsalaista havaintotieaineistoa. Kehitetyt pohjoismaisiin olosuhteisiin kalibroidut mallit on esitetty luvussa 4.

2. Pudotuspainomittausten lämpötilakorjaus

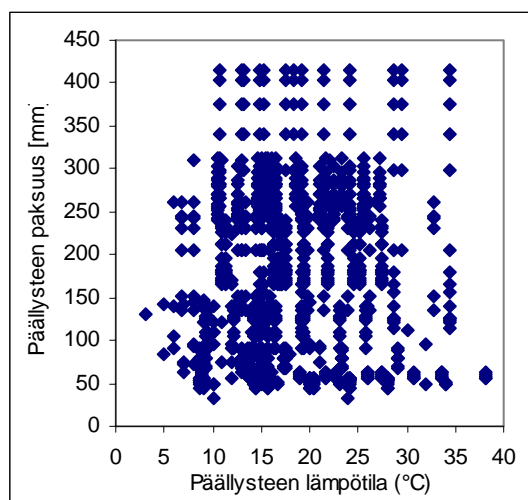
2.1 Tausta

Vuoden 1998 aikana projektissa kehitettiin lämpötilakorjausyhtälöt mitatulle taipumasuppilolle sekä yhtälöt päällysteen lämpötilan laskemiseksi tien pintalämpötilan perusteella /VTT, 480, 1999/. Päällysteen lämpötilan avulla mitatut taipumat voidaan korjata vertailulämpötilaan. Koska yhtenä vuoden 1998 tuloksiin perustuvana suosituksena oli, että tulevaisuudessa tulisi mitata taipuma d300 kehitettiin vuoden 1999 aikana lämpötilakorjausyhtälö myös taipumalle d300. Nämä yhtälöt ovat esitetty kokonaisuudessaan tässä luvussa. Koska taipuma d300:n mittaaminen päätettiin toteuttaa siirtämällä 450 mm:n etäisyydellä oleva geofoni 300 mm:n etäisyydelle, kehitettiin lisäksi malli taipumien d300 ja d450 laskemiseksi, jotta historialliset ja tulevat pudotuspainomittaukset ovat yhteensovitettavissa.

2.2 Kenttämittausaineiston kuvaus

Pudotuspainomittauksia tehtiin yhdeksässä kohteessa Porin ympäristössä, yhteensä 89 mittauspistettä. Koska yhdessä päivässä ei pystytty kattamaan koko haluttua lämpötila-aluetta (noin +5..+35 °C), kussakin pisteessä tehtiin 5 - 14 mittausta 2 - 4 päivän aikana. Kohteiden liikennemäärä vaihteli välillä 1000 - 6300 ajon./vrk. Kohteiden viimeisin päällystys on tehty vuosien 1989 ja 1994 välisenä aikana.

Päällysteen lämpötila laskettiin kolmella eri syvyydellä (25 mm pinnasta, päällystekerroksen puolivälissä ja 25 mm pohjasta) mitatun lämpötilan keskiarvona. Kuvasta 2.1 nähdään, että mittauksissa katettiin koko tavoiteltu lämpötila-alue. Analyttisen teorian mukaan merkittävin lämpötilakorjauksen suuruuteen vaikuttava rakenteellinen tekijä on päällysteen paksuus.



Kuva 2.1. Pudotuspainomittausten päällysteen lämpötilojen ja paksuuksien jakauma.

2.3 Laskennalliset taipumat

Tielaitoksen pudotuspainomittauskäytäntö muuttui vuoden 1999 alusta siten, että 450 mm etäisyydellä kuormituslevyn keskipisteestä oleva anturi siirrettiin 300 mm etäisyydelle. Aikaisempina vuosina mitatun aineiston hyödyntäminen vaatii mallin, jolla voidaan laskennallisesti määrittää taipuma etäisyydellä 300 mm. Vastaavasti tarvitaan malli, jolla tulevaisuudessa voidaan laskennallisesti määrittää taipuma etäisyydellä 450 mm, jota ei enää mitata. Seuraavassa esitetyt regressiomallit perustuvat PARIS projektissa käytettyyn suomalaiseen ja ruotsalaiseen aineiston. Kohteita oli yhteensä 329 kappaletta.

$$d300 = 2.426 + 0.384*d200 + 0.864*d450 - 0.229*d600, (R^2 = 0.99) \quad (2.1)$$

$$d450 = -0.999 - 0.262*d200 + 0.813*d300 + 0.451*d600, (R^2 = 0.99), \quad (2.2)$$

missä	d200 on	taipuma etäisyydellä 200 mm kuormituslevystä, μm
	d300 on	taipuma etäisyydellä 300 mm kuormituslevystä, μm
	d450 on	taipuma etäisyydellä 450 mm kuormituslevystä, μm
	d600 on	taipuma etäisyydellä 600 mm kuormituslevystä, μm .

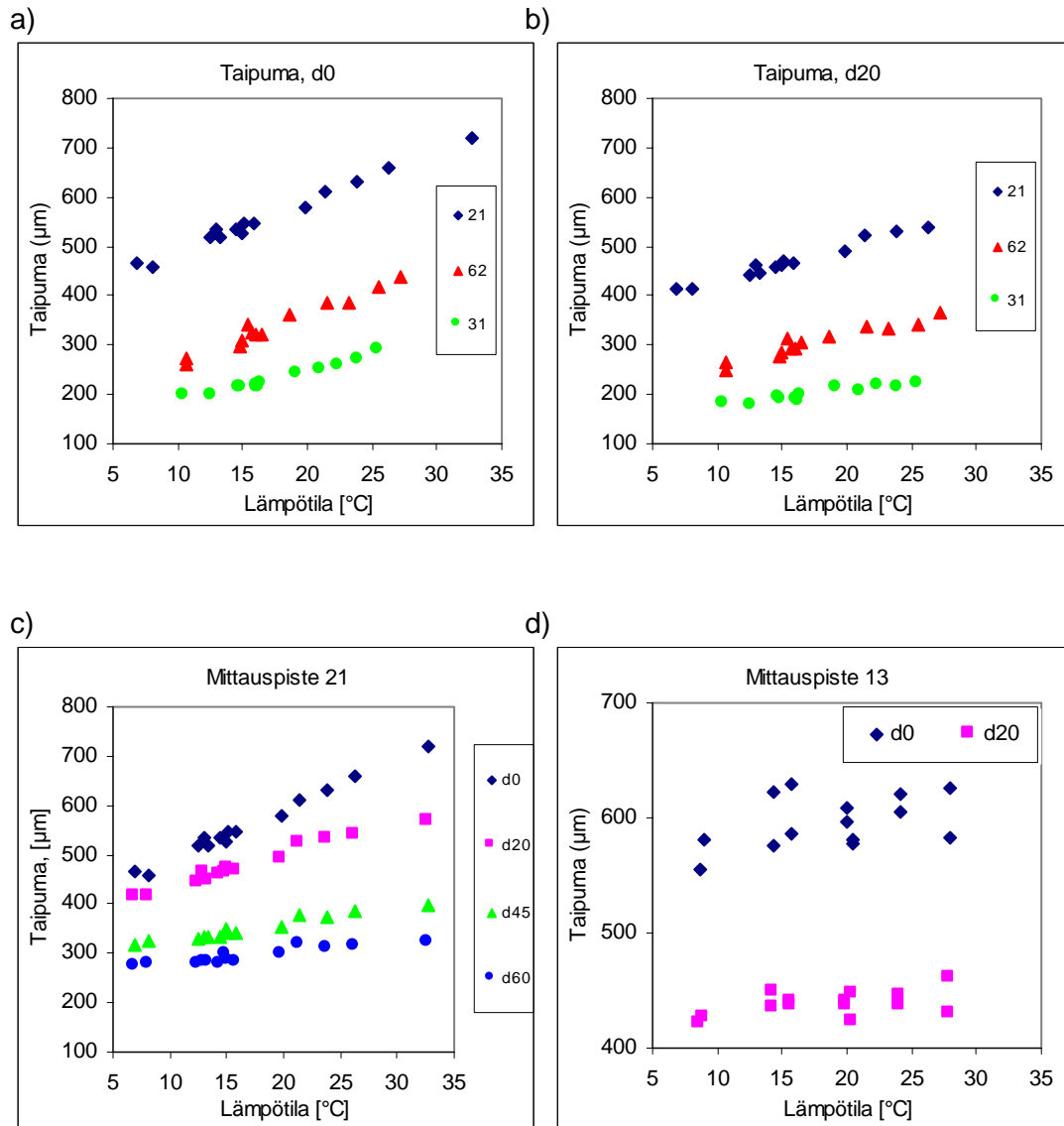
2.4 Taipumien lämpötilakorjausyhtälöt

Tavoitteena oli kenttämittausten perusteella muodostaa yhtälöt lämpötilakorjauksen tekemiseksi koko pudotuspainolaitteella mitatulle taipumasuppilolle. Lämpötilakorjausyhtälö taipumalle d300 luotiin edellämainitulla tavalla muodostetun laskennallisen aineiston perusteella.

Tavoitteen saavuttamiseksi tutkittiin ensiksi, minkälainen päällysteen lämpötilan ja taipuman välinen yhteys on. Koska oli oletettavaa, että eri kohteissa tämä yhteys olisi erilainen, seuraavassa vaiheessa haettiin tekijöitä, jotka selittävät tätä eroa. Edellä todettiin, että rakenteellisista tekijöistä päällysteen paksuus olisi tärkein lämpötilakorjauksen suuruuteen vaikuttava tekijä.

Kullekin mittauspisteelle muodostettiin taipuma-mittauslämpötilakuvaajat, joita on siis kaikkiaan 89 kpl. Niissä tehtiin yhteensä noin 1100 mittausta. Kuvassa 2.2 a) on esitetty esimerkkinä keskitaipuman d0 ja lämpötilan välinen yhteys kolmessa mittauspisteessä. Kuvasta nähdään, että yhteys on varsin hyvä ja lineaarinen. Kuvasta 2.2 b) nähdään, että samoissa kohteissa myös taipuman d200 lämpötilariippuvuus on selkeä ja lineaarinen. Kuvassa 2.2 c) on havainnollistettu sitä, että aineiston perusteella päällysteen lämpötilalla on vaikutusta vielä 600 mm etäisyydellä kuormituslevystä mitattuun taipumaan. Tätä suuremmilla etäisyyksillä vaikutus on pieni ja epämääräinen.

Kuvassa 2.2 d) on havainnollistettu sitä, että osassa kohteista mitatun taipuman ja lämpötilan välinen yhteys on huono. Mikäli yhteys oli huono keskitaipumalle d0, se oli huono myös muille mitatuille taipumille. Kohteista valittiin jatkoanalyysiin sellaiset, joissa selitysaste $r^2 > 0,50$.



Kuva 2.2. Esimerkki taipuman lämpötilariippuvuudesta.

Yksittäisen kohteen (mittauspisteen) lämpötilan ja taipuman välinen yhteys on kuvaajien perusteella lineaarista muotoa:

$$d_x = a \cdot AB_T + b, \quad (2.1)$$

missä d_x on taipuma etäisyydellä x kuormituslevystä, μm
 AB_T päällysteen lämpötila, $^{\circ}\text{C}$
 a, b kertoimia.

Kulmakerroin a kuvaa lämpötilan muutoksen vaikutusta taipumaan. Vakiotermi b kuvaa taipuman absoluuttista tasoa, joka riippuu koko rakenteen jäykkyydestä. Kuvista 2.2 a) - c) havaitaan, että taipuman ja lämpötilan välinen yhteys on erilainen eri kohteissa. Tähän vaikuttaa taipuman absoluuttinen taso, ts. koko rakenteen jäykkyys, mistä syystä jokaiselle mittauspisteelle laskettiin suhteellinen kulmakerroin seuraavasti. Yhteyden (2.1) perusteella laskettiin taipuma $+20^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Suhteellinen kulmakerroin laskettiin jakamalla kaavalla (2.1) laskettu absoluuttinen kulmakerroin a taipumalla $+20^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa:

$$a_{\text{suht}} = a / d_{x20}, \quad (2.2)$$

missä $a_{\text{suht on}}$ suhteellinen kulmakerroin
 a absoluuttinen kulmakerroin
 d_{x20} taipuma etäisyydellä x kuormituslevystä $+20\text{ °C}$ lämpötilassa.

Suhteellinen kulmakerroin kuvaa rakenteen lämpötilaherkkyyttä, ts. kuinka paljon yhden asteen muutos lämpötilassa muuttaa taipumaa prosentteina.

Tämän jälkeen kullekin taipumalle d_0 , d_{200} , d_{300} , d_{450} , d_{600} , d_{900} ja d_{1200} muodostettiin suhteellisen kulmakertoimen ja päällysteen paksuuden välinen yhteys. Yhteydet $d_0 - d_{900}$ on esitetty kuvissa 2.3 a) - f).

Taipumien lämpötilakorjaus tehdään seuraavasti:

Lämpötilakorjattu taipuma saadaan kertomalla mitattu taipuma kunkin anturin kohdalla kertoimella k kaavan 2.3 mukaan:

$$d_{x20} = k * d_T, \quad (2.3)$$

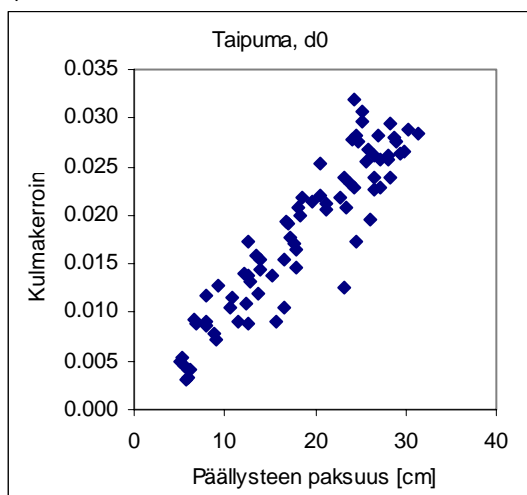
missä d_{x20} on taipuma etäisyydellä x kuormituslevystä $+20\text{ °C}$ lämpötilassa
 k taipuman lämpötilakorjauskerroin
 d_T on taipuma mittaustilassa.

Kerroin k määritetään kaavalla 2.4:

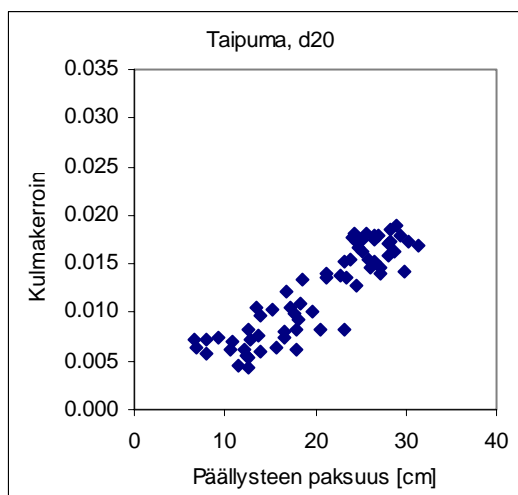
$$k_{dx} = 1 - (AB_T - 20) * (c * AB_{\text{pak}}), \quad (2.4)$$

missä k_{dx} on taipuman korjauskerroin etäisyydellä x kuormituslevyn keskeltä
 AB_T päällysteen lämpötila, °C
 AB_{pak} asfalttipäällysteen paksuus, cm
 c kerroin.

a)

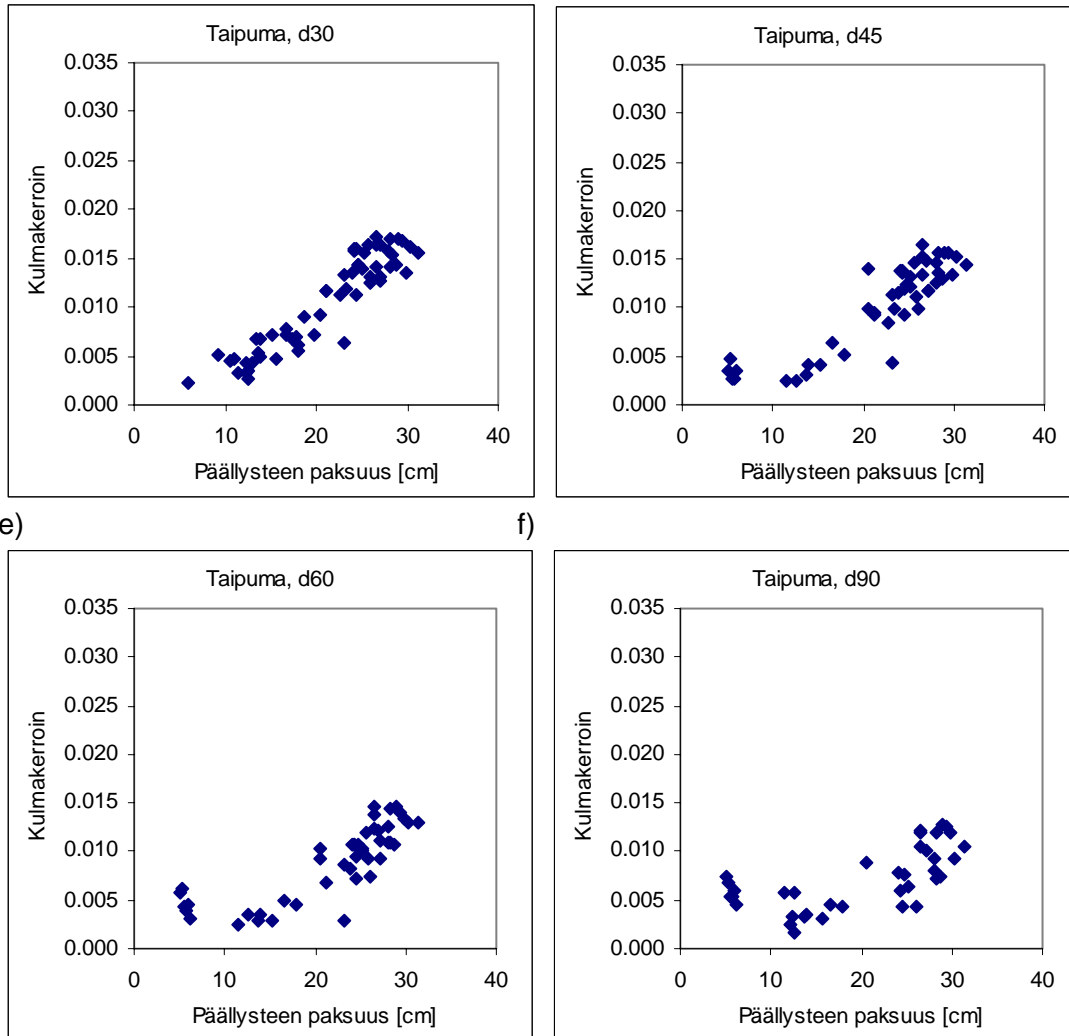


b)



c)

d)



Kuva 2.3. Taipuman lämpötilakorjauksen suhteellisen kulmakertoimen ja päällysteen paksuuden välinen yhteys taipumille d0, d200, d300, d450, d600 ja d900.

Eri taipumamittausanturien korjauskertoimet saadaan kaavoilla (2.5) - (2.9):

$$k_{d0} = 1 - (AB_T - 20) * (0.000975 * AB_pak) \quad (2.5)$$

$$k_{d200} = 1 - (AB_T - 20) * (0.000598 * AB_pak) \quad (2.6)$$

$$k_{d300} = 1 - (AB_T - 20) * (0.000517 * AB_pak) \quad (2.7)$$

$$k_{d450} = 1 - (AB_T - 20) * (0.000476 * AB_pak) \quad (2.8)$$

$$k_{d600} = 1 - (AB_T - 20) * (0.000408 * AB_pak), \quad (2.9)$$

missä k_{dx} on korjauskerroin taipumalle d etäisyydellä x
 AB_T päällysteen lämpötila, °C
 AB_pak päällysteen paksuus, cm.

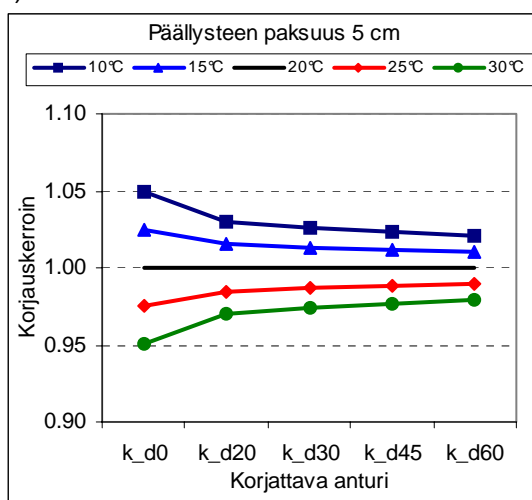
Lopullisten yhtälöiden muodostamiseen käytettiin taulukon 1.1 mukaiset määrät aineistoa. Keskitaipuman korjausyhtälön muodostamiseen käytettiin lähes kaikki mitattu aineisto, ja d600:nkin korjausyhtälön muodostamiseen käytettiin yli puolet mitatusta aineistosta.

Taulukko 1.1. Lämpötilakorjausyhtälöiden muodostamiseen käytetyn aineiston laajuus.

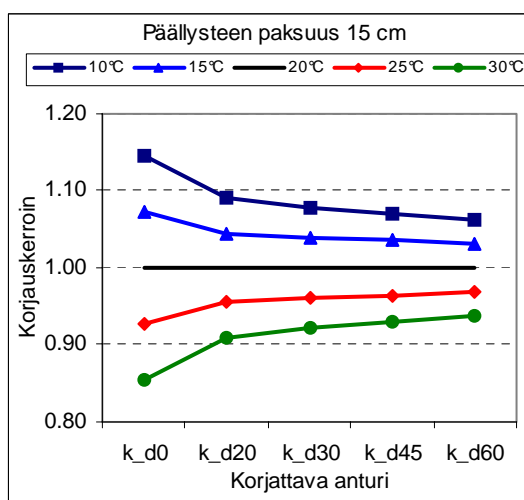
Anturipaikka	Mittauspisteitä
d0	82
d200	71
d300	59
d450	52
d600	50
d900	41
d1200	40

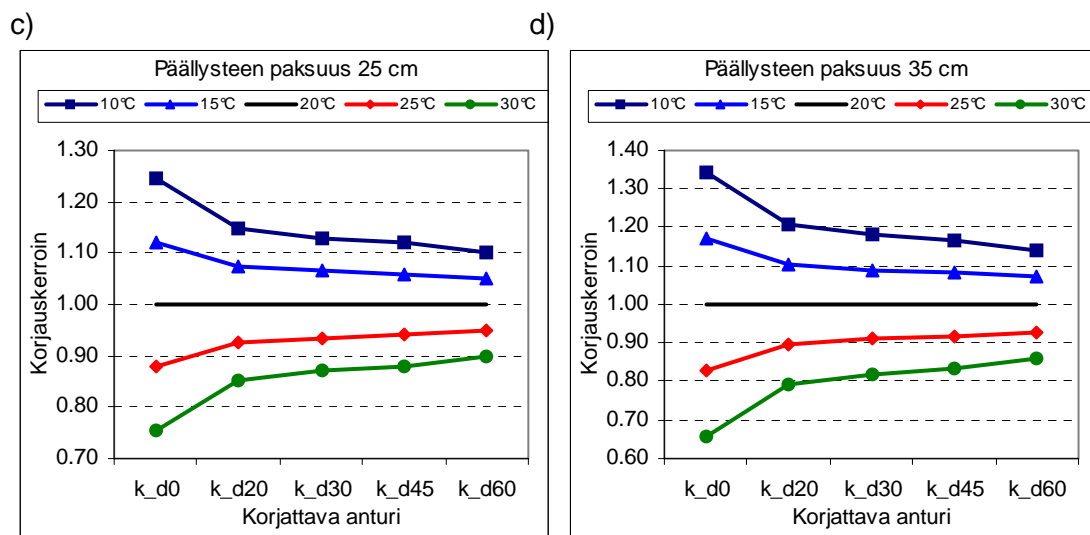
Kuvissa 2.4 a) - d) on esitetty yhtälöiden (2.5) - (2.9) kuvaajat eri päällystepaksuuksilla (5, 15, 25 ja 35 cm). Kuvista havaitaan, että lämpötilakorjaus on suurin keskitaipumalle d0 ja että korjaus pienenee nopeasti kauempana kuormituslevystä. Kuvista ja yhtälöistä havaitaan lisäksi, että lämpötilakorjauksen suuruus riippuu lineaarisesti sekä päällysteen paksuudesta että päällysteen lämpötilasta.

a)



b)



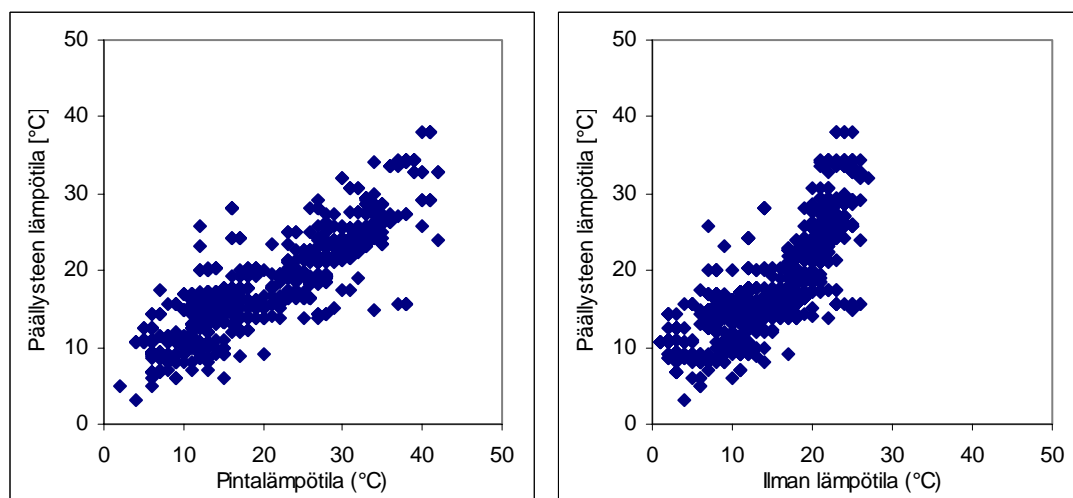


Kuva 2.4. Taipumien lämpötilakorjauskertoimet antureille d0, d200, d300, d450 ja d600, kun päällysteen paksuus on 5, 15, 25 ja 35 cm.

2.5 Päällysteen lämpötilamalli

Kaavoissa (2.5) - (2.9) taipuman lämpötilakorjauksen suuruus riippuu päällysteen lämpötilasta. Sitä ei kuitenkaan voida tuotantomittauksissa käytännön syistä mitata päällysteen sisältä. Päällysteen pintalämpötilan lisäksi päällysteen lämpötilaan vaikuttaa teorian mukaan sen paksuus. Ohuella päällysteellä lämpötilan muutokset ovat nopeampia ja lämpötilaero pinnan ja pohjan välillä pienempi kuin paksulla päällysteellä. Kenttämittausaineistoon kerättiin päällysteen pintalämpötila, ilman lämpötila sekä päällysteen lämpötila. Viimeksi mainittu mitattiin kolmella eri syvyydellä (25 mm pinnasta, päällystekerroksen puolivälissä ja 25 mm pohjasta), joista laskettiin päällysteen (keskimääräinen) lämpötila.

Päällysteen lämpötilaa pyrittiin selittämään päällysteen paksuuden sekä päällysteen pintalämpötilan ja / tai ilman lämpötilan avulla. Kuvassa 2.5 on esitetty päällysteen pintalämpötilan ja päällysteen lämpötilan sekä ilman lämpötilan ja päällysteen lämpötilan välinen yhteys. Päällysteen pintalämpötila selittää päällysteen lämpötilaa paremmin kuin ilman lämpötila, eikä yhdessä käytettynä ilman lämpötila tuonut yhteyteen lisäarvoa.



Kuva 2.5 Päällysteen pintalämpötilan ja päällysteen lämpötilan sekä ilman lämpötilan ja päällysteen lämpötilan välinen yhteys.

Päällysteen lämpötila määritetään sen pintalämpötilan ja päällysteen paksuuden perusteella kaavasta (2.10), ja tämän lämpötilan perusteella tehdään taipumien lämpötilakorjaus kaavoilla (2.5) - (2.9).

$$\mathbf{AB_T = 7.07 + 0.564 * PINTA_T - 0.017 * AB_pak}, (R^2 = 0,76), \quad (2.10)$$

missä AB_T on päällysteen lämpötila, °C
PINTA_T päällysteen pintalämpötila, °C
AB_pak päällysteen paksuus, cm.

Analyttisen teorian mukaan päällysteen paksuus vaikuttaa päällysteen lämpötilaan. Kaavasta (2.12) havaitaan, että tämän aineiston perusteella päällysteen paksuuden vaikutus päällysteen lämpötilaan on enimmillään 0,2 °C. Tämän vuoksi malli muodostettiin myös pelkästään päällysteen pintalämpötilan ja päällysteen lämpötilan välille:

$$\mathbf{AB_T = 6.78 + 0.564 * PINTA_T}, (R^2 = 0,75), \quad (2.11)$$

missä AB_T on päällysteen lämpötila, °C
PINTA_T päällysteen pintalämpötila, °C.

Päällysteen lämpötila voidaan laskea myös pelkästään ilman lämpötilan perusteella, mutta yhteys on huonompi kuin yhtälöillä (2.10) ja (2.11):

$$\mathbf{AB_T = 6.57 + 0.780 * ILMA_T}, (R^2 = 0,65), \quad (2.12)$$

missä AB_T on päällysteen lämpötila, °C
ILMA_T päällysteen pintalämpötila, °C.

3. Mittausdatan normalisointi ja kalibrointi

3.1 Tavoitteet

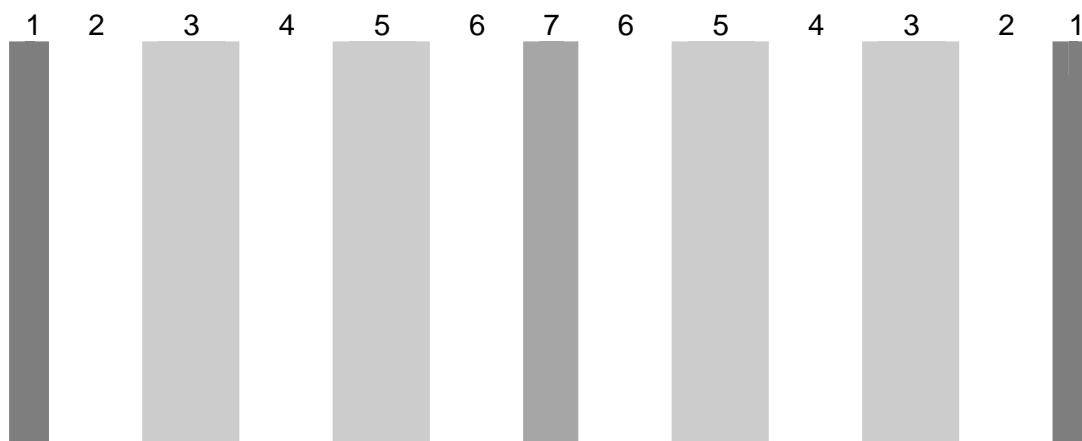
Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää millä tavalla kestoikämallien muodostamiseen käytetyn SHRP-vaurioinventointimenetelmän /SHRP, 1993/ tulokset ja Tielaitoksen tuotantomittausten vaurioinventointitulokset /Tielaitos, 1994/ poikkeavat toisistaan. Oletuksena oli, että koska tuotantomittausten vaurioinventointi suoritetaan liikkuvasta autosta niin osa tiessä esiintyvistä vaurioista jää toteamatta.

Osatehtävän tavoitteena on kehittää menetelmä vaurioinventointiaineiston normalisoimiseksi vaurioitumismallien tarvitsemaan muotoon sekä aiemmin kerättyjen vauriotietojen kalibroimiseksi siten, että niitä voidaan hyödyntää tieverkon kunnon arvioinnissa. Pohjoismaisia vaurioitumismalleja varten havaintotiet on inventoitu tutkimustarkoituksiin mahdollisimman tarkasti. Tielaitoksen kuntotietorekisterin aineisto olisi saatava yhteismitalliseksi tutkimuksessa käytetyn aineiston kanssa. Seuraavassa on kuvattu edellämainitut vaurioiden kirjaamismenetelmät ja niiden väliset erot pääpiirteittäin sekä case-mittausten tulokset.

3.2 Vaurioinventointitapojen vertailu

Vaurion sivusijainti

Ajouriin syntyvät vauriot ovat pääasiassa liikenerasituksen aiheuttamia vaurioita ja niiden ulkopuolelle syntyvät vauriot aiheutuvat pääasiassa ilmaston vaikutuksesta. Projektitasolla vaurioiden sivusijainti erotellaan tästä syystä ajourissa ja niiden ulkopuolella oleviin vaurioihin kuvan 3.1 mukaisesti. Verkkotasolla halkeamien sivusijaintia ei tällä hetkellä erotella.



- 1 = reunavaurio
- 2 = oikean pyöräuran ja pientareen väli
- 3 = oikea pyöräura
- 4 = pyöräurien väli
- 5 = vasen pyöräura
- 6 = keskisauman ja vasemman pyöräuran väli
- 7 = keskisauman halkeama

Kuva 3.1. Vaurioiden sivusijainnin erottelutapa.

Vauriotyypit

Inventoitavien vauriotyyppien osalta ei menetelmien välillä ole merkittäviä eroja mutta halkeamien vakavuusasteluokituksessa sen sijaan on eroja. Projektitasolla kaikki vauriot luokitellaan kolmeen vakavuusasteeseen, kun sitävastoin verkkotasolla luokkia on yksi tai kaksi. Myös vaurioindeksin laskentakaavassa 3.1 /Tielaitos, 1994/ ja 3.2 /PARIS, 1999/ on merkittäviä eroja. Molemmat lasketaan 100 metrin osuudelle, mutta suurimmat erot johtuvat siitä, että Tielaitoksen verkkotason kaavalla laskettu vauriosumma (VS) sisältää kaikki eri vauriotyypit ja sijainnit samassa indeksissä. Indeksi sisältää siis kaikki eri vaurioitumismekanismit, mikä johtaa ongelmiin, kun vaurioitumista pyritään ennustamaan. PARIS-projektin tuottamalla kaavalla laskettu vaurioindeksi (CI) sisältää ainoastaan liikenneperäiset vauriot. Pääasiallinen vaurioitumismekanismi näillä vaurioilla on väsyminen, jolla ymmärretään toistuvien liikennekuormitusten aiheuttamaa päällysteen murtumista. Tätä vaurioitumisprosessia, ja siksi myös vaurioindeksiä (CI), on huomattavasti helpompi ennustaa kuin edellämainittua vauriosummaa (VS).

Tielaitoksen kaava:

$$VS = [0,1*5*(V_{pak}) + 0,5*5*(V_{poi/k}) + 1*5*(V_{poi/l}) + 0,5*(V_{pit/k}) + 1*(V_{pit/l}) + 0,1*(V_{sau/k}) + 0,5*(V_{sau/l}) + 1*(V_{ver}) + 1*(V_{rei}) + 1*(V_{pur})], \quad (3.1)$$

missä

VS = vauriosumma
 V_{pak} = pakkaskatko
 $V_{poi/k}$ = poikkihalkeama / kapea
 $V_{poi/l}$ = poikkihalkeama / leveä
 $V_{pit/k}$ = pituushalkeama / kapea
 $V_{pit/l}$ = pituushalkeama / leveä
 $V_{sau/k}$ = saumahalkeama / kapea
 $V_{sau/l}$ = saumahalkeama / leveä
 V_{ver} = verkkohalkeama
 V_{rei} = reikä
 V_{pur} = purkautuma.

PARIS-projektin kaava:

$$CI = 2 * ACr + LCr + TCr \quad (3.2)$$

$ACr = ACr_L + 1,5 * ACr_M + 2 * ACr_H$
 $LCr = LCr_L + 1,5 * LCr_M + 2 * LCr_H$
 $TCr = TCr_L + 1,5 * TCr_M + 2 * TCr_H$,

missä

CI = kuormituskestävyysvaurioindeksi
ACr = verkkohalkeama ajourassa
LCr = pituushalkeama ajourassa
TCr = poikkihalkeama ajourassa
L = matala vakavuusaste
M = keskinkertainen vakavuusaste
H = korkea vakavuusaste.

On huomattava, että tässä esimerkissä esitetyt kertoimet eivät ole yleispäteviä, vaan kertoimet riippuvat käytettävästä inventointitavasta. Nämä kertoimet tukevat PARIS-tutkimuksessa käytettyä projektitasoista inventointitapaa, jossa vauriokartoitus tehdään

kävellen, vauriot luokitellaan kolmeen vakavuusasteeseen, jne. Tästä syystä Tielaitoksen inventointitapaan soveltuvat kertoimet oli tarkoitettu muodostaa vuoden 1999 tutkimuksissa tehtyjen case-mittausten avulla.

3.3 Case-mittaukset

Vaurioinventointiaineiston normalisoimiseksi VTT teki case-mittauksia syksyllä 1999 (vauriokartoitus), joiden avulla tehtiin tielaitoksen kevään tuotantomittausaineiston ja VTT:n tekemien mittausten vertailu. Tielaitoksen kuntotietoaineistosta valittiin tutkimukseen keväällä 1999 vaurioinventoituja teitä. Kohteet valittiin vaurioinventoinnin suorittamisen jälkeen. Kohteet valittiin siten, että niissä esiintyy kaikki vauriotyypit ja vakavuusasteet ovat mahdollisimman hyvin edustettuina ja vauriosumma vaihtelee pienestä suureen.

Tielaitoksen kuntorekisteriä (KURRE) varten tekemät vaurioinventoinnit suoritetaan hiljaa liikkuvasta autosta. Vauriot rekisteröidään paneelin avulla suoraan mikrolle. Valaistusolosuhteilla on suuri merkitys autosta tehtävässä inventoinnissa. Samalta tieltä voidaan saada huomattavasti erilainen vauriosumma, jos valaistusolosuhteet poikkeavat inventointikertojen välillä. Tielaitoksen vaurioinventoinnissa ei erotella vaurion sivusijaintia eli ei tiedetä onko vaurio ajourassa vai uran ulkopuolella.

VTT:n tekemä vauriokartoitus on suoritettu kävellen. Matkat on mitattu mittapyörällä. Kävellen inventoitaessa valaistusolosuhteilla ei ole kovin suurta merkitystä. Vauriot on jaettu vakavuusasteeltaan kolmeen luokkaan. Autosta inventoitaessa ei päästä näin tarkkaan jakoon. VTT:n inventoinnissa erotellaan urassa olevat ja urien ulkopuolella olevat vauriot.

Kohteet valittiin Turun, Hämeen, Keski-Suomen, Savo-Karjalan ja Vaasan tiepiirien alueelta. Turun piiri edustaa leudointia ilmastoaluetta ja Savo-Karjala suurinta pakkasmäärää. Kohteiden sijainti, pituus ja vaurioitumisaste on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1. Case-mittauskohteet.

Piiri	Tiennumero	Tieosa	Pituus (m)	Vauriosumma Min, Max (m ²)	Vauriosumma ka. (m ²)
2	261	3	900	8, 38	22
2	12608	2	500	36, 71	49
2	12691	2	800	9, 73	37
2	12883	2	600	4, 51	21
4	249	10	1300	15, 73	41
4	3172	1	500	51, 101	79
4	14043	1	500	39, 138	73
8	6	411	500	52, 81	66
8	23	417	400	6, 72	30
8	72	24	500	2, 50	21
8	73	2	400	10, 42	29
8	88	28	500	13, 46	34
8	88	29	500	27, 76	54

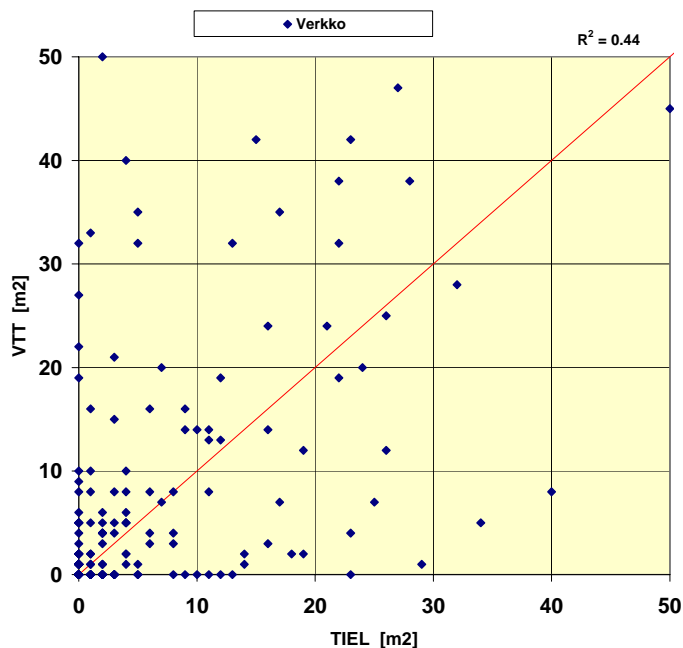
Taulukko 3.1 (jatkuu). Case-mittauskohteet.

Piiri	Tiennumero	Tieosa	Pituus (m)	Vauriosumma Min, Max (m ²)	Vauriosumma ka. (m ²)
8	504	3	600	4, 109	42
8	566	2	400	7, 66	43
8	566	3	500	20, 37	31
8	588	1	500	16, 69	40
8	15669	3	500	16, 45	30
9	13	128	700	12, 64	29
9	24	18	600	12, 56	29
9	58	24	500	3, 15	9
9	6403	1	800	25, 61	45
10	16	26	800	4, 57	26
10	19	20	600	19, 85	38
10	86	1	800	5, 47	25
10	717	3	700	25, 70	46
10	733	1	800	13, 52	24
10	749	12	500	12, 44	26
10	6900	1	800	17, 84	53

3.4 Inventointitulokset 100 metrin osuuksista

Verkkohalkeamat

Kuvassa 3.2 on esitetty kohteilta inventoidut verkkohalkeamat 100 m osuuksina. Tielaitoksen tulos on x-arvona ja VTT:n tulos on y-arvona.



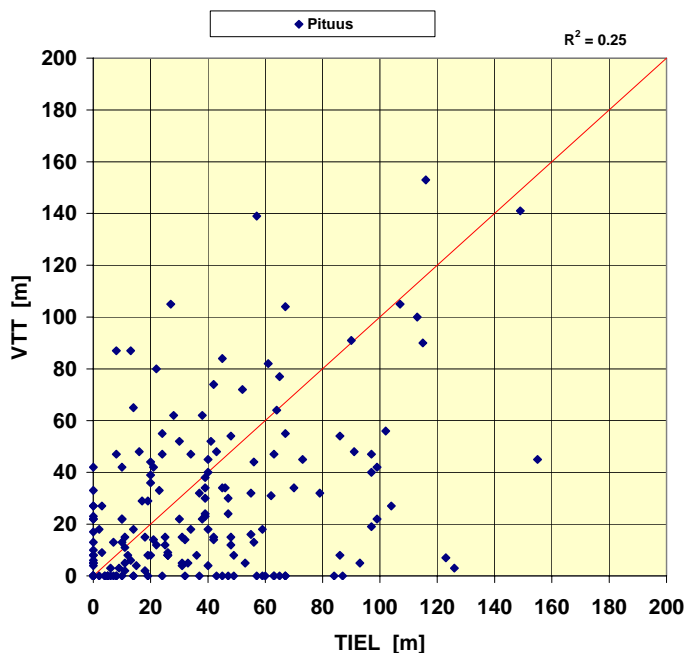
Kuva 3.2. Kaikkien kohteiden verkkohalkeamien inventoinnit 100 m osuuksina.

Inventoitujen verkkohalkeamien neliömetrimäärät poikkeavat toisistaan selvästi Tielaitoksen ja VTT:n tekemissä inventoinneissa. Kappalemääräisesti enemmän löytyy kohteita, joissa

VTT:n inventoima neliömäärä on suurempi. Useassa kohteessa ainoastaan toinen inventoija (TIEL tai VTT) on inventoinut verkkohalkeamaa. Tässä tapauksessa toinen on saattanut inventoida saman vaurion pituushalkeamana.

Pituushalkeamat

Kuvassa 3.3 on esitetty kohteilta inventoidut pituushalkeamat 100 m osuuksina. Tielaitoksen tulos on x-arvona ja VTT:n tulos on y-arvona.

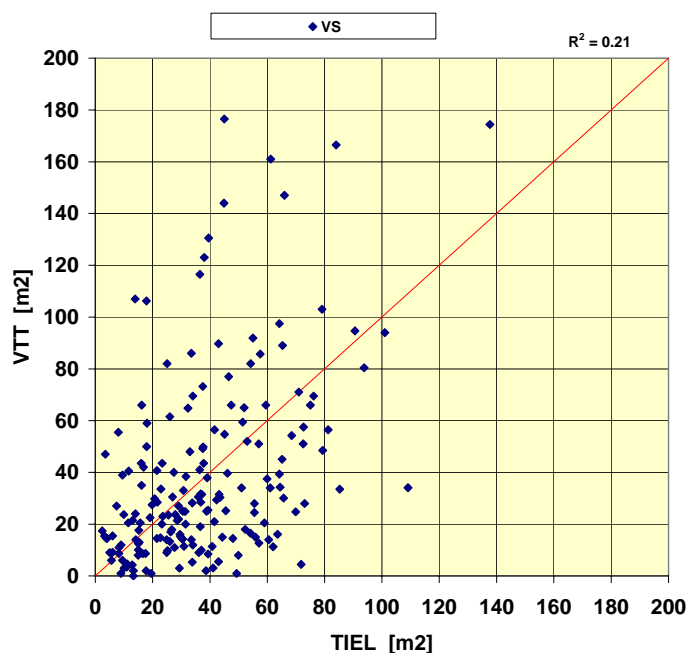


Kuva 3.3. Kaikkien kohteiden pituushalkeamien inventoinnit 100 m osuuksina.

Pituushalkeamien osalta on runsaasti kohteita, joissa Tielaitoksen ja VTT:n inventoimat pituushalkeamien määrät poikkeavat paljon toisistaan. Kappalemääräisesti on enemmän kohteita, joissa Tielaitos on inventoinut enemmän pituushalkeamaa kuin VTT. Pituushalkeamat ja verkkohalkeamat ovat saattaneet mennä ristiin inventoitaessa, minkä takia niitä pitää tarkastella rinnakkain.

Vauriosumma

Kuvassa 3.4 on esitetty kohteiden vauriosumma 100 m osuuksina. Tielaitoksen tulos on x-arvona ja VTT:n tulos on y-arvona. Vauriosummat on laskettu samalla tavalla molemmille inventoinnille (kaava 3.1).



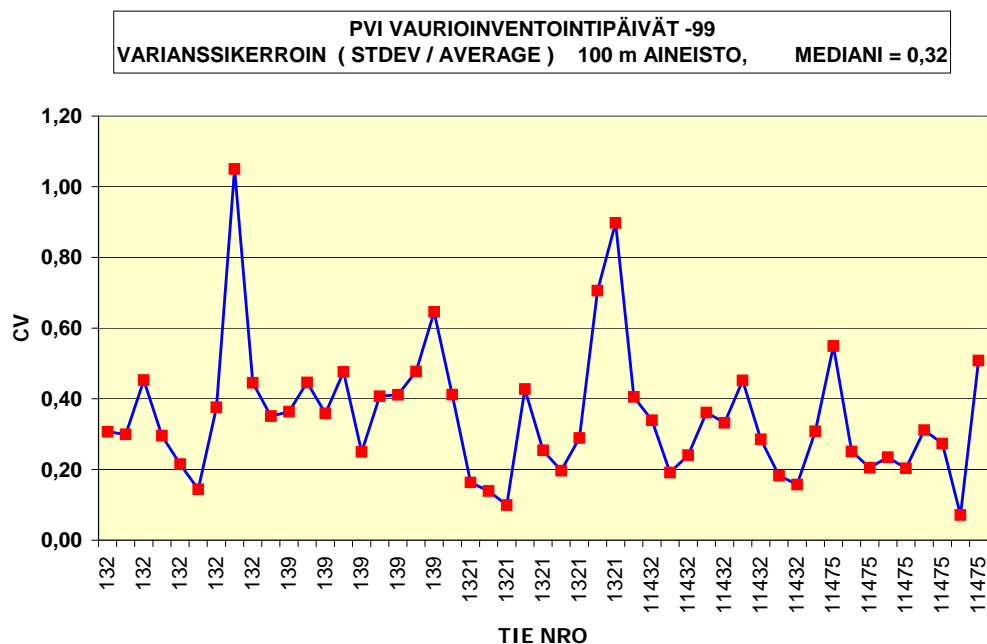
Kuva 3.4. Kaikkien kohteiden vauriosummat 100 m osuuksina.

100 m osuuksien vauriosummien (m^2) välillä ei ole selvää riippuvuutta Tielaitoksen ja VTT:n mittauksissa. Kohteissa, joissa vauriosumma on pieni, Tielaitoksen inventoitu vauriosumma on keskimäärin suurempi. Vastaavasti kohteissa, joissa vauriosumma on suuri, VTT:n inventoitu vauriosumma on suurempi kuin Tielaitoksen. Tämän aineiston hajonta kuvaa vaurioinventointiin liittyvää epätarkkuutta, mikä heikentää aineiston käyttökelpoisuutta mallinnuksessa.

3.5 Tielaitoksen kalibrointimittaukset

Tielaitoksen PVI-mittauspäivillä on tehty kalibrointimittauksia useana vuonna, joissa on selvitetty tuotantomittausten laatua.

Kuvassa 3.5 on esitetty 14 mittausryhmän tuloksista laskettu variaatiokerroin. Tämän aineiston mediaani varianssikertoimelle on 0.32, joka edustaa normaalia vaurioinventoinnin hajontaa. Varianssikerroin on laskettu jokaiselle 100 m osuudelle erikseen. Vaurioinventointiaineiston mallintaminen on epätarkkaa, kun ryhmien välinen hajonta on näin suurta.



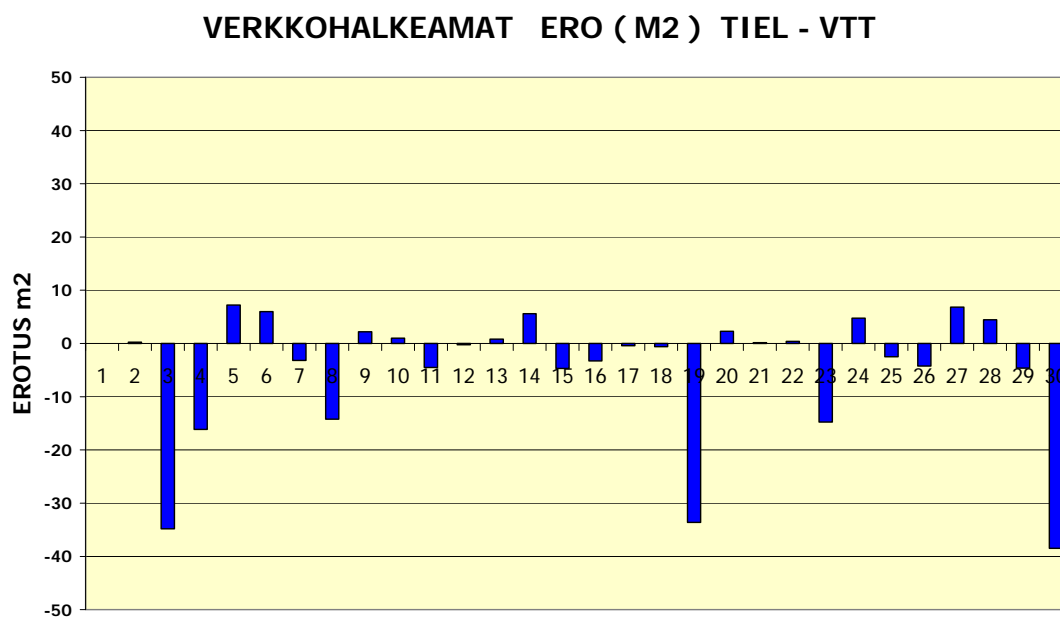
Kuva 3.5. Tielaitoksen PVI-mittauspäivillä on tehty kalibrointimittaukset.

3.6 Tulokset kohdekeskiarvoittain

100 m aineistosta on laskettu kaikille inventointiosuuksille keskiarvo pituushalkeamille, verkkohalkeamille ja vauriosummalle. 100 m aineistossa vauriot voivat kirjautua edelliselle ja seuraavalle 100 m osuudelle, jos esimerkiksi etäisyyden mittauksessa on virhettä. Käyttämällä usean 100 m osuuden keskiarvoa virhettä voidaan pienentää.

Verkkohalkeamat

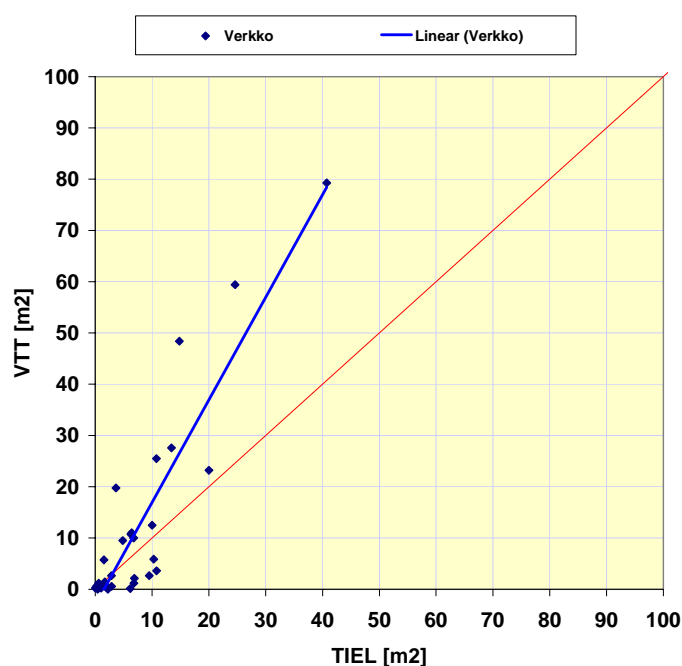
Kuvassa 3.6 on esitetty Tielaitoksen ja VTT:n inventoimien verkkohalkeamien erotus. Arvoina käytetään inventointikohteen pituuden (esim. 500 m) keskiarvoa.



Kuva 3.6. Verkkohalkeamat kohteittain, Tielaitoksen keskiarvo – VTT:n keskiarvo.

Tielaitoksen inventoinnissa verkkohalkeamia on selvästi vähemmän kuudella kohteella. Muilla kohteilla erotus on alle 10 m².

Kuvassa 3.7 on piirretty tulokset vastakkain XY-kuvaajalle. Pienimmän neliösumman suora asettuu 45 asteen viivan yläpuolelle, koska VTT:n tekemissä inventoinneissa on verkkohalkeamia huomattavasti enemmän kuin tielaitoksen tekemissä inventoinneissa.

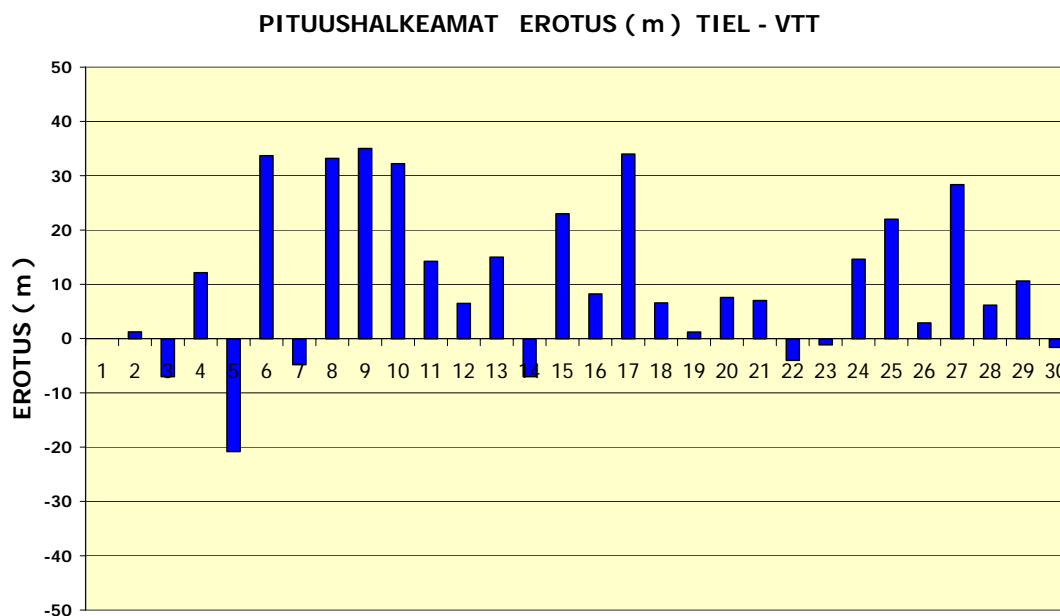


Kuva 3.7. Inventoitujen kohteiden verkkohalkeamien keskiarvot, TIEL vs VTT.

Suurimassa osassa kohteista verkkohalkeamia on alle 10 m². Kohteissa, joissa VTT on inventoinut verkkohalkeamaa yli 20 m², Tielaitoksen mittauksessa verkkohalkeamaa on huomattavasti vähemmän.

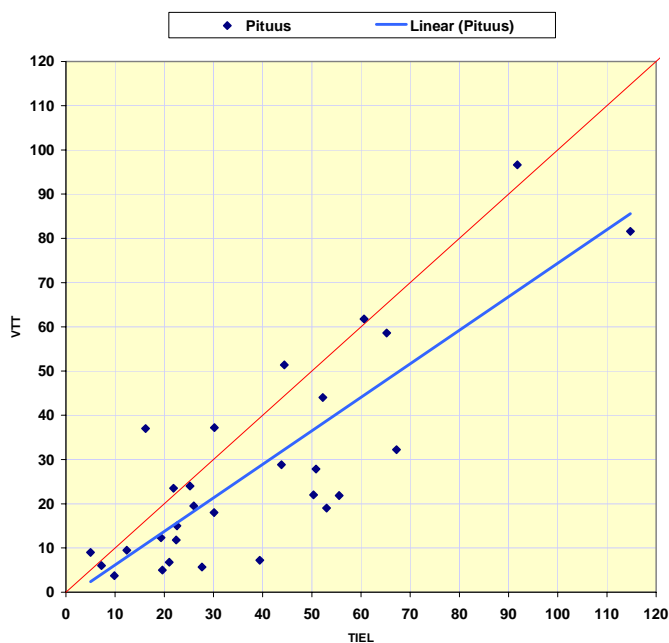
Pituushalkeamat

Kuvassa 3.8 on esitetty Tielaitoksen ja VTT:n inventoimien pituushalkeamien erotus. Arvoina käytetään inventointikohteen pituuden (esim. 500 m) keskiarvoa.



Kuva 3.8. Pituushalkeamat kohteittain, Tielaitoksen keskiarvo – VTT:n keskiarvo.

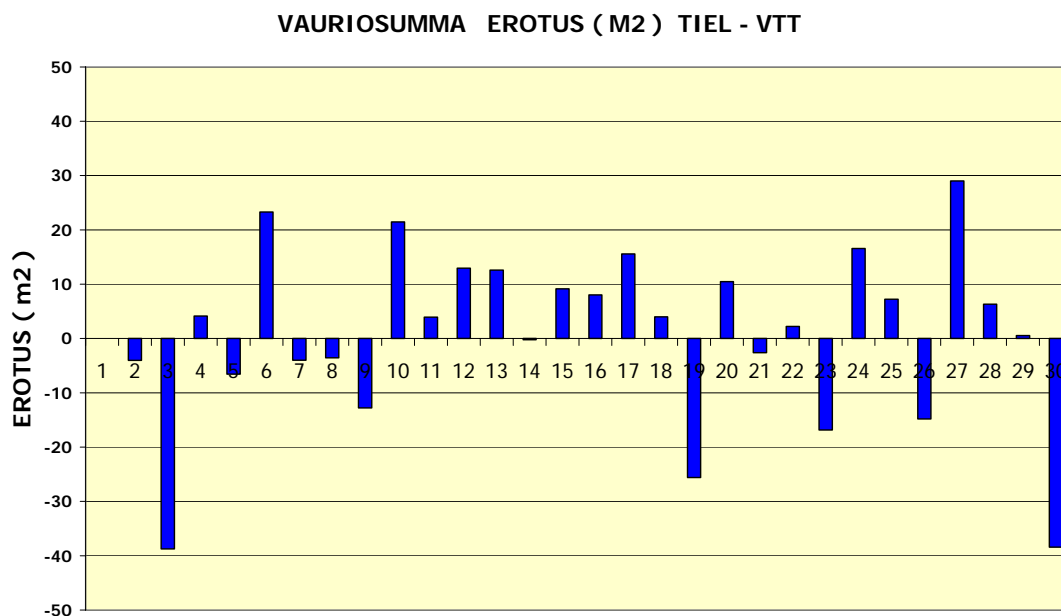
Kuvassa 3.9 on piirretty tulokset vastakkain XY-kuvaajalle. Pienimmän neliösumman suora asetuu 45 asteen viivan alapuolelle, koska TIEL:n tekemissä inventoinneissa on pituushalkeamia huomattavasti enemmän kuin VTT:n tekemissä inventoinneissa.



Kuva 3.9. Inventoitujen kohteiden pituushalkeamien keskiarvot, TIEL vs VTT.

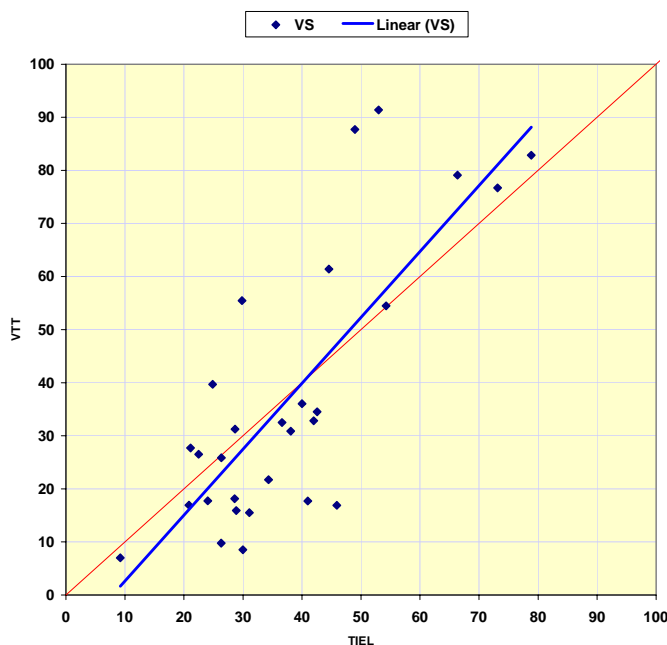
Vauriosumma

Kuvassa 3.10 on esitetty Tielaitoksen ja VTT:n inventoinneista lasketun vauriosumman erotus. Arvoina käytetään kohteen keskiarvoa. Vauriosumma on laskettu samalla tavalla molemmille inventoinneille (kaava 3.1).



Kuva 3.10. Vauriosumma kohteittain, Tielaitoksen keskiarvo – VTT:n keskiarvo.

Kuvassa 3.11 on piirretty tulokset vastakkain XY-kuvaajalle. Pisteiden regressiosuora on lähellä 45 asteen suoraa.



Kuva 3.11. Inventoitujen kohteiden vauriosumman keskiarvot, TIEL vs VTT.

Kohteissa, joissa vauriosumma on pieni, tielaitoksen inventoima vauriosumma on ollut suurempi kuin VTT:n inventoima. Tämä johtuu pääasiassa suuremmasta pituushalkeamien määrästä Tielaitoksen inventointituloksissa. Vastaavasti kohteissa, joissa vauriosumma on suuri, VTT:n inventoima vauriosumma on suurempi kuin tielaitoksen. Tämä johtuu VTT:n inventoimasta suuremmasta verkkohalkeamien määrästä.

3.7 Yhteenveto

Kuten edellä esitetystä tuloksista voi todeta, Tielaitoksen ja VTT:n tekemien vaurioinventointien tulosten välillä oli niin paljon hajontaa, että tehtyjen vaurioinventointien perusteella ei voi muodostaa normalisointimalleja. Koska suuret eroavaisuudet esiintyvät kaikissa vauriotyypeissä, ei tilanne muutu vaikka aineisto luokitellaan vauriotyypeittäin. Myöskään inventoitujen kohteiden keskiarvoistaminen ei tuo helpotusta ongelmaan. Kaikki kohteet, joissa oli tehty jokin toimenpide Tielaitoksen ja VTT:n inventoinnin välissä, on poistettu aineistosta ennen analysointia. Aineistossa esiintyvään suureen hajontaan vaikuttavia tekijöitä voi olla useita. Seuraavassa on esitetty näkemyksiä hajontaan vaikuttavista tekijöistä:

Vaurioinventointiajankohdan vaikutus

Koska Tielaitoksen vaurioinventointi suoritettiin keväällä ja VTT:n syksyllä voidaan ajatella, että keväällä routanousun aikana näkyvät halkeamat menevät umpeen kesän aikana, johtaen pienempään vauriomäärään syksyllä suoritettussa vaurioinventoinnissa. Tämä selkeä haitta oli tiedossa projektin suunnitteluvaiheessa, mutta koska valittu aineisto sisälsi ainoastaan AB-päällysteitä (ei PAB-päällysteitä), vaikutuksen oletettiin olevan pieni. Lisäksi toteutetulla menettelyllä saavutettiin selkeä etu aineistoksi valittavan otoksen määrittelyssä. Koska valittavien kohteiden vaurioitumisaste oli tiedossa voitiin aineistoon valita kattavasti eri vaurioitumisasteita. Toisaalta, mikäli vaurioinventointiajankohta vaikuttaisi merkittävästi tuloksiin, tulisi Tielaitoksen tulosten olla johdonmukaisesti suurempia. Tulosten perusteella näin ei kuitenkaan ole.

Vaurioinventointiin sisältyvä ulkopuolisten tekijöiden hajonta

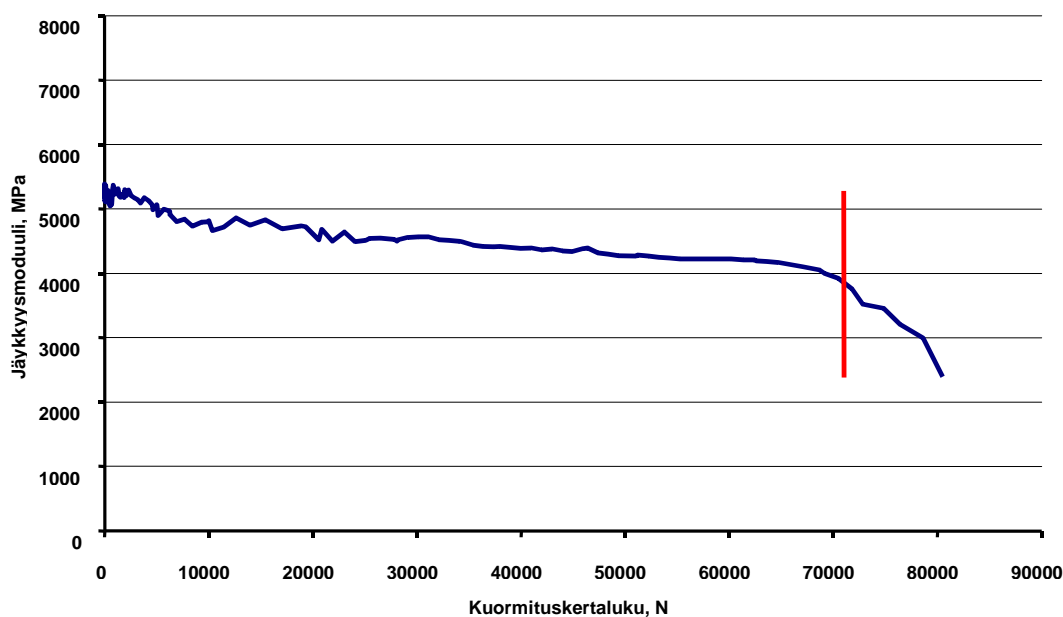
Vaurioinventointia tehtäessä on yleisesti todettuna ongelmana tulosten suuri hajonta, joka voidaan todeta mm. PVI-kalibrointipäivien tulosten suuresta hajonnasta. Hajonta johtuu vaurioinventointitavan lisäksi monesta ns. inhimillisestä tekijästä (valo- ja ilmasto-olosuhteet, kuka inventoi, jne.). Tästä johtuen maailmalla on kehitteillä erilaisia automaattisia vaurioinventointilaitteita, joiden avulla ns. inhimilliset häiriöt voitaisiin minimoida. Koska Tielaitoksen vaurioinventointi suoritetaan hitaasti liikkuvasta autosta ja VTT:n vastaavasti kävellen, voisi olettaa VTT:n tulosten olevan johdonmukaisesti suuremmat. Tulosten perusteella näin ei kuitenkaan ole.

4. Vaurioitumismallien kehittäminen kestopäällysteisille teille

4.1 Vaurioitumisprosessi

Tien vaurioitumiselle on tyypillistä, että lyhyelläkin tieosuudella halkeamat syntyvät eri aikoina useissa paikoissa. Tämä johtuu materiaalien ominaisuuksien, kerrospaksuuksien ja pohjamaan ominaisuuksien vaihteluista. Yhdessä eri kuormitustekijöiden (liikenne, ilmasto) kanssa tämä johtaa monimutkaiseen tierakennesysteemiin, jossa halkeamien syntyminen on luonteeltaan satunnaista. Näin ollen vaurioitumisprosessin hallitseminen edellyttää, että vaurioitumismekanismi tunnetaan riittävän hyvin samoin kuin ne tekijät, jotka vaikuttavat vaurioiden syntymisajankohtaan sekä vaurioiden kasvunopeuteen ja ominaisuuksien vaihteluun.

Kun päällysteen pintaan on ilmaantunut halkeama, käyttäytyy tierakenne toisin kuin ennen vaurioitumista. Tähän on syynä halkeamisesta johtuvat päällysteen epäjatkuvuuskohdat, jolloin sidotut kerrokset eivät toimi samalla tavalla kuormitusta jakavana laattana kuin päällysteen ollessa ehjä. Kuvassa 4.1 on esitetty periaatekuva päällysteen jäykkäysmoduulin kehitymisestä laboratoriossa suoritetun väsytykskokeen aikana. Halkeaman syntyhetkellä jäykkäysmoduuli alkaa laskea nopeasti.



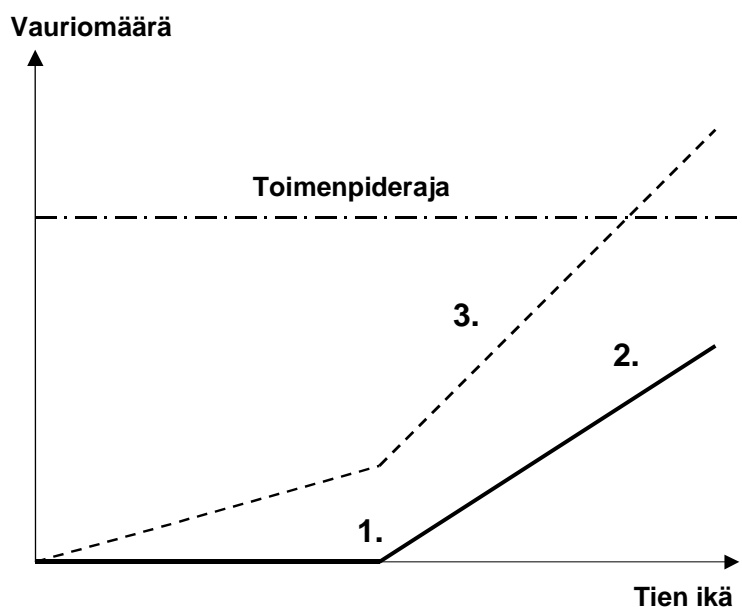
Kuva 4.1. Jäykkäysmoduulin kehittyminen väsytykskokeen aikana.

Vaurioitumisprosessin mallintaminen tuleekin edellä mainituista syistä jakaa kolmeen erilliseen osaan seuraavasti:

1. Tien edellisen rakenteenparantamis- tai päällystämisaikakohdan ja ensimmäisen kuormituskestävyysvaurion (halkeama ajourassa) ilmaantumisen välisen ajan mallintaminen. Tämä tarkoittaa halkeaman syntymistodennäköisyyden mallintamista ajan suhteen.
2. Kuormituskestävyysvaurioiden kehittymisen mallintaminen ehdolla, että vaurioituminen on jo alkanut.

3. Tien kokonaisvaurioitumisen ennustamiseksi tulee yllämainittuihin vaurioihin lisätä ilmastorasituksen aiheuttamat vauriot.

Kuvassa 4.2 on vaurioitumisprosessin osavaiheet havainnollistettu periaatekuvana. Kuvassa kohta 1. kuvaa kuormituskestävyysvaurioiden alkamisajankohtaa ja suora 2. niiden kehittymistä ajassa. Käyrällä 3. kuvataan kokonaisvaurioitumista, kun ilmastovauriot on lisätty kuormituskestävyysvaurioihin.



Kuva 4.2. Tierakenteen vaurioitumisprosessi.

Halkeaman synnyn mallintamiseen voidaan käyttää eloonjäämisanalyysin (Survival Analysis) menetelmiä. Eloonjäämisanalyysin elinajan käsitettä vastaa aika tien rakenteen parantamisesta (tai uudelleenpäällystämistä) ensimmäisen kuormituskestävyyshalkeaman (halkeama ajourassa) ilmaantumiseen. Tämän elinajan mallintaminen on mallintamisen ensimmäinen vaihe. Elinajan päätyttyä tien kuormituskestävyysvaurioituminen jatkuu tien käytön myötä kehittyen tietyllä nopeudella (vaihe 2). Kun tähän vaurioitumiseen lisätään ilmastoperäisten vaurioiden määrä kunnes saavutetaan taso, jolloin on ryhdyttävä korjaustoimenpiteisiin. Korjaustoimenpide päättää mallintamisvaiheen 3.

Seuraavassa tarkastellaan mallintamisen periaatteita yksityiskohtaisemmin. Osavaiheiden 1 ja 2 analysointimenetelmät sekä tulokset on kuvattu kappaleissa 4.2 ja 4.3. Osavaihe 3 käsitellään projektissa vuoden 2000 aikana.

4.2 Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan mallintaminen

4.2.1 Mallintamisen periaatteet

Eloonjäämisanalyysiin perustuvia regressiomallimenetelmää voidaan hyödyntää ensivaurioitumisajankohdan mallintamisessa. Vaurioitumisajankohdan mallintaminen alkaa vauriomäärätelmän valinnalla. Vaurioituneilla kohteilla tarkoitetaan tässä tapauksessa kohteita, joissa esiintyy liikenerasituksesta aiheutuneita vaurioita (kuormituskestävyysvaurioita ajourassa). Vaurioitumisajankohdaksi (Y-muuttuja) määritettiin se kumulatiivinen kuormituskertaluku, joka tiellä on ollut sen edellisestä

rakenteenparantamisesta tai päällystämisestä siihen hetkeen asti, kun tiellä on esiintynyt ensimmäisen kerran liikennekuormitusperäinen vaurio.

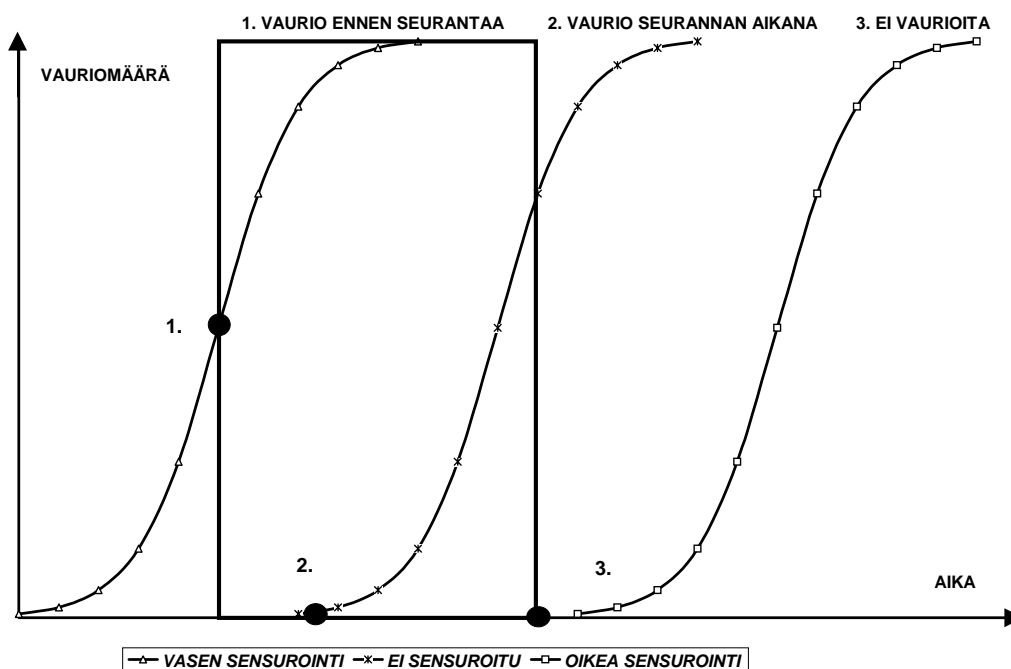
Mallintamisessa voi soveltaa lineaarista mallia havaittujen elinaikojen logaritmiin:

$$\log T_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip} + \sigma \varepsilon_i \quad (4.1)$$

missä T_i on elinikä ensimmäisen vaurion syntyhetkeen
 x_{ij} :t selittävien muuttujien arvoja
 β_j :t aineistosta estimoitavia parametreja.

Virhetermien ε_i oletetaan noudattavan jotain tunnettua jakaumaa.

Eloonjäämisanalyysille tyypillinen piirre on, että kaikkia elinaikoja ei tunneta tarkasti. Tätä on havainnollistettu kuvassa 4.3, jossa on esitetty havaintoaineiston periaatteellinen kuvaus. Tarkastelujaksoa voidaan kuvata ikkunana, josta vain osa vaurioitumisilmioistä on nähtävissä (kuvan kehikko). Osassa tieosuuksia on vaurioita jo tarkastelujakson alussa, kun kohde on valittu tutkimukseen mukaan, jolloin ainoastaan eliniän yläraja eli ikä tarkastelujakson alkaessa on tunnettu. Ilmiötä kutsutaan elinajan vasemmaksi sensuroinniksi, jota esittää kuvan kohta numero 1. Osa tieosuuksista on vaurioitumattomia tarkastelujakson alussa, eikä vaurioita ole ilmaantunut tarkastelujakson aikana. Tällöin ainoastaan eliniän alaraja eli ikä tarkastelujakson päättyessä on tunnettu. Tätä kutsutaan elinajan oikeaksi sensuroinniksi, jota esittää kuvan kohta numero 3. Joidenkin kohteiden vaurioitumisajankohta tiedetään tarkasti, jota on havainnollistettu kuvan kohdassa numero 2. Aineistolle, joka on luokiteltu sensuroituiksi havainnoiksi, voidaan estimaatiomenetelmänä käyttää suurimman uskottavuuden menetelmää (maximum likelihood method).



Kuva 4.3. Tutkimusaineiston periaatteellinen kuvaus eloonjäämisanalyysissä.

Mallien merkitysvyyttä kuvaa suure p (χ^2 -testin merkitysvyystaso), joka kertoo millä todennäköisyydellä muuttujan kertoimen arvo on nolla (muuttujalla ei ole vaikutusta vaurioitumisen synnyn ajankohtaan). Mitä pienempi kuvattu luku on, sitä merkitysvämmen kyseisen muuttujan kerroin poikkeaa nolasta ja sitä enemmän se selittää vaurioitumisen

syntyajankohtaa. Esim. $p = 0.05$ tarkoittaa, että aineistosta saatu kertoimen arvo tai itseisarvoltaan sitä suurempi arvo saadaan nollassa nollahypoteesin vallitessa 5% todennäköisyydellä. Tavallisesti tästä päätellään, että saatu tulos on nollassa nollahypoteesin vallitessa niin harvinainen, että on aihetta uskoa nollassa nollahypoteesi vääräksi. Toisin sanoen muuttuja selittää merkitsevästi kestävyyttä ($0.05=*$, $0.01=**$, $0.001=***$).

4.2.2 Mallien tausta

Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohtamallit kehitettiin eurooppatasolle PARIS projektissa /PARIS, 1999/. PARIS projekti (Performance Analysis of Road Infrastructure) oli 18 organisaation (15 maasta) yhteiseurooppalainen projekti, joka toteutettiin Euroopan Komission osittaisella rahoituksella osana EU:n neljättä puiteohjelmaa (Transport Research and Technological Development Programme of the Fourth Framework Programme of the Commission of the European Communities). Projektissa kehitettiin tien kestoikämalleja, joita voidaan hyödyntää PMS (Pavement Management Systems) järjestelmissä. Mallien kehityksessä käytetty aineisto kattaa eurooppalaiset olosuhteet liikenteen, ilmaston ja materiaalien osalta. Havaintotiekohteita oli kaikkiaan yli 800 kappaletta 15 maasta.

Tässä raportissa esitetyt mallit perustuvat PARIS-projektin malleihin, jotka ovat kalibroituja Suomen olosuhteisiin: Kalibrointi tapahtui yhteistyössä ruotsalaisten (Statens väg- och transportforskningsinstitut, VTI) kanssa käyttäen aineistona sekä TPPT:n että VTI:n havaintotieaineistoja.

4.2.3 PARIS-mallien kalibrointiaineiston kuvaus

Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohtamallit kehitettiin PARIS-mallien pohjalta. PARIS-mallien kalibrointiin käytettiin aineistoa sekä Suomesta että Ruotsista, koska pelkkä kotimainen aineisto ei riitä mallien kehittämiseen. 239 kohteen aineisto jakautuu siten, että 33 kohdetta on Suomesta ja 206 kohdetta on Ruotsista. Kohteista 18 ovat vasen sensuroituja (vaurioituminen tapahtunut ennen seurannan alkua) ja 115 ovat oikea sensuroituja (vaurioituminen ei ole vielä alkanut). Loput 106 kohdetta ovat sensuroimattomia (vaurioituminen alkanut seurannan aikana). Kohteiden ikä, joka lasketaan edellisestä päällystyksestä tai rakenteen parantamisesta, vaihtelee 5 ja 15 vuoden välillä. Kohteita on seurattu tutkimusmielessä 8 – 15 vuoden ajan.

Vaurioitumisen ajankohtaa selittävinä muuttujina tutkittiin seuraavia tekijöitä:

liikenne:	- KKL, KVL ja raskas%
rakennetiedot:	- kerrospaksuudet
taipumat:	- taipumasuppilon eri tunnusluvut
tasaisuus:	- IRI, ura
ilmastotiedot:	- lämpötilasta ja sademäärästä lasketut tunnusluvut
tien ikä:	- edellisestä rakenteenparantamisesta tai päällystyksestä
yhdysvaikutukset:	- kahden muuttujan yhdysvaikutukset.

Vasemmalle sensuroiduissa kohteissa kumulatiivinen kuormituskertaluku on sen vuoden arvo, jolloin kohde tuli seurantaan mukaan. Vastaavasti oikealle sensuroiduissa kohteissa kumulatiivinen kuormituskertaluku on vuoden 1998 arvo. Mikäli kohde on vaurioitunut seurannan aikana, on analyysissä käytetty tähän ajankohtaan kumuloitunutta kuormituskertojen lukumäärää. Kuormituskertaluvut perustuvat tierekisteristä saatuihin arvoihin.

Taipumasuppilot perustuvat pudotuspainolaitteella (PPL) ajourien välistä suoritettuihin mittauksiksi. Mikäli kohteessa on suoritettu useampia mittauksia valittiin niistä se, joka on suoritettu kohteen elinkaaren mahdollisimman alussa. Liitteessä 1 on esitetty aineistosta jakaumatietoja.

4.2.4 Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan ennustemalli

Kehitetty malli on todennäköisyysmalli, jolla vaurioitumista pyritään selittämään rakennetta kuvaavilla tiedoilla ja rakenteeseen kohdistuvia rasituksia kuvaavilla tiedoilla. Mallinnuksen tuloksena päädyttiin samoihin muuttujiin kuin PARIS-projektissa. Parhaiten vaurioitumisen alkamisajankohtaa selitti seuraava malli:

$$N_{10} = 10^{7.22 - 0.0054 * (\text{SCI}300) - 3648000 * \left(\frac{1}{\text{SCI}300 * N_{10} Y} \right)}, \quad (4.2)$$

missä

N_{10} kumulatiivinen kuormituskertaluku vaurioitumisen alkamishetkellä, 100 kN
 SCI300 Surface Curvature Index, d0 - d300, μm
 $N_{10}Y$ keskimääräinen vuosittainen kuormituskertaluku, 100 kN.

Kaava antaa kumulatiivisen kuormituskertaluvun viimeisimmästä kuormituskestävyyteen vaikuttavasta toimenpiteestä (rakenteen parantaminen tai päällystys) vaurioitumisen alkamishetkeen. Kuvassa 4.4 on esitetty ennustemallin tilastolliset tunnusluvut sekä kuvassa 4.5 ennustemallin kuvaajat neljälle eri liikennemäärälle. Kuvaajat on piirretty aineiston tyyppillisille SCI300 alueille eri liikennemääräluokille.

SAS Lifereg Procedure

Dependent Variable=LN10TDR Dependent Variable=LN10TDL

Noncensored Values= 106 Right Censored Values= 115

Left Censored Values= 18 Interval Censored Values= 0

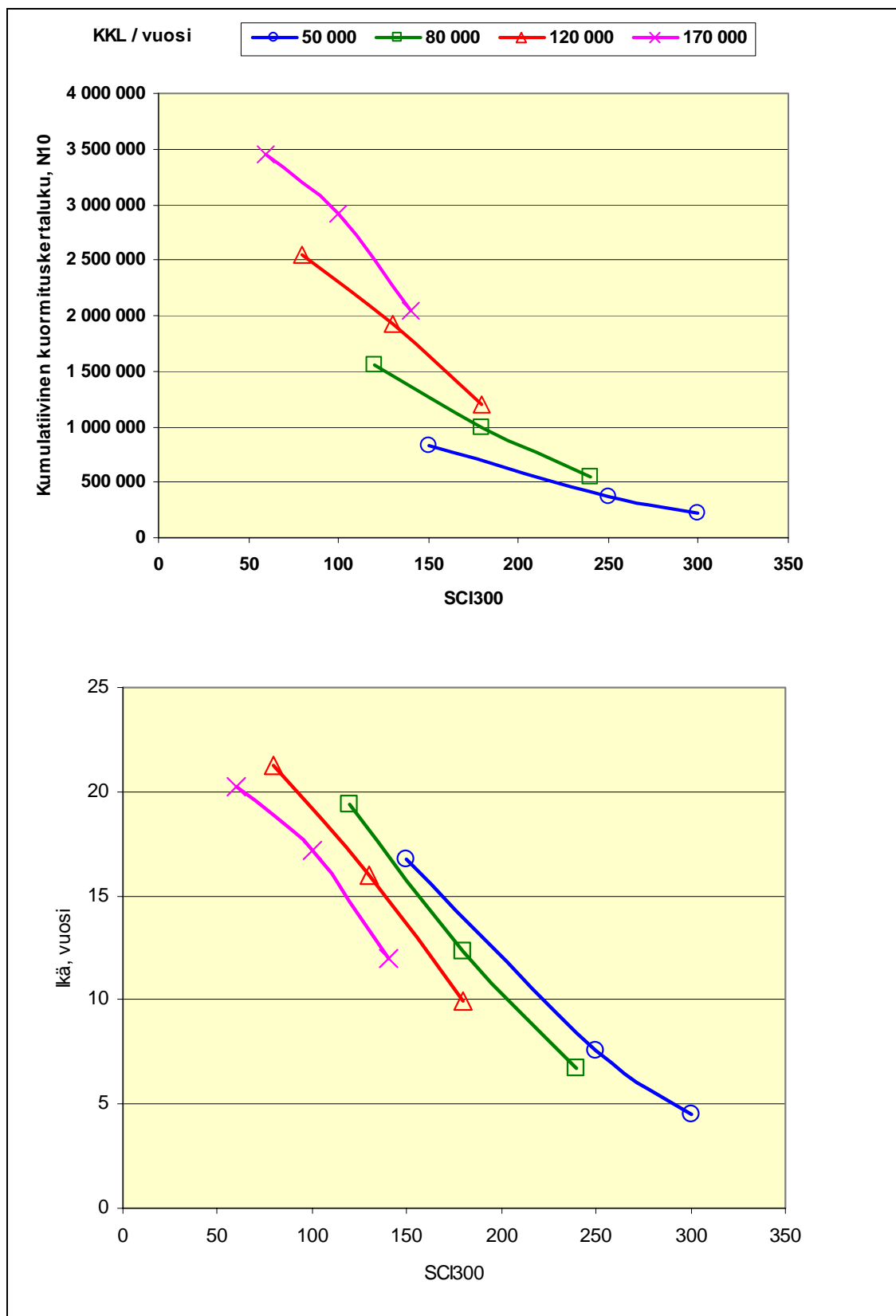
Log Likelihood for WEIBULL -145.8943966

Variable	DF	Estimate	Std Err	ChiSquare	Pr>Chi	Label/Value
INTERCPT	1	7.21910974	0.108148	4455.825	0.0001	Intercept
SCI30	1	-0.0054478	0.000735	54.90617	0.0001	
HSCI30	1	-3647722.3	211026.1	298.7935	0.0001	
SCALE	1	0.30654843	0.02386			Extreme value scale p

Estimated Covariance Matrix:		INTERCPT	SCI30	HSCI30	SCALE
	INTERCPT	0.011696	-0.000074635	-8022.477802	0.000662
	SCI30	-0.000074635	0.000000541	21.938973	-0.000002552
	HSCI30	-8022.477802	21.938973	44532015158	-1275.439657
	SCALE	0.000662	-0.000002552	-1275.439657	0.000569

Estimated Correlation Matrix:		INTERCPT	SCI30	HSCI30	SCALE
	INTERCPT	1.000000	-0.938658	-0.351522	0.256666
	SCI30	-0.938658	1.000000	0.141406	-0.145504
	HSCI30	-0.351522	0.141406	1.000000	-0.253314
	SCALE	0.256666	-0.145504	-0.253314	1.000000

Kuvassa 4.4. Ennustemallin tilastolliset tunnusluvut.



Kuva 4.5. Mallin kuvaajat neljälle eri liikennemäärälle.

4.2.5 Ennustemallin käyttörajoitukset

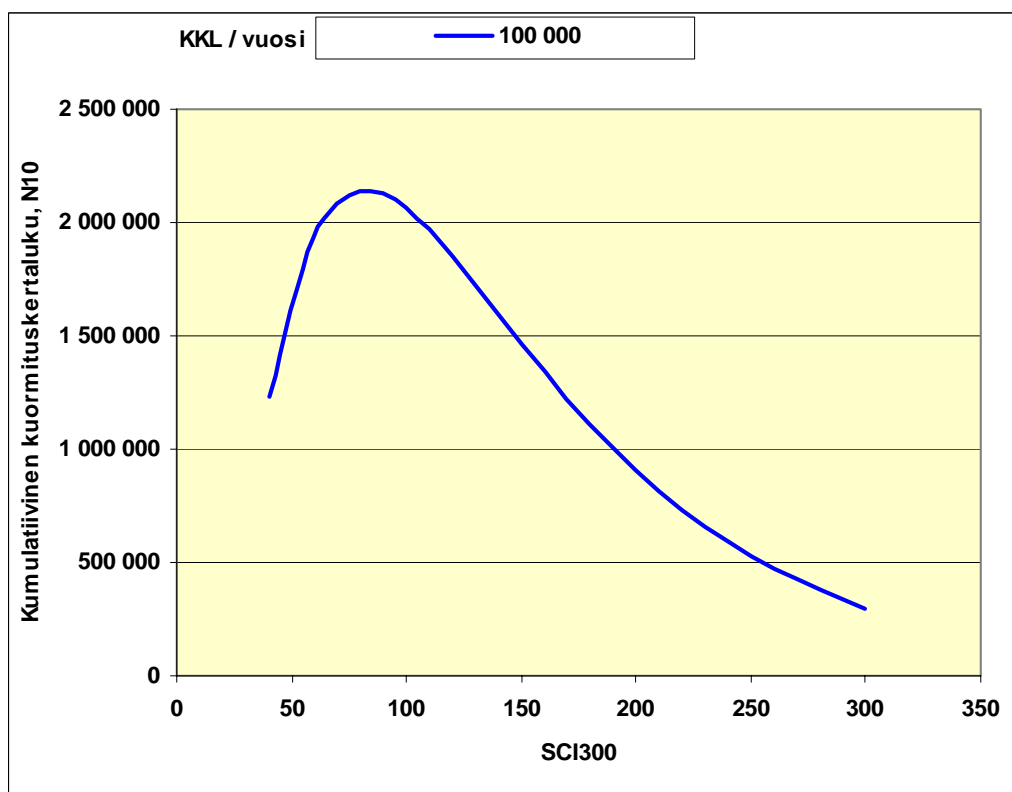
Ennustemallien käytössä on aina huomioitava mallien käyttöalueet ja vastaavasti niiden rajoitukset. Nämä rajoitukset voivat johtua mallien kehittämiseen käytetyn aineiston aiheuttamista rajoituksista (esim. mallit käyttökelpoisia vain aineiston kattamalla alueella) tai, mallinnuksen taustalla olevan teorian aiheuttamista rajoituksista (esim. vaurioitumismekanismi ei ole voimassa). Seuraavassa on esitetty yhtälö, jolla kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohtamallin raja-arvon voi laskea (kaava 4.3).

$$SCI300_{\min} = \sqrt{\frac{3648000}{0.0054 \cdot N_{10} Y}}, \quad (4.3)$$

missä

$SCI300_{\min}$ pienin sallittu Surface Curvature Index, d0 - d300, μm
 $N_{10} Y$ keskimääräinen vuosittainen kuormituskertaluku, 100 kN.

Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohtamalli (kaava 4.2) sisältää toisena selittäjänä yhdysvaikutustekijän, jossa huomioidaan kuinka nopeasti kuormituskertaluku toteutuu. Mikäli kuormitusten lukumäärä toteutuu liian hitaasti, ei väsyminen ole enää primääri vaurioitumismekanismi vaan vaurioituminen syntyy muista syistä. Tämä näkyy käyrän taitepisteinä kuvassa 4.6.



Kuva 4.6. Mallin raja-arvona 100 000 vuotuiselle KKL:lle on $SCI300 = 82\mu\text{m}$.

4.2.6 Ennustemallin kalibroinnin vaikutus

Seuraavassa on esitetty kalibroinnin vaikutus alkuperäiseen PARIS-projektissa kehitettyyn kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan ennustemallin. Alkuperäinen PARIS malli kehitettiin aineistolla, jossa oli dataa 15 Euroopan maasta, on esitetty kaavassa 4.4. Tämä malli kalibroitui aineistolla, joka oli pelkästään Suomesta ja Ruotsista. Uusi kalibroitu malli (kaava 4.5) sisältää samat muuttujat kuin alkuperäinen PARIS malli, mutta kertoimet ovat muuttuneet. Kalibroinnin vaikutusta on kuvattu kuvissa 4.7 ja 4.8 kahdelle eri liikennemäärälle.

PARIS malli:

$$N_{10} = 10^{7.29 - 0.0067 * (\text{SCI}300) - 2280000 * \left(\frac{1}{\text{SCI}300 * N_{10} Y} \right)} \quad (4.4)$$

Uusi Pohjoismaisiin olosuhteisiin kalibroitu malli (kaava 4.2):

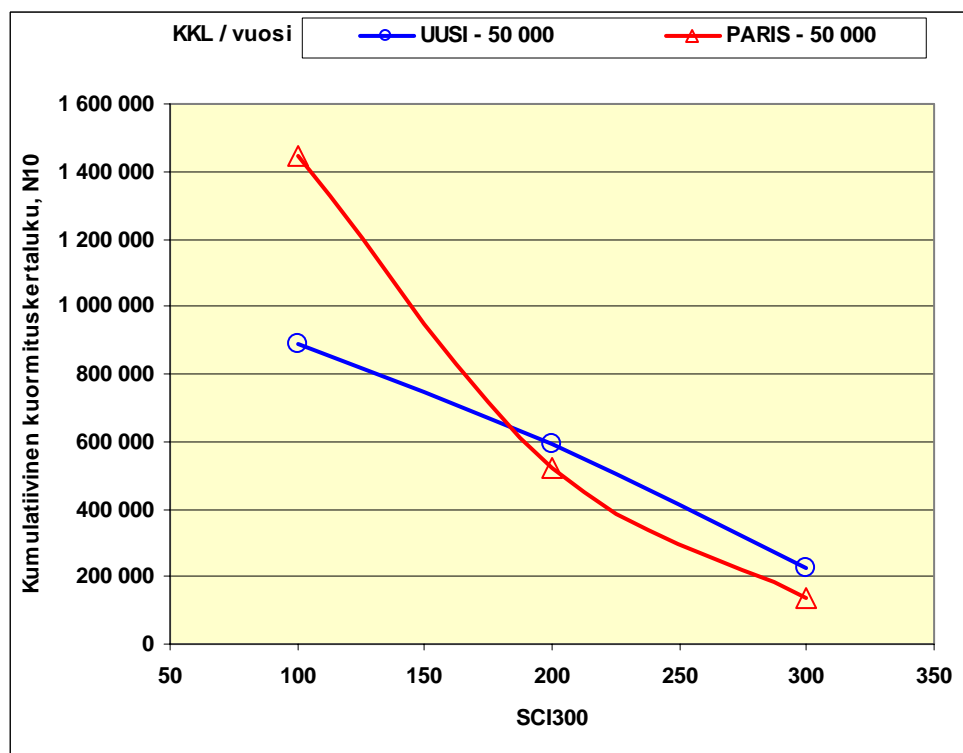
$$N_{10} = 10^{7.22 - 0.0054 * (\text{SCI}300) - 3648000 * \left(\frac{1}{\text{SCI}300 * N_{10} Y} \right)}$$

missä

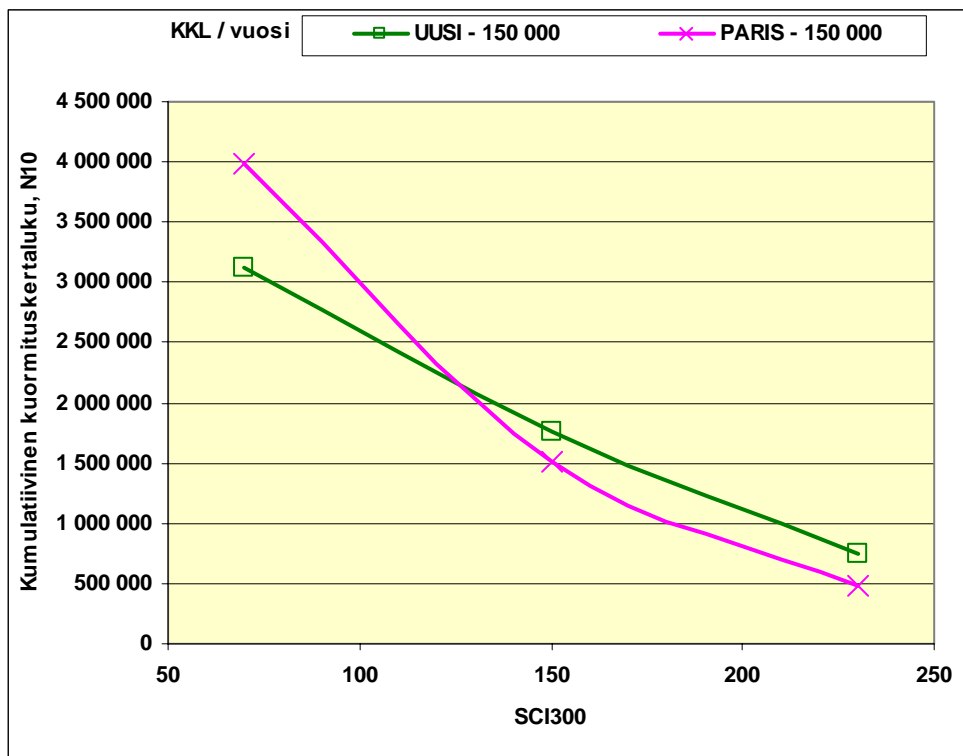
N_{10} kumulatiivinen kuormituskertaluku vaurioitumisen alkamishetkellä, 100 kN

SCI300 Surface Curvature Index, d0 - d300, μm

$N_{10}Y$ keskimääräinen vuosittainen kuormituskertaluku, 100 kN.



Kuva 4.7. Kalibroinnin vaikutus mallin liikennemäärällä KKL = 50 000.

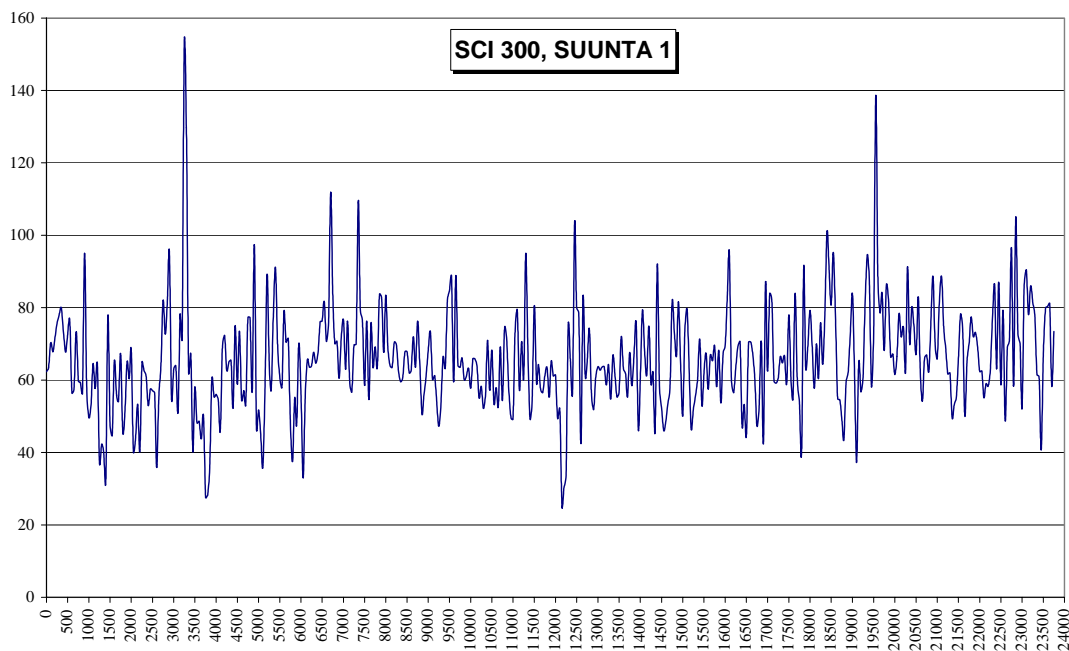


Kuva 4.8. Kalibroinnin vaikutus mallin liikennemäärällä KKL = 150 000

Kuvista nähdään, että alkuperäinen PARIS malli yliarvioi kestoikää vahvoilla rakenteilla kalibroituun malliin verrattuna molemmilla liikennemäärillä. Vastaavasti kalibroitu malli ennustaa hieman pidempää kestoikää heikoille rakenteille. Tämä oli odotettua aineistojen eroavuuksien takia. Keskieurooppalaisella tiellä, jossa on vahvat rakenteet, on paljon korkeampi liikennemäärä kuin pohjoismaissa. Kun tämä osa aineistosta poistettiin mallin ennuste laskee, kuten kuvista on nähtävissä. Toinen merkittävä ero aineistojen välillä on pohjoismaissa käytetyn routamitoituksen aiheuttamat paksut sitomattomat rakennekerrokset. Näinollen vähäliikenteisetkin tiet omaavat suhteellisen vahvat rakenteet.

4.2.7 Mallin tulkinta ja laskentaesimerkki

Osana Tielaitoksen strategista tutkimus- ja kehitysprojektia S4 Tierakenteiden tutkimusohjelma, suoritettiin syksyn 1998 ja kevään 1999 aikana Vt 7:llä Hamina - Virolahti välillä 24 km koeosuuden seuranta ja kuormituskestävyysarviointi (VTT, 507, 1999). Koeosuuden ollessa kuormituskestävyyssmielessä vaurioitumaton on kuormituskestävyysanalyysin tarkoituksena ennustaa koeosuuden vaurioitumisen alkamisajankohta. Tutkimuksessa käytettiin tämän projektin kehittämää kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan ennustemallia. Seuraavassa on esitetty mallien käyttöesimerkinä koeosuuden tulokset. Kuvassa 4.9 on esitetty SCI300:n kuvaaja koeosuudella itään suuntautuvalla kaistalla.



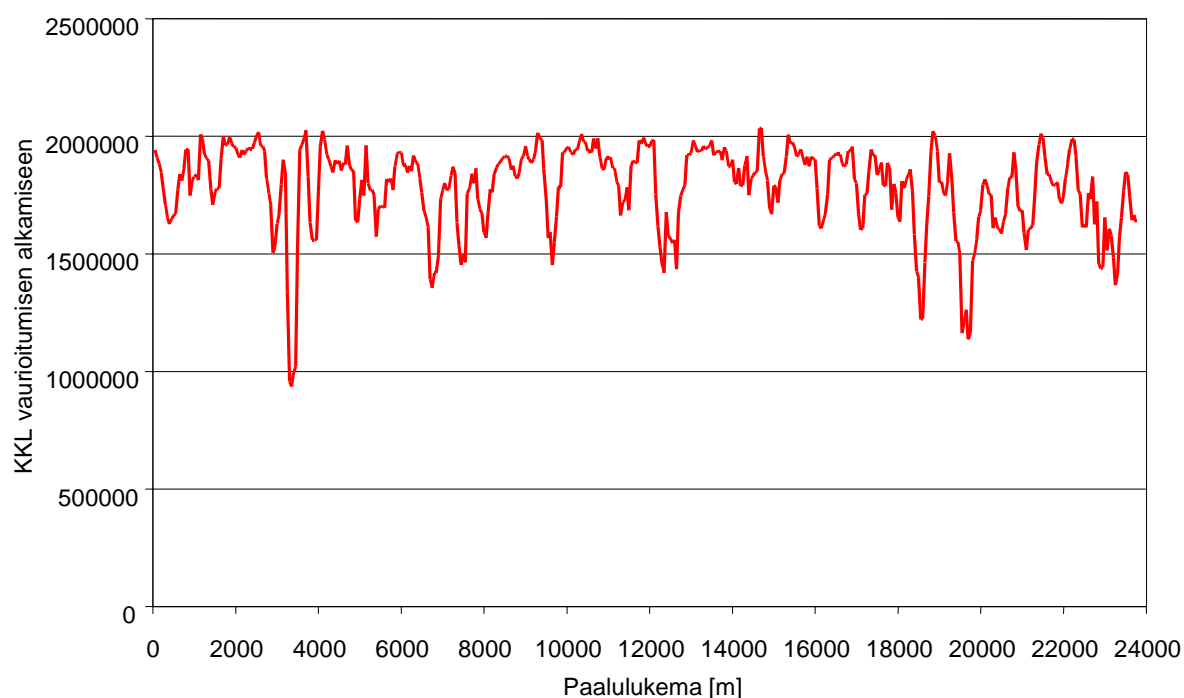
Kuva 4.9. Vt 7 Hamina - Virolahti (tosa 36 - 39). SCI300 (d0 - d300) itään menevällä kaistalla.

Itään suuntautuvalla kaistalla SCI300:n keskiarvo on 65,5 μm ja keskihajonta 14,6 μm . Variaatiokerroin on $100 \% * (14,6 / 65,5) = 22,3 \%$, eli vaihtelu on melko vähäistä.

Toimenpidehistorian mukaan viimeisin uudelleenpäällystys on tehty vuonna 1988, joten kumulatiivinen kuormituskertaluku on määritetty vuosien 1989 - 1998 liikenteen perusteella. Keskimääräinen vuosittainen KKL_v vuosina 1989 - 1998 on ollut 255 842.

Sijoittamalla vuosittainen KKL ja kukin SCI300 arvo kaavaan 4.2 saadaan kumulatiivinen kuormituskertaluku viimeisimmästä kuormituskestävyyteen vaikuttavasta toimenpiteestä vaurioitumisen alkamishetkeen. Vähentämällä tästä luvusta tarkasteluhetken mennessä kertynyt kumulatiivinen kuormituskertaluku saadaan jäljellä oleva kuormituskertaluku vaurioitumisen alkamishetkeen.

Kuvassa 4.10 on esitetty liikenneperäisen vaurioitumisen alkamiseen jäljellä olevan kuormituskertaluvun kuvaaja koeosuudella. Tarkastelu on tehty itään menevällä kaistalla.



Kuva 4.10. Vt 7 Hamina - Virolahti (tosa 36 - 39), liikenneperäisen vaurioitumisen alkamiseen jäljellä oleva kuormituskertaluku itään suuntautuvalla kaistalla (500 m liukuva keskiarvo).

Jakamalla saatu kumulatiivinen kuormituskertaluku vuosittaisella KKL_v:lla, joka on 409 059 vuonna 1998, saadaan aika vuosina vaurioitumisen alkamishetkeen. Mikäli liikenne jatkuu vuoden 1998 tasolla, aika liikenneperäisen vaurioitumisen alkamiseen vaihtelee 2 ja 5 vuoden välillä.

4.3 Kuormituskestävyyssvaurioitumisen kehittymisen mallintaminen

4.3.1 Mallintamisen periaatteet

Kuormituskestävyyssvaurioitumisen kehittymisen mallintaminen koostuu seuraavista vaiheista:

- vaurioindeksin määrittäminen
- aikasarjan funktionaalinen muoto ja vaurioitumisnopeus
- kohteiden valintakriteerit
- vaurioitumisnopeutta selittävät muuttujat.

Mallintamisprosessi alkaa vaurioindeksin määrittämisellä. Indeksiksi tulee laskea niin, että se kuvaa tien vaurioitumisen vakavuutta ja että se noudattaa mahdollisimman hyvin mahdollisimman yksinkertaista funktionaalista muotoa. Tämän jälkeen määritetään valintakriteerit, jotka kohteen tulee täyttää (aikasarjan pituus ja tilastolliset tunnusluvut). Lopuksi tarkastellaan vaurioitumisnopeutta selittäviä muuttujia.

4.3.2 Vaurioindeksin määrittäminen

Kuormituskestävyyssvaurioitumista kuvaava vaurioindeksi (VI) sisältää ainoastaan ne vauriotyypit, jotka primääristi johtuvat liikennekuormituksesta. Nämä vauriot tunnistetaan niiden ajourassa olevan sijainnin perusteella. Seuraavat ajourissa esiintyvät vauriotyypit on tarkastelussa luokiteltu kuormituskestävyyssvaurioiksi:

- pituushalkeama
- (lyhyt) vain urassa oleva poikkihalkeama
- verkkohalkeama.

Pituushalkeamat ja poikkihalkeamat ovat verkkohalkeilun esiasteita, joka huomioidaan vauriotyyppipainokertoimilla. Eri vauriotyyppien vakavuusasteet huomioidaan myös omilla painokertoimilla. Valittujen vauriotyyppien ja painokertoimien avulla lasketaan vaurioindeksi, joka mallinnetaan ajassa. Painokertoimia käytetään siksi, että ne kuvaavat vaurioitumisprosessin vakavuutta. Ne valitaan siten, että vauriokehitys on looginen. Seuraavassa on esitetty mallinnuksessa käytetyn vaurioindeksin laskentakaava (kaava 4.5), jota myös käytettiin PARIS-projektissa /PARIS, 1999/:

$$VI = 2 * Ver + Pit + Poi, \quad (4.5)$$

missä

VI = kuormituskestävyyssvaurioindeksi
 Ver (verkkohalkeama) = Ver_matala + 1,5 * Ver_keskinkertainen + 2 * Ver_korkea
 Pit (pituushalkeama) = Pit_matala + 1,5 * Pit_keskinkertainen + 2 * Pit_korkea
 Poi (poikkihalkeama) = Poi_matala + 1,5 * Poi_keskinkertainen + 2 * Poi_korkea
 matala, keskinkertainen ja korkea = vaurioiden vakavuusasteet.

On huomattava, että käytetyt kertoimet eivät ole yleispäteviä, vaan kertoimet riippuvat käytettävästä inventointitavasta. Vaurioindeksin laskenta vaatii, että vaurioinventoinnissa erotellaan vaurioiden sivasijainti, mitä Tielaitoksen tämänhetkinen inventointimenetelmä ei tee /TIEL, 1994/. Edellä esitetyt kertoimet tukevat PARIS-projektissa käytettyä inventointitapaa, jossa tietä tarkastellaan sivusuunnasta, siten että ainoastaan poikkileikkauksen vakavin vaurioitumistaso huomioidaan. Tällä tavalla saadaan tie pituussuunnassa rajalliseksi, eli sadalla metrillä voi olla korkeintaan sata metriä pituus-, poikki- tai verkkohalkeamia. Poikkihalkeaman tiensuuntainen pituus on yksi metri.

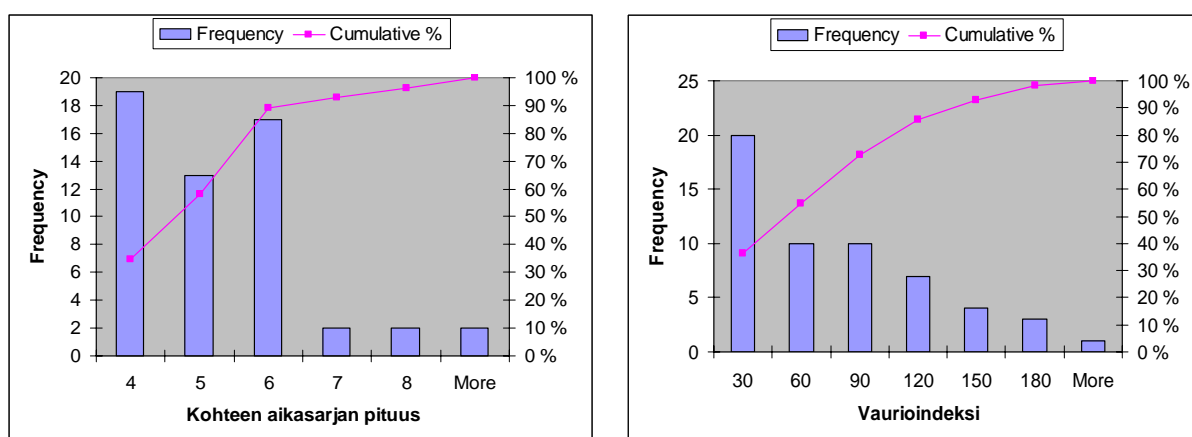
Vaurioindeksin maksimiarvo on siten 400, jolloin koko 100 metrin osuudella on ainakin toisessa ajourassa on korkean vakavuusasteen verkkohalkeamaa.

4.3.3 Kohteiden valintakriteerit

Jotta kohde hyväksyttiin analyysiin mukaan, sen tuli täyttää seuraavat minimivaatimukset:

- tarvittava data olemassa (ikä-, liikenne-, vaurio-, taipuma-, rakenne- ja ilmastotiedot)
- vähintään neljä aikasarjamittausta, joissa vaurioindeksi > 0
- ei epäloogista vaurioitumiskehitystä (datan laatu, paikkaus, yms)
- ei epäloogisia tilastoarvoja (negatiivinen tai nolla kulmakerroin, $R^2 < 0.50$).

Kriteerit täyttäviä havaintotiekohteita on yhteensä 55, joista 7 Suomesta ja 48 Ruotsista. Kohteiden vaurioaikasarjojen jakaumat sekä viimeisimmän vaurioinventoinnin vaurioindeksijakauma on esitetty kuvassa 4.11.



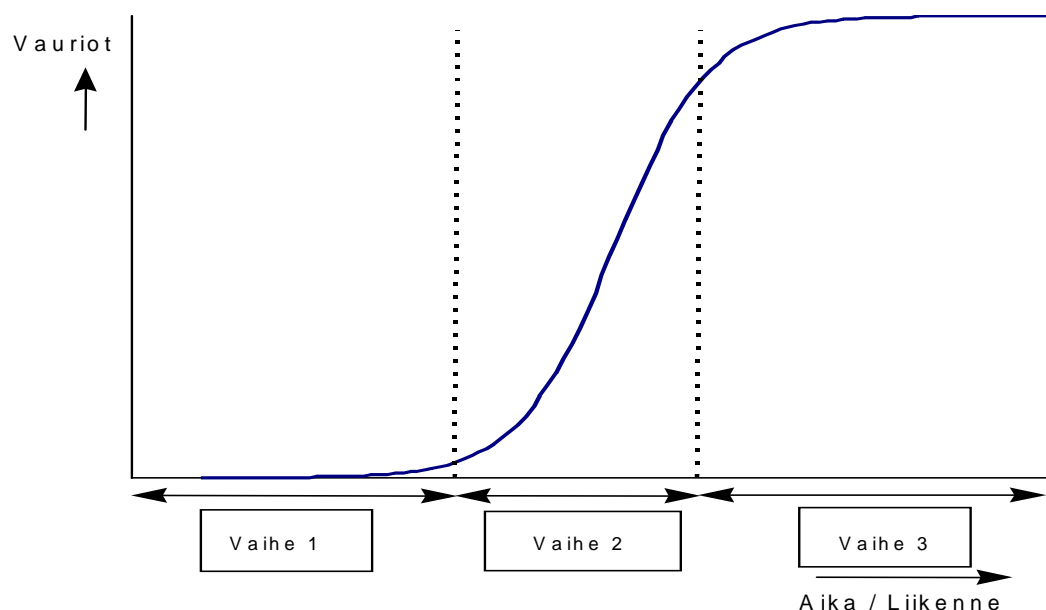
Kuva 4.11. Kohteiden vaurioaikasarjojen jakaumat ja viimeisen inventoinnin vaurioindeksijakaumat.

4.3.4 Vaurioitumisen kehittymisen funktionaalinen muoto

PARIS-projektissa /PARIS, 1999/ tarkasteltiin vaurioitumisen kehittymistä sekä koetiekonetuloksista että laajalla havaintotieaineistolla. Koetiekoneaineiston avulla voitiin seurata vaurioitumisprosessia paljon pidemmälle kuin tieverkolta valitulla havaintotiekohteissa, johtuen euroopassa vallitsevasta korkeatasoisesta kunnossapitokäytännöstä. Koetiekonetulosten perusteella todettiin kuvan 4.12 mukainen kehittyminen vaurioitumiselle.

Vaurioitumisprosessi 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).



Kuva 4.12. Vaurioitumisprosessin vaiheet.

Vaurioitumisen kehittymisen kannalta kiinnostavinta on vaihe 2 ja sen noudattama funktionaalinen muoto. Koetiekoetulosten perusteella voitiin todeta vaurioitumisen noudattavan lineaarista muotoa vaiheen kaksi aikana, mikäli vaurioindeksi lasketaan kaavassa 4.5 esitetyllä tavalla. Sama trendi voitiin todeta myös havaintotieaineiston osalta. Tulosten perusteella valittiin lineaarinen malli kuormituskestävyysvaurioitumisen kehittymisen mallintamiseen.

Malli on muotoa: $VN = a * IKÄ + b$, (4.6)

missä,

VN = vaurioitumisnopeus (kuormituskestävyysvaurioindeksi)

$IKÄ$ = ikä edellisestä päällystyksestä tai rakenteen parantamisesta (vuosia)

a = mallin parametri (slope)

b = mallin parametri (intercept).

Kuormituskestävyysvaurioitumisen kehittymisen mallintaminen suoritettiin käyttämällä kohteen ikää viimeisimmästä kuormituskestävyyteen vaikuttavasta toimenpiteestä (rakenteen parantaminen tai päällystys) selittävänä tekijänä mallissa. Seuraavassa on esitetty vaurioitumisnopeuden jakaumat suomalaisille ja ruotsalaisille kohteille.

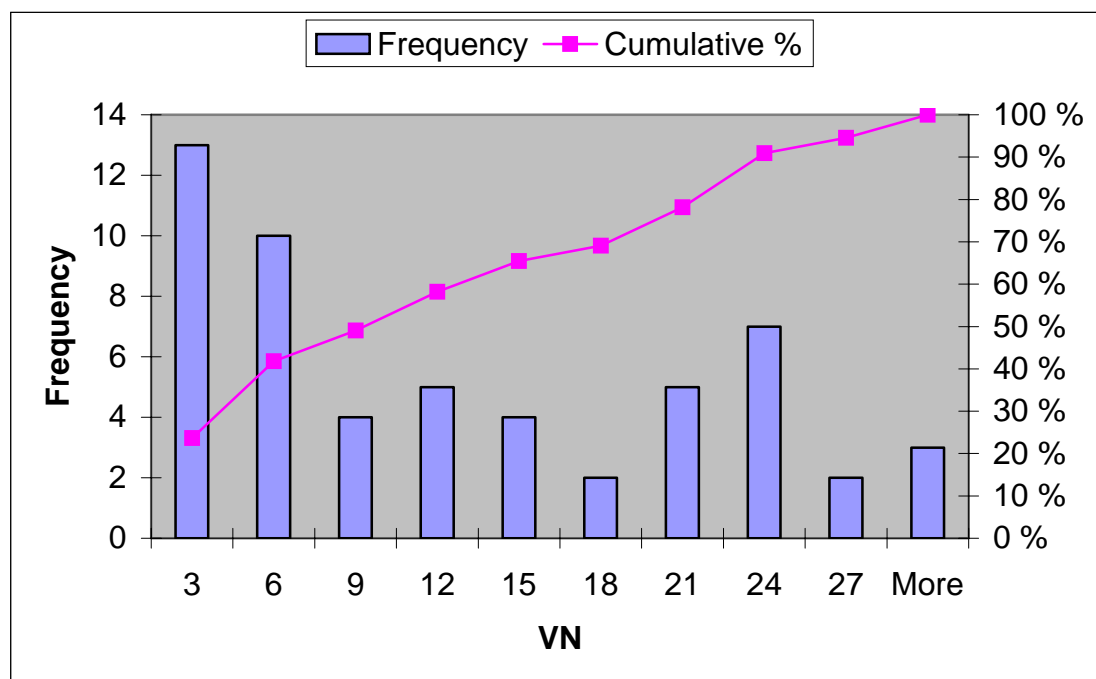
4.3.5 Vaurioitumisnopeuden jakaumat

Kohteiden aikasarjoille laskettiin lineaariregressio vaurioitumisnopeuden määrittämiseksi. Vaurioitumisnopeutta mallinnettiin kohteen iän suhteen (ikä vuosina edellisestä päällystyksestä tai rakenteen parantamisesta). Kuvassa 4.13 on esitetty mallien tuottamat tilastolliset tunnusluvut vaurioitumisnopeudelle iän suhteen ja jakauman kuvaaja on esitetty kuvassa 4.14.

SAS Univariate Procedure			
Variable = VAURIOITUMISNOPEUS IÄN SUHTEEN			
Moments			
N	55	Sum Wgts	55
Mean	11.37236	Sum	625.48
Std Dev	9.510811	Variance	90.45552
Skewness	0.569237	Kurtosis	-0.77533
USS	11997.78	CSS	4884.598
CV	83.63091	Std Mean	1.282437
T:Mean=0	8.867772	Pr> T	0.0001
Num ^= 0	55	Num > 0	55
M(Sign)	27.5	Pr>= M	0.0001
Sgn Rank	770	Pr>= S	0.0001
W:Normal	0.898073	Pr<W	0.0001
Quantiles(Def=5)			
100% Max	36.18	99%	36.18
75% Q3	20.08	95%	28.34
50% Med	9.32	90%	23.93
25% Q1	3.13	10%	0.76
0% Min	0.12	5%	0.3
		1%	0.12
Range	36.06		
Q3-Q1	16.95		
Mode	0.3		
Extremes			
Lowest	Obs	Highest	Obs
0.12	(20)	24.28	(31)
0.28	(3)	26.58	(23)
0.3	(55)	28.34	(30)
0.3	(38)	28.42	(32)
0.58	(2)	36.18	(27)

Kuva 4.13. Mallien tuottamat tilastolliset tunnusluvut vaurioitumisnopeudelle iän suhteen.

Kuvasta 4.13 voidaan todeta, että aineiston vaurioitumisnopeuden mediaani on noin 10 vaurioindeksiyksikköä vuodessa. Aineiston vaurioitumisnopeudet kuitenkin vaihtelevat lähes olemattoman pienestä aina yli 30 vaurioindeksiyksikköön vuodessa. Tarkemman ennusteen aikaansaamiseksi seuraavassa tarkastellaan mahdollisia vaurioitumisnopeutta selittäviä tekijöitä.



Kuva 4.14. Jakaumien kuvaajat vaurioitumisnopeudelle iän suhteen.

4.3.6 Vaurioitumisnopeuden mallintaminen

Seuraava vaihe kuormituskestävyysvaurioitumisen kehittymisen mallintamisessa on vaurioitumisnopeutta selittävien muuttujien tarkastelu. Kuten edellisessä kappaleesta voi todeta vaurioitumisnopeus vaihtelee eri kohteiden välillä. Tarkastelun tavoitteena on löytää malli, joka selittää eri kohteiden erilaisen vaurioitumisnopeuden tai voidaanko kohteet ryhmitellä (clusters) jonkun muuttujan mukaan. Muuttujina tarkasteltiin seuraavia tietoja:

- taipumatiedot (eri taipumasuppilon tunnusluvut)
- rakennetiedot (rakennekerrosten paksuudet)
- ilmastotiedot (lämpötila- ja sademäärätunnusluvut)
- liikennemäärät
- eri muuttujien yhdysvaikutukset.

Minkään edellämmainitun muuttujan ja vaurioitumisnopeuden välille ei löytynyt tilastollisesti merkitsevää yhteyttä. Sama tulos saatiin myös PARIS-projektissa. Eri kohteiden erilaista vaurioitumisnopeutta ei siis pystytty selittämään millään tietä, liikennettä tai ilmastoaluetta kuvaavalla tekijällä.

Kun tarkasteltiin viimeisen inventoinnin vaurioindeksiin ja kyseisen ajankohdan iän suhdelukua (kaava 4.7) vaurioitumisnopeuteen saatiin hyvä yhteys. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kun vaurioituneessa kohteessa määritetään vaurioindeksi ja tunnetaan kohteen ikä voidaan kohteen tarkempi vaurioitumisnopeus ennustaa.

4.3.7 Vaurioitumisnopeus iän suhteen

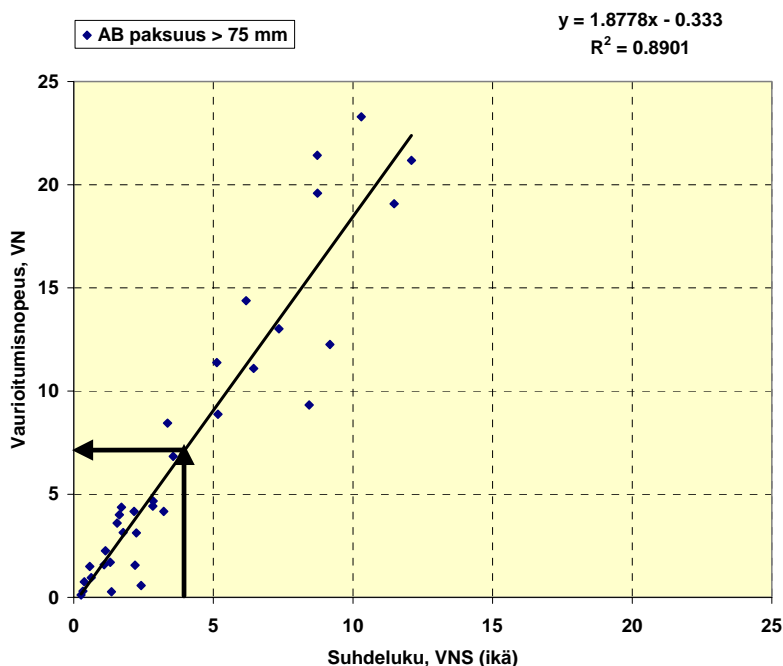
Kohteen vaurioitumisnopeuden suhdeluku iälle määritellään seuraavasti:

$$VNS_{IKÄ} = \frac{VI_{mit}}{IKÄ_{mit}}, \quad (4.7)$$

missä

$VNS_{IKÄ}$ = vaurioitumisnopeuden ikä-suhdeluku
 VI_{MIT} = mitattu vaurioindeksi
 $IKÄ_{MIT}$ = kohteen ikä vaurioindeksin määrittämishetkellä.

Kaikille kohteille laskettiin suhdeluku, jolla selitettiin kohteen vaurioitumisnopeutta. Suhdeluvun ja vaurioitumisnopeuden välille löytyi hyvä lineaarinen riippuvuus. Yhteyden kuvaaja on esitetty kuvassa 4.16 ja laskentayhtälö kaavassa 4.8. Aineistona käytettiin kohteita joiden asfaltin paksuus > 75 mm.



Kuva 4.16. Vaurioitumisnopeuden ja ikä-suhdeluvun välinen yhteys.

Yksittäisen kohteen kuormituskestävyysovaurioitumisen kehittymisen vaurioitumisnopeuden laskentakaava, kun selittäjänä on kohteen ikä.

$$VN = 1.88 * VNS_{ikä} - 0.33, \quad (4.8)$$

missä

VN = kohteen vaurioitumisnopeus (kuormituskestävyysovaurioindeksi)

$VNS_{ikä}$ = vaurioitumisnopeuden ikä-suhdeluku (kaava 4.7).

4.3.7 Mallien tulkinta

Mallia voidaan hyväksikäyttää vaurioitumisen ennustamisessa verkkotasolla seuraavasti:

- valitaan jokaiselta 100 metrin osuudelta viimeinen inventointitulok, josta määritetään edellä esitetyllä tavalla kuormituskestävyysovaurioille vaurioindeksi (esim. $VI=40$)
- lasketaan kohteen ikä vuosina edellisestä päällystämisestä tai rakenteenparantamisesta (esim. $ikä=10$)
- lasketaan kaavalla 4.7 vaurioitumisnopeuden ikä-suhdeluku (esim. $VNS_{ikä}=40/10=4$)
- lasketaan kaavalla 4.8 kohteen vaurioitumisnopeus (esim. $VN=1.88*4-0.33=7.2$)
- esimerkin vaurioitumisnopeus on noin 7 vaurioindeksiyksikköä vuodessa (kuva 4.16)
- nykyindeksin ollessa 40 ja nopeuden ollessa 7 yksikköä vuodessa saadaan laskettua kuinka monen vuoden kuluttua kohde saavuttaa toimenpiderajan.

5. Johtopäätökset ja suositukset

Pudotuspainomittausten lämpötilakorjaus

- Pudotuspainolaitteella mitatun taipuman ja päällysteen lämpötilan välillä on selkeä lineaarinen yhteys.
- Päällysteen lämpötila vaikuttaa taipumaan vielä 600 mm etäisyydellä kuormituslevystä. Kauempana kuormituslevystä mitattuja taipumia (900 ja 1200 mm) ei tarvitse korjata päällysteen lämpötilan suhteen.
- Päällysteen paksuus ja taipuman taso (koko rakenteen jäykkyys) selittävät korjauksen suuruutta.
- Päällysteen (keskimääräinen) lämpötila voidaan laskea päällysteen pintalämpötilasta.
- Mahdollisesti puuttuvat taipumat (d300 tai d450) voidaan laskea taipumasuppilosta.

Vaurioinventoinnin normalisointi

- Painokertoimilla huomioidaan vaurioiden vakavuusaste ja vauriotyyppi siten, että vauriokehitys on looginen ja kuvaa vaurioitumismekanismien kehitystä. Painokertoimet riippuvat käytettävästä inventointitavasta sekä vaurioindeksin laskutavasta.
- Vuoden 1999 tutkimuksissa kerätyn case-mittausaineiston avulla ei löytynyt loogista yhteyttä mallien muodostamiseen käytetyn vaurioinventointimenetelmän ja Tielaitoksen tuotantomittausten vaurioinventointimenetelmän välille, josta normalisointiyhtälöt olisi voitu kehittää.

Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan mallintaminen

- Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohtaa selittää taipumasuppilosta laskettu SCI300 (d0-d300) ja vuosittainen kuormituskertaluku.
- Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan ennustemallissa tarvittava pudotuspainomittaus suositellaan tehtäväksi mahdollisimman alkuvaiheessa (päällystä tai rakenteen parantamista seuraavana vuonna), jolloin päällyste on varmasti vaurioitumaton.
- Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan ennustemallin käytössä on aina huomioitava mallin rajoitukset ja tarkistettava mallin käyttöalue.

Kuormituskestävyysvaurioitumisen kehittymisen mallintaminen

- Erotellaan ajourassa sijaitsevat (liikenneperäiset) ja muualla sijaitsevat (ilmastoperäiset) vauriot.
- Reiät, purkaumat ja pakkaskatkot vaativat rutiinikunnossapidon toimenpiteitä. Niitä ei pystytä mallintamaan tien rakenteellista kuntoa kuvaavilla muuttujilla.
- Kahden edellisen kohdan ehdotuksiin on syynä se, ettei sekoiteta eri syistä aiheutuvia vaurioita keskenään.
- Laskettaessa vaurioindeksi raportissa esitetyllä tavalla kuormituskestävyysvaurioitumisen kehittyminen noudattaa lineaarista muotoa ajassa.
- Keskimääräinen (mediaaniarvo) vaurioitumisnopeus on käytettävissä olevan aineiston perusteella 10 vaurioindeksiyksikköä vuodessa.
- Tarkempi kohdekohtainen vaurioitumisnopeus saadaan käyttämällä ennustemallia kuormituskestävyysvaurioitumisen kehittymisellä, jonka lähtötietoina tarvitaan vaurioinventointitieto tien ollessa vaurioituneessa tilassa sekä tien sen hetkinen ikä edellisestä toimenpiteestä (päällystys tai rakenteen parantaminen).

6. Kirjallisuus

PARIS - Performance Analysis of Road Infrastructure, Final Report for Publication. European Commission, RO-96-SC.404, Brussels, Belgium, 1999. 102 pages + app. 4 pages.

Päällystevaurioiden inventointiohje. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 13/1994. Tielaitos, Tutkimuskeskus. Helsinki, 1994. TIEL 4000063. 44 s. + liitt. 19 s.

Ruotoistenmäki, A. & Spoof, H., Tien rakenteellinen kunto. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 435. Espoo, joulukuu 1997. 27 s. + liitt. 3 s.

Ruotoistenmäki, A. & Spoof, H., Tien rakenteellinen kunto. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 480. Espoo, tammikuu 1999. 31 s. + liitt. 9 s.

Ruotoistenmäki, A., Petäjä, S., Spoof, H. & Törnqvist, J., Vt 7 Hamina – Virolahti kestoiän arviointi, vaihe 1. VTT Yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti 507. Espoo, syyskuu 1999. 53 s. + liitt. 77 s.

SHRP – Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project, National Research Council, SHRP-P-338, Washington, DC, 1993.

7. Liitteet

Liite 1. Aineisto tilastolliset tunnusluvut.