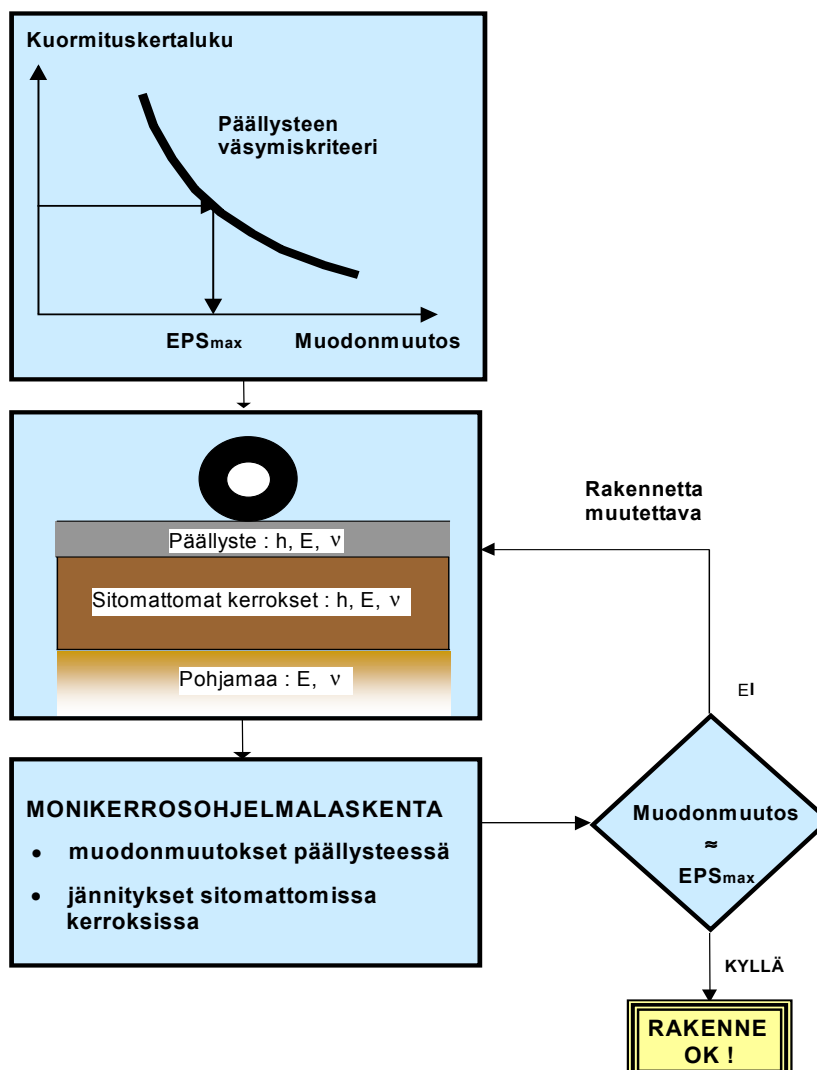


KUORMITUSKESTÄVYYSMITOITUS - PÄÄLLYSRAKENTEEN VÄSYMINEN



Harri Spoof
Jari Pihlajamäki

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Alkusanat

Tien pohja- ja päällysrakenteet –tutkimusohjelman (TPPT) lopputulosten tavoitteena on ennistä kestävämpien uusien ja perusparannettavien kestopäällystettyjen teiden rakentaminen siten, että myös rakenteiden vuosikustannukset alenevat. TPPT-ohjelmassa kehitettiin tierakenteiden mitoitusta (TPPT-suunnittelujärjestelmä). Suunnittelujärjestelmään kuuluvissa mitoitushjeissa ja menetelmäkuvauksissa esitetään ne menettelytavat ja keinot, joita käyttäen tierakenne voidaan kohdekohtaisesti suunnitella ja mitoittaa. TPPT-suunnittelujärjestelmään sisältyy myös päällysrakenteen elinkaarikustannustarkastelu, jonka suorittamiseksi esitetään menettelytapa.

Suunnittelujärjestelmälle on ominaista, että tierakenteen mitoitustapahtuu paikkakohtaisilla tiedoilla ja parametreilla (liikenne, ilmasto, pohjamaa, käytettävät rakennemateriaalit, vanhat rakenteet). Mitoituksessa käytettävien pohjamaata ja rakennemateriaaleja koskevien parametrien määrittäminen tapahtuu ensisijaisesti laboratoriokokeilla tai maastossa tehtävin mittauksin ja tutkimuksin. Myös muiden mitoituksessa tarpeellisten lähtötietojen hankinnassa ja ongelmakohtien tai muutoskohtien paikannuksessa käytetään maastossa ja tiellä tehtäviä havaintoja ja mittauksia.

Suunnittelujärjestelmään kuuluvat oleellisena osana sitä täydentävät suunnittelun ja mitoituksen lähtötietojen hankintaa käsittelevät ”menetelmäkuvaukset”. Esitettävät menetelmät ja menettelytavat on todettu käyttökelpoisiksi käytännön havaintojen ja kokeiden perusteella.

TPPT-ohjelman tuloksena laaditaan myös yhteenveto ohjelmaan sisältyneistä, mitoitushjeiden laadinnassa hyväksikäytetyistä koerakenteista sekä yhteenveto tien rakennekerrosten materiaaleista ja niiden valintaan vaikuttavista tekijöistä.

Tämän ”Kuormituskestävyysmitoitustapa - päällysrakenteen väsyminen” menetelmäkuvauksen ovat laatineet Harri Spoof ja Jari Pihlajamäki VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta. Laadintaan on VTT:llä ollessaan osallistunut myös Antti Ruotoistenmäki (nykyisin Inframan Oy). Menetelmäkuvauksen sisältö on käyty läpi yhdessä tiehallinnon ja tieliikelaitoksen asiantuntijoiden kanssa.

Marraskuussa 2001

Markku Tammirinne

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	3
2	UUDEN TIERAKENTEEN SUUNNITTELU.....	3
2.1	Yleistä	3
2.2	Tien vaurioitumismekanismi	4
2.3	Kuormituskestävyysmitoituksen perusteet.....	6
2.4	Lineaarinen monikerrosteoria	7
2.5	Päällysrakennetyypit ja vaurioitumismekanismit	8
2.6	Lähtötietojen määrittäminen	8
2.7	Jako homogeenisiin osuuksiin.....	9
3	LIIKENNERASITUKSEN MÄÄRITYS.....	9
4	KENTTÄKALIBROITU TPPT-VÄSYMISKRITEERI	11
4.1	Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan ennustemalli.....	11
4.2	Ennustemallin käyttörajoitukset	14
5	JÄNNITYSTEN JA MUODONMUUTOSTEN LASKENTA.....	15
6	KUORMITUSKESTÄVYYSMITOITUS.....	17
6.1	Mitoitusjakso ja väsymiskriteeri	17
6.2	Referenssirakenteen mitoitus	18
6.3	Vaihtoehtoisen rakenteen mitoitus.....	19
7	PARANNETTAVAN RAKENTEEN MITOITUS	23
7.1	Kuormituskestävyysmitoituksen lähtötiedot	24
7.2	Jako homogeenisiin osuuksiin.....	26
8	MITOITUSESIMERKKI.....	28
9	KIRJALLISUUS	31
10	LIITTEET	31

1 JOHDANTO

TPPT-suunnittelujärjestelmässä (TPPT Raportti "Tien pohja- ja päällysrakenteet –tutkimus-ohjelma. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus") esitetään ne menettelytavat ja keinot, joita käyttäen tierakenne voidaan kohdekohtaisesti suunnitella ja mitoittaa. Suunnittelujärjestelmälle on olennaista, että mitoitus tapahtuu paikkakohtaisilla tiedoilla ja parametreilla (liikenne, ilmasto, pohjamaa, käytettävät rakennemateriaalit). Mitoituksessa käytettävien pohjamaata ja rakennemateriaaleja koskevien parametrien määrittäminen tapahtuu ensisijaisesti laboratoriokeilla tai maastossa tehtävin mittauksin ja tutkimuksin. Parametrien taulukkoarvoja, jotka ovat aina keskimääriä, voidaan käyttää alustavassa suunnittelussa ja mitoituksessa (yleissuunnitelmavaiheessa), jos paikkakohtaisia parametreja ei jostain syystä ole vielä käytettävissä.

Tierakenteen kuntoon (tasaisuuteen, vaurioitumiseen, urautumiseen) vaikuttavat rakenteen kuormitus-, routa- ja painumakestävyys sekä näiden tekijöiden yhteisvaikutukset. TPPT-suunnittelujärjestelmän mukaan ensimmäisessä vaiheessa tierakenteen mitoitus tehdään erikseen liikennekuormitusrasitusten, routarasitusten ja painuman mukaan. Ensin tarkistetaan rakenteen / tien painumat ja pohjanvahvistustoimenpiteiden tarve. Toiseksi mitoitetaan tierakenteen kokonaispaksuus käytettävien materiaalien lämmönjohtavuuden perusteella siten, ettei mitoituksen pohjana olevaa routanousua ylitetä. Lopuksi rakenteen yläosa mitoitetaan liikennekuormitukselle. Tämän jälkeen voidaan vielä tarkistaa pohjamaan pysyvät muodonmuutokset tilanteelle, jolloin roudan sulaminen on pehmentänyt pohjamaan ja rakenteen alimmat osat.

Tierakenteen yläosan (päällysteen) kuormituskestävyyksimitoitusta perustuu ns. mekanistis-empiriseen malliin, jossa analyttisen teorian mukaan lasketut jännitykset ja muodonmuutokset yhdistetään kentällä havaittuun päällysteen vaurioitumiseen. Suunnittelujärjestelmä soveltuu kestopäällysteisille (AB-, ABK- ja SMA-päällysteet) tierakenteille, joiden asfalttikerrosten paksuus on vähintään 60-80 mm. Maabetonirakenteiden tai muulla tavalla lujitettujen rakenteiden eikä kevytpäällysteteiden (PAB- ja SOP-päällysteet) mitoittamiseen ei tässä esitetty menetelmä sellaisenaan sovellu. Kevytpäällysteiden mitoittamista käsitellään TPPT:lle rinnakkaisen "kevytpäällysteisten tierakenteiden" -projektin tuloksissa.

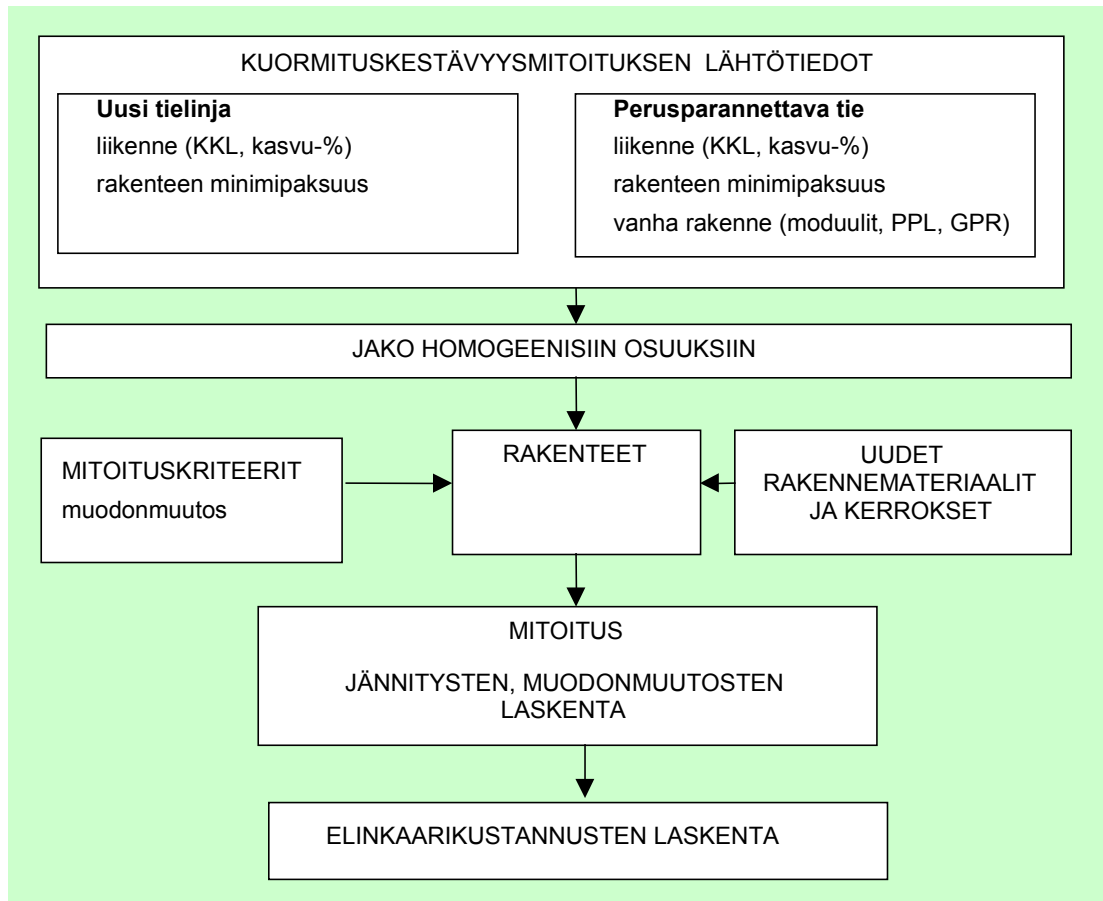
Päällysteen kuormituskestävyyksimitoitusta perustuu päällysteen alapinnan vaakasuoraan vetomuodonmuutokseen, joka selittää päällysteen väsymisestä aiheutuvaa liikenneperäistä vaurioitumista.

Mitoitettujen rakenteiden vuosikustannuksiin perustuvat taloudellisuusvertailut toimivat päätöksenteon tukena valittaessa kohteessa toteutettavaa rakenneratkaisua (TPPT Menetelmäkuvaus 20. Päällysrakenteen elinkaarikustannusanalyysi).

2 UUDEN TIERAKENTEEN SUUNNITTELU

2.1 Yleistä

Kuormituskestävyyksimitoitusta lähtee liikennesuoritusluokasta. Kumulatiivinen kuormituskertaluku määrittää kriittisille päällysteen muodonmuutoksille suurimman sallitun arvon, jonka perusteella mitoitetaan päällysrakenteen yläosan rakennekerrospaksuudet. Muut lähtöarvot ovat pohjamaan ja käytettävien rakennusmateriaalien moduulit. Kuormituskestävyyksimitoituksen jälkeen tarkistetaan, ovatko rakenteen painuma- ja routakäyttäytyminen muuttuneet ja tarvittaessa mitoitetaan rakenteet uudelleen painumalle ja / tai roudalle (kuva 2.1).

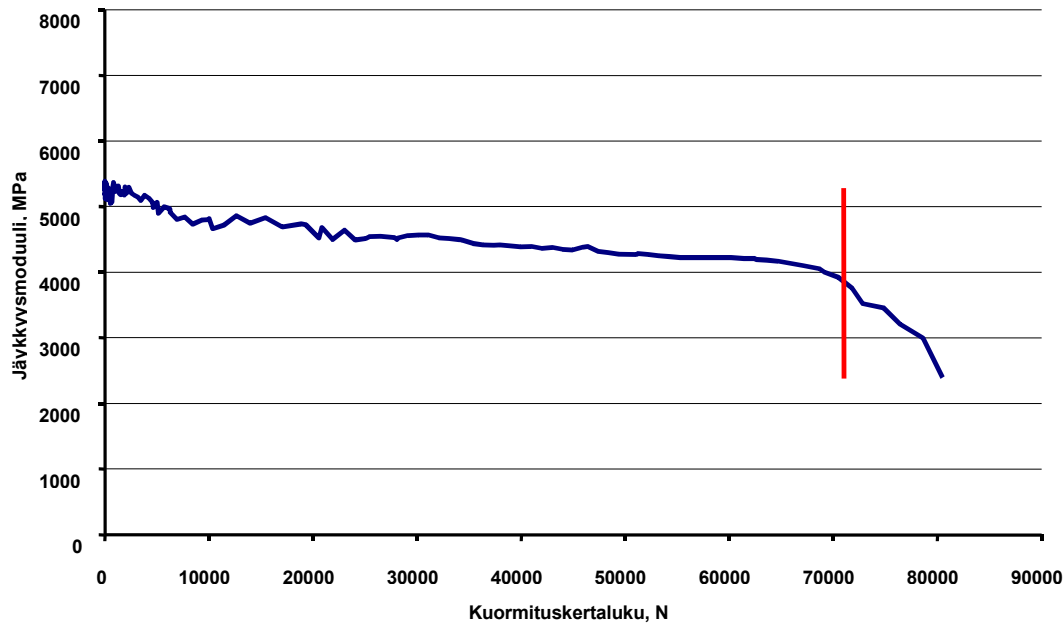


Kuva 2.1. Periaatekaavio päällysteen kuormituskestävyyden mitoituksesta.

2.2 Tien vaurioitumismekanismi

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 2.2 on esitetty periaatekuva päällysteen jäykkyysmoduulin kehittämisestä laboratoriossa suoritettuna väsytykskokeen aikana. Väsytykskokeessa syntyvän halkeaman syntyhetkellä päällysteen jäykkyysmoduuli alkaa laskea nopeasti.

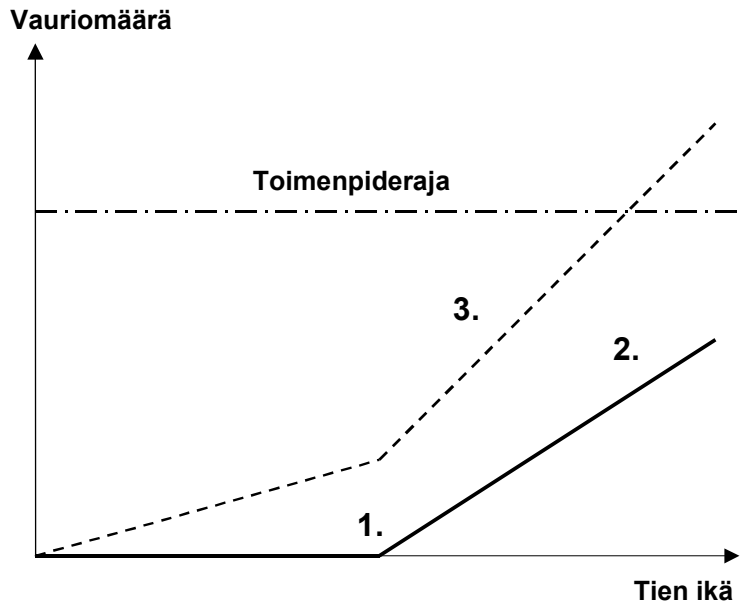


Kuva 2.2. Päällysteen jäykkäysmoduulin kehittyminen väsytykskokeen aikana.

Vaurioitumisprosessin mallintaminen tulee 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 lähtökohtana se, että vaurioituminen on jo alkanut.
3. Tien kokonaisvaurioitumisen ennustamiseksi tulee yllämainittuihin vaurioihin lisätä ilmastorasituksen aiheuttamat vauriot.

Kuvassa 2.3 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.

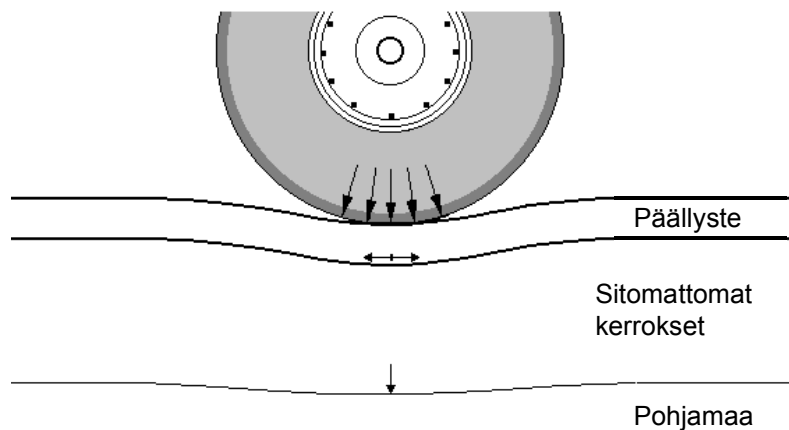


Kuva 2.3. Tierakenteen vaurioitumisprosessi.

2.3 Kuormituskestävyyssmitoituksen perusteet

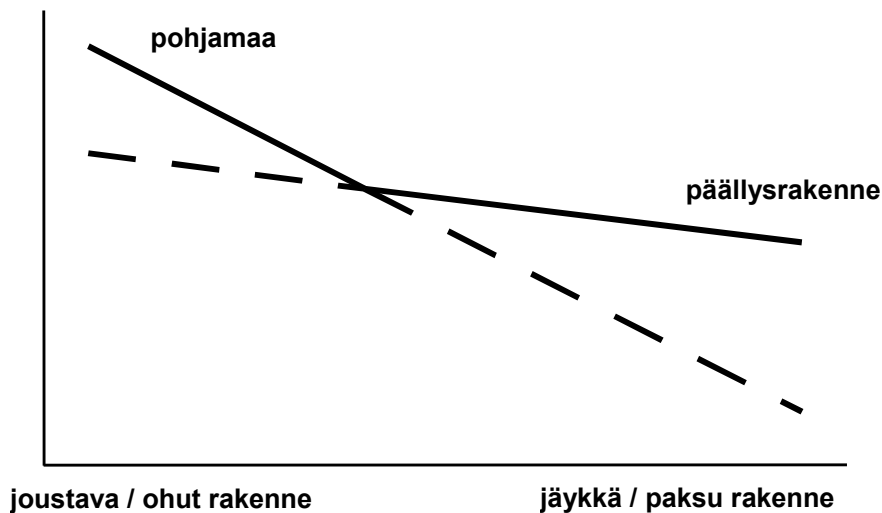
Tiehen synty epätasaisuutta ja tierakenne vaurioituu liikenne- ja ilmastorasitusten sekä painumien vaikutuksesta. Tierakenteen mitoituksessa sitomattomat rakennekerrokset oletetaan ideaalisesti kimmoisiksi eli niissä ei teorian mukaan tapahdu pysyviä deformaatioita eikä leikkautumista. Mitoituskriteerinä käytetään päällysteen alapinnan vaakasuoraa vetomuodonmuutosta. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2.4.

Mitä vahvemmat (paksummat ja/tai jäykemmät) rakennekerrokset ovat, sitä määräävämmäksi muodostuu päällysrakenteen yläosan kyky vastustaa kuormituksia. Heikoilla rakenteilla (ohuet kerrokset ja / tai pieni jäykkyys) pohjamaan muodonmuutoksista aiheutuva vaurioituminen voi muodostua määrääväksi (kuva 2.5).



Kuva 2.4. Tierakenteen kriittiset muodonmuutokset, periaatekuva.

vauriomekanismin kriittisyys



Kuva 2.5. Periaatekuva tierakenteen vaurioitumisen ja tierakenteen jäykkyyden / paksuuden vuorovaikutuksesta.

Tien päällysrakenteen mitoitus voi perustua joko mekanistisiin tai empiirisiin malleihin, tai näiden yhdistelmänä ns. mekanistis-empiiriseen malliin. Puhtaasti mekanistinen malli perustuu tierakenteen mitoittamiseen analyyttisen teorian mukaan laskettujen jännitysten ja muodonmuutosten perusteella. Empiirinen malli perustuu kenttähavaintoihin.

Mekanistisen mallin etuna on sen yleiskäyttöisyys: mallilla voidaan käsitellä periaatteessa mitä tahansa materiaalia ja rakennetyyppejä, kunhan käytettävän analyyttisen mallin tarvitsemat parametrit tunnetaan. Empiirisen mallin käyttöalue rajoittuu niihin materiaaleihin ja rakennetyyppeihin, joilla kyseinen malli on kehitetty.

Käytännössä tierakenteet eivät käyttäydy analyyttisen teorian edellyttämällä tavalla, vaan mitoitusmenetelmässä joudutaan yhdistämään teoreettinen malli kentällä havaittuun vaurioitumiseen, ts. käytetään mekanistis-empiirisiä malleja. Tien kuormituskestävyyksimitoitus TPPT-suunnittelujärjestelmässä perustuukin mekanistis-empiiriseen menetelmään, jossa kriteerinä on mitoitusajan aikana rakenteeseen kohdistuvaa kuormituskertalukua vastaava päällysteen alapinnan sallittu muodonmuutos.

Laboratoriossa tai koetiekoneella määritetty päällysteen väsymissuora pitää aina kalibroida kentällä havaitun vaurioitumisen kanssa, ennen kuin sitä voidaan käyttää mitoituskriteerinä. Tässä menetelmäkuvauksessa mitoituskriteeriä kutsutaan väsymiskriteeriksi.

2.4 Lineaarinen monikerrosteoria

Päällysrakenteiden kuormituskestävyyksimitoituksessa sovelletaan lineaarista monikerrosteoriaa, jossa rakennekerrosmateriaalit oletetaan lineaarisesti kimmoisiksi. Tämä tarkoittaa sitä, että kuormitusten aiheuttamat muodonmuutokset oletetaan täysin palautuviksi heti kuorman poistuttua. Rakenteissa tapahtuvat pysyvät (plastiset) muodonmuutokset ja ajasta riippuvat (viskoosit) muodonmuutokset rajoitetaan mitoituksella niin vähäisiksi, että kokonaismuodonmuutoksia voidaan käsitellä lineaarisesti kimmoisina /Burmister 1943, Ullidtz 1987/.

Lineaarisen monikerrosteorian tavalliset oletukset, joita tähän teoriaan perustuvat laskentaohjelmat käyttävät, ovat seuraavat:

- Rakenne koostuu vaakasuorassa suunnassa äärettömistä kerroksista, joilla on vakio-paksuus ja joilla ei ole omaa painoa. Alin kerros (pohjamaa, kallio) ulottuu äärettömän syvälle alaspäin.
- Rakennekerroksen ominaisuuksia kuvataan kimmomoduulilla (E) ja Poissonin luvulla (ν). Materiaalit oletetaan lineaarisesti kimmoisiksi.
- Kaikki kerrokset ovat isotrooppisia ja homogeenisia. Tämä tarkoittaa, että niiden ominaisuudet ovat samat kaikissa pisteissä ja kaikkiin suuntiin.
- Rakennekerrosten välillä vallitsee täysi kitka.
- Pyöräkuormaa kuvataan tasaisesti jakautuneella ympyränmuotoisella kuormalla.

2.5 Päällysrakennetyypit ja vaurioitumismekanismit

Kuormituskestävyyttä hallitaan

- a) paksuilla kuumapäällystekerroksilla
- b) komposiittirakenteilla
- c) bitumistabiloiduilla rakenteilla ja
- d) maabetonirakenteilla ja hydraulisilla sideaineilla sidotuilla kerroksilla.

Rakenteet poikkeavat toisistaan mm. jäykkyydeltään. Esim. maabetonirakenteita on tyypillisesti käytetty liikkumattomalle (ei muodonmuutoksia) alustalle rakennettaessa ja bitumistabiloituja rakenteita esimerkiksi routivalle maapohjalle rakennetuissa teissä. Komposiitilla haetaan sekä riittävää jäykkyyttä että joustavuutta eli muodonmuutoskykyä.

Paksuilla kuumapäällystekerroksilla tehtyjen tierakenteiden vaurioitumismekanismi on asfalttikerrosten väsyminen eli toistuvat kuormitukset aiheuttavat kerroksen halkeilun ja tierakenteen rappeutumisen.

Komposiittirakenteissa on sekä bitumista että hydraulista sideainetta. Materiaali käyttäytyy kuitenkin kuumapäällysteiden tapaan ja sen vaurioitumismekanismi on väsyminen.

Bitumistabilointi on käyttäytymiseltään sitomattoman ja sidotun materiaalin välimaastossa. Sen vaurioitumismekanismi ei ole perinteisessä mielessä väsyminen. Sen vaurioitumismekanismi perustuu esim. kerrokseen kohdistuvaan vertikaaliseen muodonmuutokseen tai jännitykseen.

Maabetonirakenteilla ja muilla hydraulisilla sideaineilla sidotuilla kerroksilla tehtyjen tierakenteiden vaurioitumismekanismi ei ole väsyminen. Näiden kerrosten vaurioitumismekanismi on yleensä lujittumisen aikana tapahtuva kutistumishalkeilu muutaman metrin välein. Myös lämpötilojen vaihtelun aiheuttamat jännitykset aiheuttavat halkeilua. Käytännössä näille materiaaleille on ominaista tietty jännitys- tai muodonmuutostaso, jota ei saa ylittää, jotta rakenne ei vaurioidu.

2.6 Lähtötietojen määrittäminen

Uuden tierakenteen suunnittelun ja mitoituksen lähtötietoina tarvitaan:

- Tieto tarkastelujaksona rakenteeseen kohdistuvasta liikennesäätöksestä.
- Tieto rakennuspaikan pohjasuhteista (luonnollinen tai "käsitelty" pohjamaa).
- Tieto käytettävistä rakennemateriaaleista ja niiden ominaisuuksista: sitomattomat materiaalit, bitumilla ja sementillä sidotut materiaalit, vahvisteet.
- Suunniteltu tien tasausviiva.

2.7 Jako homogeenisiin osuuksiin

Rakennesuunnittelua varten uusi tielinja jaetaan homogeenisiin osiin liikennesäätösuksen (vuosittainen kuormituskertaluku) sekä routamitoituksen tuottamien rakennekerrosten ja pohjamaan (moduulit) perusteella.

3 LIIKENNERASITUKSEN MÄÄRITYS

Rakenteen kuormituskestävyyssmitoitus tehdään rakenteeseen mitoitusaikana kohdistuvan liikennekuormituksen mukaan. Liikennemäärä ja sen koostumus (ajoneuvotyypit ja painot) on ennuste tai laskemalla saatu arvo. Liikennemäärä saadaan liikennelaskentojen, kaavoituksen, maankäytön suunnittelun ja muiden liikenteeseen todennäköisesti vaikuttavien seikkojen perusteella.

Liikennesäätö voidaan ottaa huomioon kahdella tavalla: joko kuormituskertalukuna vastaavuuskerroinmenetelmällä tai ottamalla huomioon koko raskaan liikenteen akselipainojakautuma ajoneuvotyyppittäin ja painoluokittain (TPPT Menetelmäkuvaus 3. Liikennesäätö laskeminen). Tässä menetelmäkuvaus käytetään vastaavuuskerroinmenetelmää ja kuormituskertalukua. Tällöin mitoitustietä tehdään vain yhdelle standardikuormitukselle.

Vastaavuuskerroinmenetelmä tarkoittaa sitä, että kullakin akseli-/ajoneuvoluokalla on oma vastaavuuskertoimensa, jolla tämän luokan liikennemäärä muunnetaan vastaamaan standardiakselin (100 kN yksittäinen paripyöräakseli) ylityksiä tien poikkileikkauksessa. Näin saadut luvut lasketaan yhteen, jolloin saadaan koko liikenteen aiheuttama kuormituskertaluku (standardiakseleina). Kun päivittäinen kuormituskertaluku kerrotaan tarkastelujakson pituudella, saadaan kumulatiivinen kuormituskertaluku, joka on kuormituskestävyyssmitoituksen lähtöarvo.

Vastaavuuskertoimet määritetään tien vaurioitumistavan ja vaurioitumiskriteerin perusteella. Tässä menetelmässä on käytetty AASHO-kokeesta saatua ns. neljänneksen potenssin sääntöä. Tarkemmassa analyysissä jokaisella akselityypillä on periaatteessa oma vastaavuuskertoimensa, mutta yleensä käytetään vain ajoneuvoluokkien vastaavuuskertoimia.

Taulukossa 3.1 on esitetty vastaavuuskertoimet kuormituskertaluvun laskemiseksi. Vanhoja arvoja käytetään käsiteltäessä liikennettä vuoteen 1998 asti ja uusia arvoja vuodesta 1999 eteenpäin. Uudet arvot on laskettu viimeisen akselimassatutkimuksen tuloksista ennustaen kymmenen vuotta eteenpäin (vuosi 2009 mitoitusvuosi) olettaen liikenteen koostuvan nuoremman kalustosta tulevaisuudessa.

Taulukko 3.1. Ajoneuvotyyppien vastaavuuskertoimet /Pursiainen 2001, Rätty 1999, TIEL 1984/.

	Vanhat (ennuste v.1995)		Uudet (ennuste v. 2009)
	Keskim.	Täysi	Keskim.
LA	0,4		1,2
KAIP	0,4	1,5	0,7
KAPP	1,5	3,0	1,7
KAVP	2,3	4,5	3,2
KAIP+LA	0,4		0,8
KAPP+KAVP	2,1		2,8
RASKAS YHTEENSÄ	1,3		2,2

Yhdistelmäajoneuvoluokan vastaavuuskerroin on määritetty siten, että kerroin painottuu kapp:n ja karp:n nykyisten kertoimien kesken Etelä-Suomen pääteillä LAM-pisteiltä (109 kpl) koottujen tietojen perusteella.

Koko raskaan liikenteen vastaavuuskertoimet perustuvat oletukseen, että 1980-luvulla pääteillä yhdistelmien ja muiden raskaiden ajoneuvojen osuudet olivat 50/50 % ja vuosituhannen lopussa 70/30 %.

Taulukossa 3.2 on esitetty vuonna 1998 tehdyn akselimassatutkimuksen tuloksista ennustetut eri ajoneuvotyyppien kuormitusekvivalentit. Taulukossa on esitetty vuoden 1999 arvot ja vuoden 2009 ennustetut arvot ekvivalenteille sekä vakioituina vuoden 1999 tasoon että lineaariseen kasvuennusteeseen perustuvina. Tarkastelu on tehty erikseen raaka-ainekuljetuksille, muille kuin raaka-ainekuljetuksille sekä kaikille yhteensä /Pursiainen 2001/.

Taulukko 3.2. Ajoneuvotyyppien kuormitusekvivalenttien ennustetut arvot vuonna 2009 eri autotyypeillä.

	KAIP	KAPP	KAVP	LA
Kaikki tavaralajit yhteensä				
1999	0.58	1.48	2.63	0.85
2009 VAK	0.66	1.74	3.16	1.17
2009 LIN	0.70	1.84	3.42	1.29
Raaka-ainekuljetukset				
1999	1.06	2.84	4.68	
2009 VAK	1.42	2.74	4.82	
2009 LIN	1.77	2.84	4.98	
Muut kuin raaka-ainekuljetukset (tyhjät mukana)				
1999	0.54	1.27	1.73	
2009 VAK	0.63	1.49	1.95	
2009 LIN	0.67	1.56	2.05	
Muut kuin raaka-ainekuljetukset (tyhjät ei mukana)				
1999	0.62	1.67	2.54	
2009 VAK	0.73	1.91	2.55	
2009 LIN	0.79	1.99	2.57	
VAK = vakio 1999-2009				
LIN = lineaarinen kasvu 1999-2009				

Tierakenteen mitoituksessa käytettävä vuotuinen kuormituskertaluku lasketaan mahdollisimman tarkasti kulloinkin saatavilla olevien tietojen perusteella. Jos on saatavilla kaikkien ajoneuvoluokkien määrät painoluokittain, käytetään laskennassa niitä kaikkia ja niiden vastaavuuskertoimia, jolloin KKL lasketaan kaavasta (3.1).

$$KKL = k * m * 365 \left[\sum k_{Ei} * n_i \right], \quad (3.1)$$

missä,

- KKL = vuotuinen kuormituskertaluku
- k = liikenteen kasvukerroin
- m = ajoradan leveydestä riippuva kerroin
- k_{Ei} = akseliston i vastaavuuskerroin
- n_i = akseliston i vuorokautinen liikennemäärä

Jos on käytettävissä raskaan liikenteen määrä jaettuna vain kahteen luokkaan (yhdistelmät ja muut) (kuten tierekisterissä), vuotuinen kuormituskertaluku KKL (vuoteen 1998 asti) lasketaan kaavalla (3.2).

$$KKL = k * m * [0,4 * (KVL_{ras} - KVL_{yhd}) + 2,1 * (KVL_{yhd})] * 365, \quad (3.2)$$

missä,

KKL = vuotuinen kuormituskertaluku

K = liikenteen kasvukerroin

M = ajoradan leveydestä riippuva kerroin,

KVL_{ras} = raskaiden ajoneuvojen vuoden keskimääräinen vuorokausiliikenne ja

KVL_{yhd} = yhdistelmäajoneuvojen (KAPP + KATP) vuoden keskimääräinen vuorokausiliikenne.

Uusi laskentakaava (vuodesta 1999 lähtien, ennuste v. 2009) on kaava (3.3).

$$KKL = k * m * [0,8 * (KVL_{ras} - KVL_{yhd}) + 2,8 * (KVL_{yhd})] * 365, \quad (3.3)$$

Koko suunnittelujakson kuormituskertaluku saadaan kertomalla vuotuinen kuormituskertaluku suunnitteluiällä (vuosina). Kaavojen (3.2) ja (3.3) ajoneuvojen vastaavuuskertoimet on esitetty taulukossa 3.2 ja tien leveyskerroin taulukossa 3.3.

Taulukko 3.3. Tien leveyskerroin /TIEL 1984/.

Ajoratojen lkm	Ajoradan leveys	Kerroin m
1	< 7,5 m	1
1	7,5 - 9,0 m	0,75
1	> 9,0 m	0,5
2	< 9,0 m	0,5
2	> 9,0 m	0,4

Kuormituskertaluku-menetelmässä mitoituslaskelma tierakenteen vasteille tehdään vain yhdelle tapaukselle eli standardikuormitukselle. Tien kestoikä määritetään lasketun vasteen perusteella vauriokriteeriin pohjautuen.

4 KENTTÄKALIBROITU TPPT-VÄSYMISKRITEERI

4.1 Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan ennustemalli

Kehitetty malli on todennäköisyysmalli, jolla vaurioitumista selitetään rakennetta kuvaavilla tiedoilla ja rakenteeseen kohdistuvia rasituksia kuvaavilla tiedoilla. Mallinnusprosessia on kuvattu tarkemmin liitteessä 1. Tuloksena saatiin ns. TPPT-referenssirakenteen kenttäkalibroitu päällysteen alapinnan muodonmuutokseen perustuva väsymiskriteeri (kaava 4.1). Referenssirakenteella tarkoitetaan tässä yhteydessä rakennetta, jossa sitomattomien rakennekerrosten päällä on yksi tai useampi asfalttikerros.

$$N_{10} = 10^{7.29 - 0.00372 \cdot (\text{EPS}) - 5840000 \cdot \left(\frac{1}{\text{EPS} \cdot N_{10} Y} \right)}, \quad (4.1)$$

missä,

N_{10} = kumulatiivinen kuormituskertaluku päällysteen vaurioitumisen alkamisajan kohtaan, 100 kN

EPS = päällysteen alapinnan sallittu muodonmuutos, $\mu\text{m}/\text{m}$

$N_{10} Y$ = mitoitusjakson keskimääräinen vuotuinen kuormituskertaluku, 100 kN

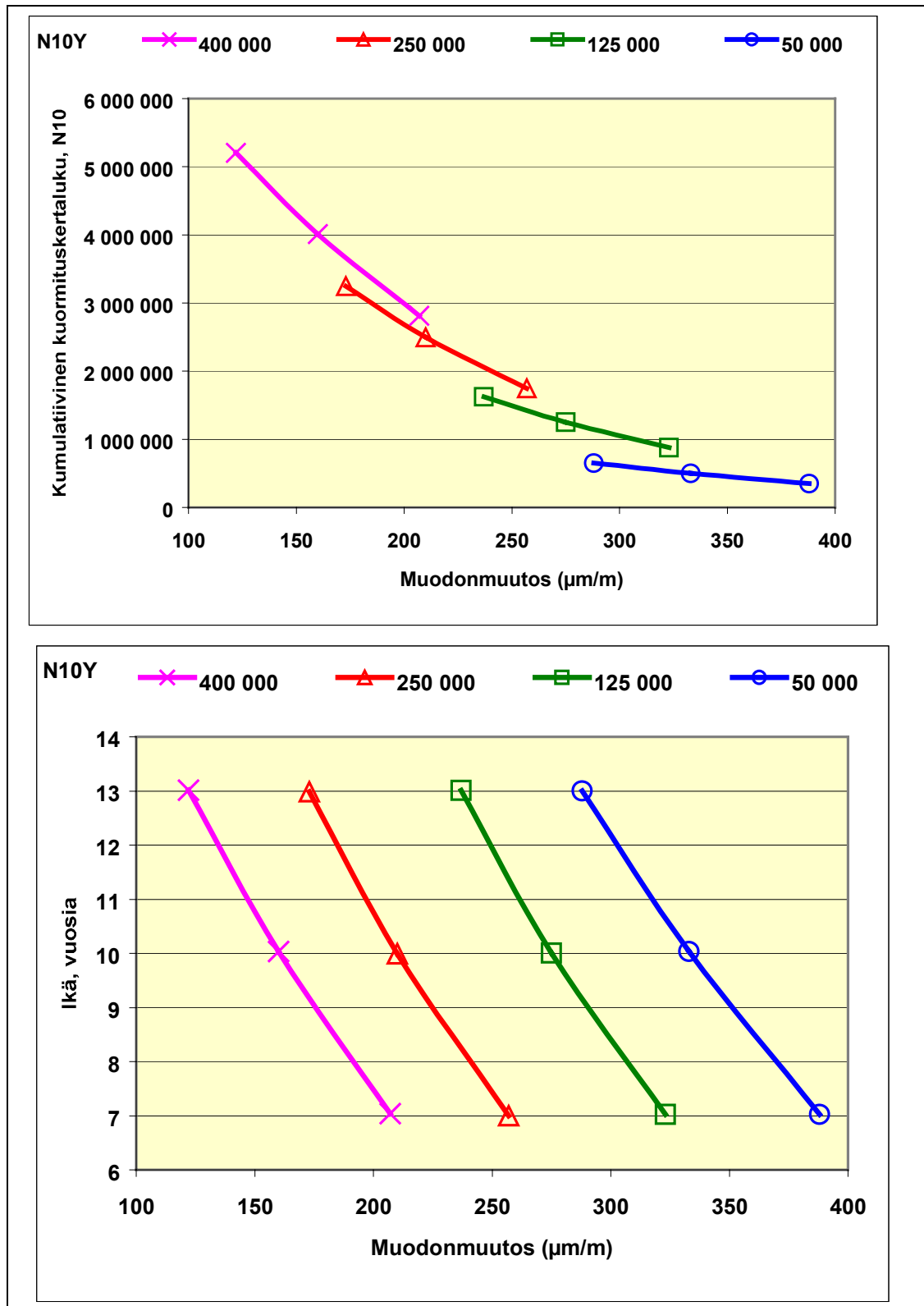
Mallin lopussa oleva termi, $\left(\frac{1}{\text{EPS} \cdot N_{10} Y} \right)$, kuvaa asfaltin vanhenemisen vaikutusta tien vau-

rioitumisen alkamisajankohtaan. Mitä hitaammin liikennekuormitukset kohdistuvat tiehen (pieni $N_{10} Y$), sitä vähemmän kuormituksia tie kokonaisuudessaan kestää, eli vanhenemisen vaikutus vaurioitumiseen kasvaa.

Kaava (4.1) antaa kumulatiivisen kuormituskertaluvun viimeisimmästä kuormituskestävyyteen vaikuttavasta toimenpiteestä (rakenteen parantaminen tai päällystys) vaurioitumisen alkamishetkeen. Taulukossa 4.1 on esitetty ennustemallin tilastolliset tunnusluvut sekä kuvassa 4.1 ennustemallin kuvaajat neljälle eri liikennemäärälle. Kuvaajat on piirretty aineiston tyypillisille päällysteen alapinnan muodonmuutosalueille eri liikennemääräluokille.

Taulukko 4.1. Ennustemallin tilastolliset tunnusluvut.

SAS Lifereg Procedure					
Dependent Variable		ln10cir	Dependent Variable		ln10ci1
Number of Observations		429	Noncensored Values		177
Right Censored Values		207	Left Censored Values		45
Interval Censored Values		0	Missing Values		3
Name of Distribution		WEIBULL	Log Likelihood		-269.1023054
Analysis of Parameter Estimates					
Variable	DF	Estimate	Standard Error	Chi-Square	Pr > ChiSq
Intercept	1	7.29098	0.08739	6961.3664	<.0001
eps	1	-0.0037227	0.0003589	107.5863	<.0001
heps	1	-5840634.1	301218.6	375.9728	<.0001
Scale	1	0.32435	0.01876		
Estimated Covariance Matrix					
	Intercept	simueps	hsimueps	Scale	
Intercept	0.007636	-0.000029442	-10838	0.000406	
eps	-0.000029442	0.000000129	21.613928	-0.000001142	
heps	-10838	21.613928	90732651603	-788.275605	
Scale	0.000406	-0.000001142	-788.275605	0.000352	



Kuva 4.1. Mallin (kaava 4.1) kuvaajat neljälle eri liikennemäärälle kumulatiivisen kuormituskertaluvun ja iän suhteen.

4.2 Ennustemallin käyttörajoitukset

Ennustemallin käytössä on aina huomioitava mallin "luvallinen" käyttöalue ja vastaavasti mallin rajoitukset. Nämä rajoitukset voivat johtua mallin kehittämiseen käytetyn aineiston koostumuksesta (malli käyttökelpoinen vain aineiston kattamalla alueella) tai mallinnuksen taustalla olevan teorian aiheuttamista rajoituksista (esim. vaurioitumismekanismi ei ole voimassa). Seuraavassa on esitetty mallin (4.1) käyttöalueyhtälö, jolla kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan mallin raja-arvon voi laskea (kaava 4.2).

$$EPS_{\min} = \sqrt{\frac{5840000}{0.00372 \cdot N_{10} Y}}, \quad (4.2)$$

missä,

$EPS_{\min}$ = pienin sallittu päällysteen alapinnan muodonmuutos, $\mu\text{m}/\text{m}$

$N_{10} Y$ = mitoitusjakson keskimääräinen vuotuinen kuormituskertaluku, 100 kN

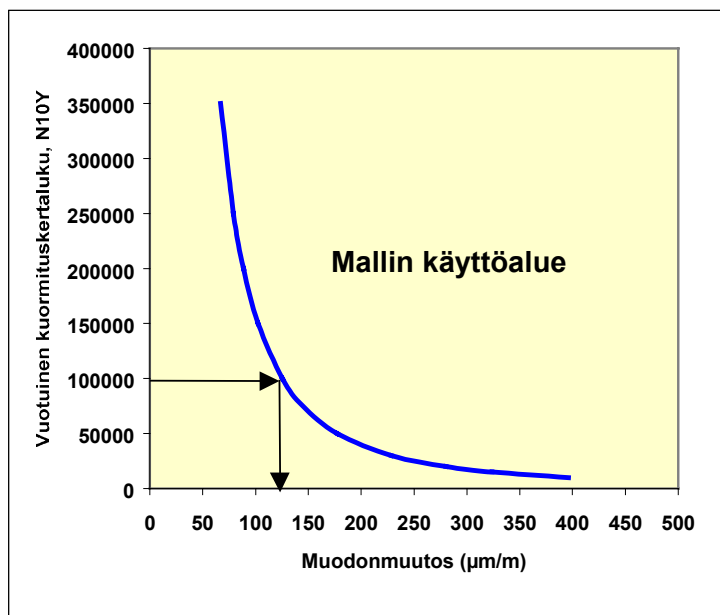
Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohdan malli (4.1) sisältää toisena selittäjänä yhdysvaikutustekijän, jossa huomioidaan kuinka nopeasti kuormituskertaluku toteutuu. Mikäli kuormitusten lukumäärä toteutuu liian hitaasti, ei väsyminen ole enää primääri vaurioitumismekanismi vaan vaurioituminen syntyy muista syistä. Tämä näkyy rajakäyränä kuvassa 4.2. Muodonmuutoksen ja vuosittaisen kuormituskertaluvun leikkauspisteen tulee olla käyrän oikealla / yläpuolella.

Aineiston rajoitusten asettamat käyttöalueet kaavan (4.1) mallille

Vuotuinen kuormituskertaluku:
 $30\,000 < KKL < 450\,000$

Päällysteen paksuus $> 60\text{ mm}$

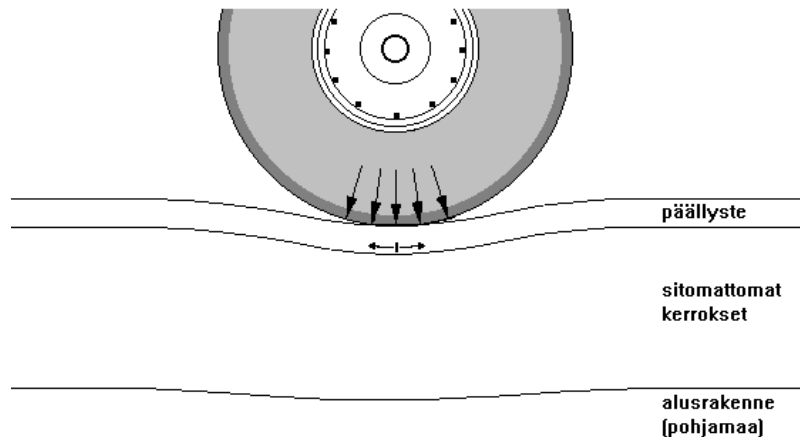
Rakennetyyppi:
 Yksi tai useampi asfalttikerros
 sitomattomien rakennekerrosten päällä



Kuva 4.2. Mallin (kaava 4.1) käyttörajoitus, esim. 100 000 vuotuiselle KKL:lle raja-arvona on $EPS = 125\ \mu\text{m}/\text{m}$.

5 JÄNNITYSTEN JA MUODONMUUTOSTEN LASKENTA

Tierakenteen jännitykset ja muodonmuutokset lasketaan lineaarisella monikerrosohjelmalla, jonka perusteet ja lähtöolettamukset on esitetty luvussa 2. Päälysrakenteen kuormituskestävyysmitoitus perustuu päälysteen väsymisteoriaan, jossa päälysteen vaurioitumista selittää sen alapinnan vaakasuora vetomuodonmuutos (kuva 5.1). Yleensä lasketaan tien pituussuuntainen vetomuodonmuutos päälysteen alapinnassa. Tierakenne voi vaurioitua myös muilla tavoilla (esim. pohjamaa ja rakennekerrokset vaurioituvat ilmaston vaikutuksesta), mutta näitä ei ole käsitelty tässä yhteydessä. Rakenteiden jännitykset ja muodonmuutokset voidaan laskea myös rakenteen muissa kohdissa kuin päälysteen alapinnassa.



Kuva 5.1. Pyöräkuorman aiheuttama päälysteen alapinnan vetomuodonmuutos.

Muodonmuutosten laskennan lähtötietoina tarvitaan

- rakennekerrospaksuudet: valitaan rakennekerrosmateriaalit ja niiden paksuudet alustavan rakennevaihtoehdon laskentaa varten, ottaen huomioon routamitoituksen tuottamat rakennekerrosten minimipaksuudet.
- rakennekerrosten moduulit: rakennekerrosmateriaalien kimmomoduulit määritetään laboratoriokokeilla tai käytetään taulukkoarvoja tunnetuista materiaaleista (TPPT raportti: Tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalivalinnoille. Tiehallinnon selvityksiä 66/2001) alustavan rakennevaihtoehdon laskentaa varten.
- Poissonin luku (bitumisille materiaaleille käytetään arvoa $\nu = 0,35$).
- kuormituksena käytetään pudotuspainolaitteen aiheuttamaa kuormitusta: ympyrämuotoinen kuorma 50 kN ja kuormitusalan säde 0,15 m.
- laskentapisteiden (esim. päälysteen alapinnan) koordinaatit.

Laskennan tuloksena saadaan

- jännitykset, muodonmuutokset ja siirtymät laskentapisteissä (esim. päälysteen alapinta).

Sitomattomien materiaalien jäykkyys riippuu niiden jännitystilasta ja -tasosta. Rakennekerroksissa käytettävien karkearakeisten materiaalien moduuli on sitä suurempi, mitä suurempi niiden jännitystaso on (TPPT Raportti 22. Sitomattomat tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalien käyttäytymisestä).

Kokonaisjännitystaso rakenteen eri syvyyksissä lasketaan kaavalla (5.1).

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (5.1)$$

Tämän jälkeen rakennekerrosmateriaalin moduulia korjataan tarvittaessa uutta jännitystilaa vastaavaksi materiaalin jännitysriippuvuusominaisuuden mukaan (kaava 5.2).

$$M_r = K_1 * \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^{K_2}, \quad (5.2)$$

missä,

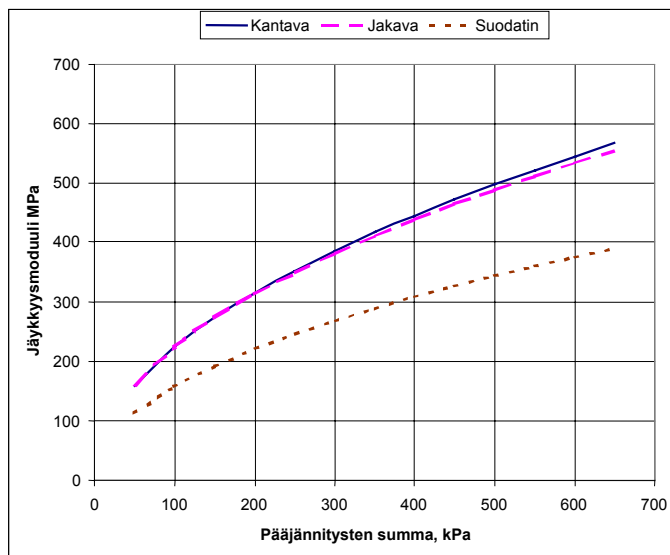
- M_r = jäykkyysmoduuli, kPa
- ϕ = pääjännitysten summa, kPa ($=\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)
- ϕ_0 = vertailujännitys, 1 kPa
- K_1, K_2 = materiaaliparametrit

Kaikista rakennekerrosten mitoituksessa käytettävistä materiaaleista tulee tuntee niiden jännitysriippuvuus. Mikäli materiaalien jännitysriippuvuutta ei tunneta, voidaan materiaali-parametreille K_1 ja K_2 käyttää taulukossa 5.1 esitettyjä tyyppi-arvoja /Kolisoja 1996/.

Taulukko 5.1. Tierakenteen eri kerrosten materiaaliparametrit /Kolisoja 1996 , Belt 1997/.

	K_1	K_2
Kantava kerros	23 000	0,50
Jakava kerros	24 000	0,49
Suodatinkerros	17 000	0,48

Kuvassa 5.2 on esitetty rakennekerroksessa vallitsevan kokonaisjännitystason ja jäykkyysmoduulin riippuvuus eräissä rakennekerrosten "tyypimateriaaleissa".



Kuva 5.2. Rakennekerroksessa vallitsevan kokonaisjännitystason ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) ja jäykkyysmoduulin riippuvuus.

6 KUORMITUSKESTÄVYYSMITOITUS

6.1 Mitoitusjakso ja väsymiskriteeri

Tien kuormituskestävyysmitoitus TPPT-suunnittelujärjestelmässä perustuu mekanistis-empiiriseen menetelmään, jossa kriteerinä on mitoitusjakson aikana rakenteeseen kohdistuva kuormituskertalukua vastaava päällysteen alapinnan sallittu muodonmuutos.

Mitoitus aloitetaan valitsemalla mitoitusjakson pituus. Mitoitusjakso päättyy, kun väsymiskriteerillä ennustettu tien liikenneperäinen vaurioituminen alkaa. Mitoitusjakson pituudeksi suositellaan tässä yhteydessä 10 vuotta. Mitoitusjakson pituus on kuitenkin hallinnollinen päätös, jolla voidaan säätää lopullisen rakenteen paksuutta (mitä pidempi mitoitusjakso, sitä paksumpi rakenne). Tässä suositeltu 10 vuoden mitoitusjakso perustuu mitoituskriteerin kehityksessä käytetyn aineiston keskimääräiseen päällysteen ikään liikenneperäisten vaurioitumisen alkaessa.

Ensin määritetään mitoitusjakson aikana rakenteeseen kohdistuva kuormituskertaluku (esim. 10 ensimmäisen vuoden aikana toteutuva kuormituskertaluku). Tätä kuormituskertalukua vastaava päällysteen alapinnan sallittu muodonmuutos määritetään väsymiskriteerimallilla. Kun edellä laskettu kuormituskertaluku jaetaan mitoitusjakson vuosien lukumäärällä (10), saadaan mallissa tarvittava vuotuinen keskimääräinen kuormituskertaluku.

Asfaltilla sidottujen kerrosten paksuuden ollessa vähintään noin 60 mm vaurioitumismekanismi on yleensä väsyminen eli toistuvat kuormitukset rikkovat rakenteen. Tämä materiaalikriteeri määritetään laboratoriossa väsymiskokeella. Kun muodonmuutoksen taso ja kuormituskertojen lukumäärä esitetään kumpikin logaritmiasteikolla, kokeen tulosta kutsutaan väsymissuoraksi. Väsymiskokeella voidaan verrata eri päällystemassojen ominaisuuksia keskenään, kun taas koetiekoneella (esim. HVS) voidaan verrata erilaisten rakenteiden käyttäytymistä keskenään.

Laboratoriossa tai koetiekoneella määritetty päällysteen väsymissuora pitää aina kalibroida kentällä (todellisella tiellä) havaitun vaurioitumisen kanssa, jotta sitä voidaan käyttää kriteerinä mitoituksessa. Tässä tapauksessa kriteeriä kutsutaan väsymiskriteeriksi.

Seuraavassa on esitetty TPPT-referenssirakenteen kenttäkalibroitu päällysteen alapinnan muodonmuutokseen perustuva väsymiskriteeri (kaavat 6.1 ja 6.2):

$$N_{10} = 10^{7.29 - 0.00372 \cdot (\text{EPS}) - 5840000 \cdot \left(\frac{1}{\text{EPS} \cdot N_{10}^Y} \right)}, \quad (6.1)$$

Yhtälöstä voidaan ratkaista muodonmuutos:

$$\text{EPS} = \frac{\left(\sqrt{\left((\log(N_{10}) - 7.29)^2 - \frac{4 \cdot 0.00372 \cdot 5840000}{N_{10}^Y} \right)} \right) - \log(N_{10}) + 7.29}{\frac{2}{0.00372}}$$

ja kirjoittaa se muotoon:

$$EPS = \frac{\left(\sqrt{\left(\log(N_{10}) - 7.29 \right)^2 - \frac{86900}{N_{10}Y}} \right) - \log(N_{10}) + 7.29}{0.00744}, \quad (6.2)$$

missä,

EPS = päällysteen alapinnan sallittu muodonmuutos, $\mu\text{m}/\text{m}$

N_{10} = kumulatiivinen kuormituskertaluku päällysteen vaurioitumisen alkamisajan kohtaan, 100 kN

$N_{10}Y$ = mitoitusjakson keskimääräinen vuotuinen kuormituskertaluku, 100 kN.

Yllä esitetty kenttäkalibroitu väsymiskriteeri perustuu havaintotieaineiston pitkäaikaisseurannan tuloksena kehitettyyn vaurioitumisen alkamisajankohdan ennustemalliin. Malli perustuu 635 havaintotiekohteen aineistoon, josta 50 kohdetta on Suomessa ja loput Ruotsissa. Rakenteet ovat ns. perinteisiä rakenteita, joissa on yksi, kaksi tai kolme asfalttipäällystettyä sitomattomien kerrosten päällä.

Koska uusien tai harvemmin käytettyjen rakenneratkaisujen käyttäytymisestä tieverkolta ei ole käytännössä saatavissa kenttähavaintoihin perustuvaa tietoa, on laboratoriossa väsymislaitetta (PANK 4206) hyväksikäyttäen määritettävä materiaaleille suhteelliset vaurioitumiskertoimet (kansainvälisesti tunnettu nimellä "Shift-Factor"). Näillä kertoimilla lasketaan materiaalien suhteellinen kestävyys kenttäolosuhteissa, kun tiedetään materiaalien välinen väsymiskestävyys laboratoriossa.

6.2 Referenssirakenteen mitoitus

Päällysrakenteen kuormituskestävyyshitoitus tapahtuu siten, että aluksi valitaan mitoitusjakson pituus (10 v, joka on 50 % tien normaalista mitoitusiästä). Tälle mitoitusjaksolle lasketaan sen aikana syntyvä kuormituskertaluku luvussa 3 esitetyllä tavalla.

Luvussa 4 esitetyn päällysteen väsymiskriteerin perusteella rakenteelle määritetään mitoitusjakson kuormituskertalukua vastaava suurin sallittu muodonmuutos.

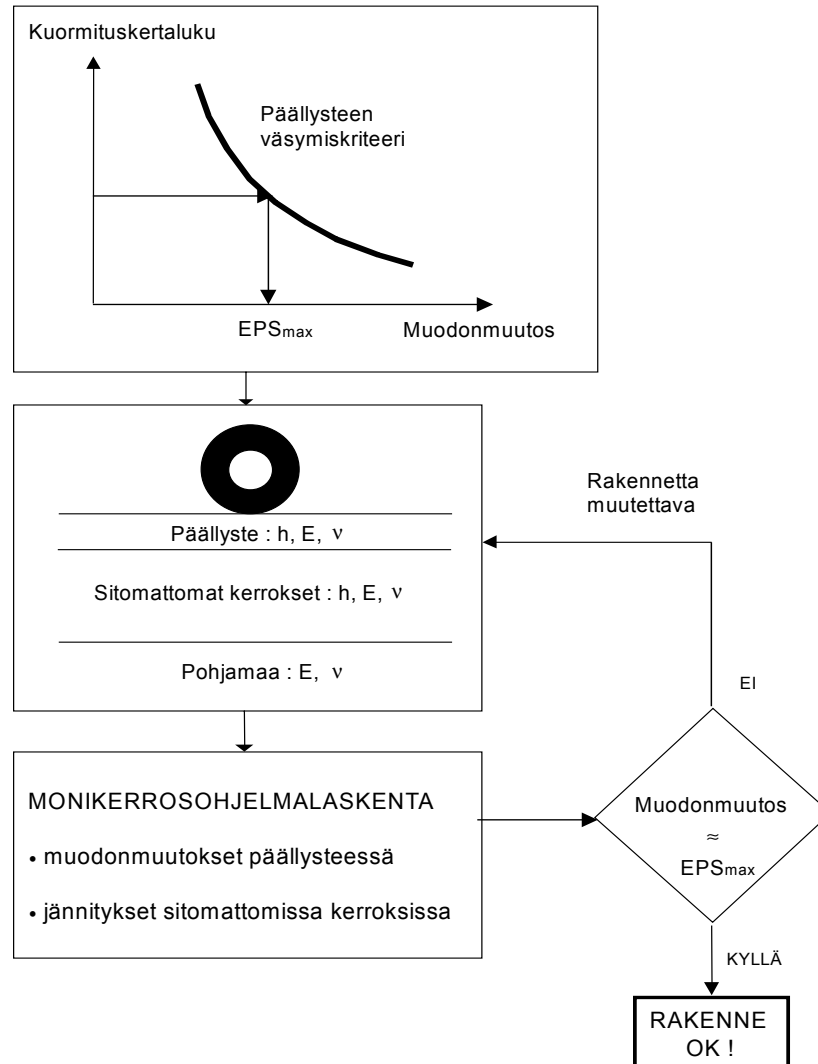
Tämän jälkeen valitaan rakennekerrosmateriaalit ja niiden paksuudet alustavan rakennevaihtoehdon laskentaa varten. Laskennassa otetaan huomioon routamitoituksen tuottamat rakennekerrosten minimipaksuudet.

Materiaalien ominaisuuksista tulee tuntea niiden kimmomoduuli (E) ja Poissonin luku (ν). Kimmomoduulit (myös taulukkoarvoina) ja niiden määrittämismenetelmät yleisimmille rakennekerrosten materiaaleille on esitetty esim. TPPT- raportissa "Tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalivalinnoille. Tiehallinnon selvityksiä 66/2001".

Mitoitettavalle rakenteelle lasketaan lineaaris-elastisella monikerrosohjelmalla standardikuormituksen aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset rakenteessa luvussa 5 esitetyllä tavalla.

Laskettuja muodonmuutoksia verrataan päällysteen väsymiskriteeriin perustuvaan mitoitusjakson suurimpaan sallittuun muodonmuutokseen. Mikäli laskettu muodonmuutos ylittää mitoitusjakson sallitun muodonmuutoksen, tulee rakennetta vahvistaa. Vastaavasti mikäli laskettu muodonmuutos alittaa mitoitusjakson sallitun muodonmuutoksen, voi rakennekerrospaksuuksia ohentaa, edellyttäen kuitenkin ettei routamitoituksen asettamaa minimipaksuutta aliteta.

Tällä tavoin iteroimalla laskennalla saavutetaan lopuksi rakenne, jossa sallittu ja laskettu muodonmuutos ovat lähes yhtäsuuria. Edellä kuvatut mitoitusprosessin periaatteet on havainnollistettu kuvassa 6.1.



Kuva 6.1. Referenssirakenteen kuormituskestävyyden mitoitusprosessi.

6.3 Vaihtoehtoisen rakenteen mitoitus

Perinteisestä rakenteesta poikkeavien rakenteiden mitoituksessa, jolloin tieverkolta ei ole saatavissa kenttähavaintoihin perustuvaa väsymiskriteeriä, käytetään väsymiskriteerien määrittämisessä suhteellisia kertoimia. Vaihtoehtoisten uusien tai harvemmin käytettyjen rakenneratkaisujen käyttäytyminen on ensin tutkittava laboratoriossa. Väsymislaitetta hyväksi käyttäen on määritettävä materiaalille väsymissuora. Saadun väsymissuoran ja referenssimateriaalin väsymissuoran avulla määritetään ko. materiaalille suhteellinen vaurioitumiskerroin, josta tässä yhteydessä käytetään nimeä "**väsymiskerroin**". Tällä kertoimella lasketaan materiaalin suhteellinen kestävyys kenttäolosuhteissa. Laskentaprosessi sisältää seuraavat vaiheet:

1. Määritetään mitoitusjakson kumulatiivinen kuormituskertaluku (N).
2. Lasketaan referenssirakenteen kenttäkalibroidulla väsymiskriteerillä kuormituskertalukua (N) vastaava muodonmuutos (EPS).
3. Määritetään referenssimateriaalin laboratorioväsymissuorasta kuormituskertalukua (N) vastaava muodonmuutos (EPS_lab_ref).
4. Määritetään vaihtoehtoisen materiaalin laboratorioväsymissuorasta kuormituskertalukua (N) vastaava muodonmuutos (EPS_lab_mat).
5. Lasketaan laboratoriomuodonmuutosten väsymiskerroin.
6. Kerrotaan referenssirakenteen kenttäkalibroidulla väsymiskriteerillä saatava muodonmuutos (EPS) laboratoriomuodonmuutosten väsymiskertoimella.
7. Mitoitusta jatketaan referenssirakenteen mitoitusmenetelmällä (luku 6.2).

Seuraavassa on esitetty yksityiskohtaisemmin tämän laskentaprosessin vaiheet:

1. Määritetään mitoitusjakson kumulatiivinen kuormituskertaluku (N) TPPT Menetelmäkuvaus 3 ”Liikennesäilytyksen laskeminen” mukaisesti. Tällöin 10 vuoden mitoitusjakson kuormituskertaluku on sama kuin 10 vuoden aikana kertynyt kuormituskertaluku. Kun tämä laskettu kuormituskertaluku jaetaan mitoitusjakson pituudella (10), saadaan kohdan 2 mallissa tarvittava vuotuinen kuormituskertaluku.
2. Lasketaan referenssirakenteen kenttäkalibroidulla väsymiskriteerillä (kaava 6.2) kohdassa 1 saatua kuormituskertalukua (N) vastaava sallittu muodonmuutos (EPS).

$$EPS = \frac{\left(\sqrt{\left((\log(N_{10}) - 7.29)^2 - \frac{86900}{N_{10}Y} \right)} \right) - \log(N_{10}) + 7.29}{0.00744} ,$$

missä,

- EPS = päällysteen alapinnan sallittu muodonmuutos, referenssimateriaalin kenttäkalibroitu väsymiskriteeri ($\mu\text{m/m}$)
- N_{10} = kumulatiivinen kuormituskertaluku päällysteen vaurioitumisen alkamisajankohtaan, 100 kN
- $N_{10}Y$ = mitoitusjakson keskimääräinen vuotuinen kuormituskertaluku, 100 kN.

3. Määritetään referenssimateriaalin laboratorioväsymissuorasta kuormituskertalukua (N) vastaava sallittu muodonmuutos (EPS_lab_ref).

Päällysteen väsymisellä tarkoitetaan toistuvien liikennekuormitusten aikaansaamaa päällysteen kestävyysheikkenemistä. Heikkenemiseen vaikuttavat olosuhteiden lisäksi materiaali- ja mitoistekijät. Asfaltin väsyminen etenee asfalttikerroksen alapinnasta yläpintaan, aluksi hiushalkeamina, myöhemmin murtumina. Ensimmäisen halkeaman muodostuessa ja halkeamien lisääntyessä alenee ko. kerroksen jäykkyys. Asfaltin väsyyslaitteella (PANK 4206) voidaan laboratoriossa simuloida päällysteeseen kohdistuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Tulokset esitetään väsymisyhtälönä (kaava 6.3) ja väsymissuorana. Väsymislaitteella mitattava kuormituskertaluku ei ole tierakenteen todellisuudessa kestävä kuormituskertaluku vaan materiaalikohtainen ominaisuus. Väsymisyhtälö on yleisesti muotoa :

$$N = A * \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^B, \quad (6.3)$$

missä

N = kuormituskertojen lukumäärä
 ε = sallittu muodonmuutos ($\mu\text{m}/\text{m}$)
 A, B = materiaaliparametrit

Yhtälöstä voidaan ratkaista muodonmuutos ja kirjoittaa se muotoon (6.4).

$$\text{EPS_lab_ref} = 10^{\left(\frac{\log(A) - \log(N)}{B}\right)}, \quad (6.4)$$

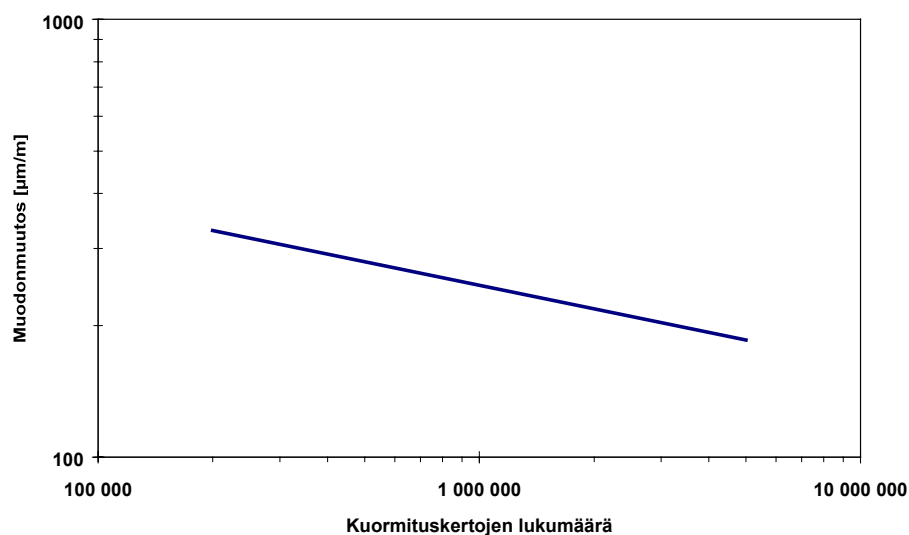
missä,

N = kuormituskertojen lukumäärä
 EPS_lab_ref = referenssimateriaalin sallittu muodonmuutos ($\mu\text{m}/\text{m}$)
 A, B = referenssimateriaalin materiaaliparametrit

Taulukossa 6.1 on esitetty referenssimateriaalin (AB20 B70/100) materiaaliparametrit ja kuvassa 6.2 referenssimateriaalin väsymissuora.

Taulukko 6.1. AB20 B70/100 massan materiaaliparametrit väsytykskokeessa (voimaohjattu).

log(A)	B
19,4	5,6



Kuva 6.2. AB20 B70/100 päällysteen laboratorioväsymissuora (PANK 4206).

- Määritetään vaihtoehtoisen materiaalin laboratorioväsymissuorasta kuormituskertalukua (N) vastaava sallittu muodonmuutos (EPS_lab_mat) yhtälöllä (6.5). Taulukossa 6.2 on esitetty laboratorioväsymiskokeilla määritetyt materiaaliparametrit ja kuvassa 6.3 materiaalien väsymissuorat.

$$\text{EPS}_{\text{lab_mat}} = 10^{\left(\frac{\log(A) - \log(N)}{B} \right)}, \quad (6.5)$$

missä,

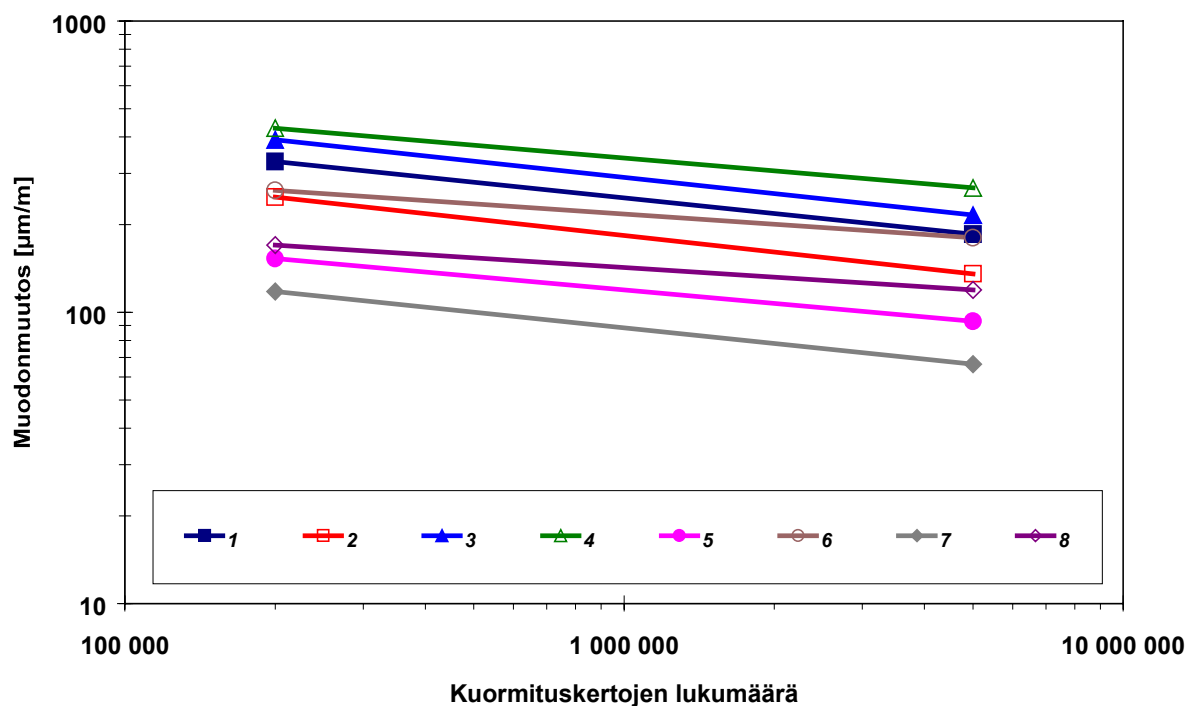
N = kuormituskertojen lukumäärä

EPS_lab_mat = vaihtoehtoisen materiaalin sallittu muodonmuutos (µm/m)

A, B = vaihtoehtoisen materiaalin materiaaliparametrit

Taulukko 6.2. Laboratorioväsymiskokeilla määritetyt materiaaliparametrit / Apilo 1996, Laukkanen 1999, Spoof 1992/.

Massatyyppejä _ Sideaine	log(A)	B	Kuvassa nro	
AB _ B70/100 (referenssi)	19,4	5,6	1	Spoof 1992
AB _ B20/30	18,0	5,3	2	
AB _ B100/150	19,3	5,4	3	
AB _ B250/330	23,2	6,8	4	
ABK _ B20/30	19,5	6,5	5	
ABK _ B70/100	26,1	8,6	6	Apilo 1996
Komposiitti _ C (Imeytetty avoin asfaltti)	16,9	5,6	7	Laukkanen 1999
Komposiitti _ B (Asfalttirouhe)	25,6	9,1	8	



Kuva 6.3. Laboratorioväsymiskokeilla määritetyt materiaalien väsymissuorat.

HUOM ! Päälysrakenteen kuormituskestävyyssmityituksen vaatimuksena on, että lähötietona tunnetaan sidottujen materiaalien väsymisominaisuudet.

5. Lasketaan laboratoriotulosten perusteella väsymiskerroin. Väsymiskerroin saadaan jakamalla kohdassa 4 laskettu vaihtoehtoisen materiaalin sallittu muodonmuutos ja kohdassa 3 laskettu referenssimateriaalin sallittu muodonmuutos keskenään (kaava 6.6). Taulukossa 6.3 on esitetty vaihtoehtoisten materiaalien väsymiskertoimet luokiteltuna vuotuisen kuormituskertaluvun mukaan.

$$\text{Väsymiskerroin} = \frac{\text{EPS}_{\text{lab_mat}}}{\text{EPS}_{\text{lab_ref}}}, \quad (6.6)$$

missä,

Väsymiskerroin = laboratoriomuodonmuutosten väsymiskerroin

EPS_{lab_mat} = vaihtoehtoisen materiaalin sallittu muodonmuutos (μm/m)

EPS_{lab_ref} = referenssimateriaalin sallittu muodonmuutos (μm/m)

Taulukko 6.3. Vaihtoehtoisten materiaalien väsymiskertoimia.

Massatyyppi	N10Y		
	< 100000	100000 – 200000	> 200000
AB_B70/100 (referenssi)	1,00	1,00	1,00
AB_B20/30	0,75	0,74	0,74
AB_B100/150	1,18	1,17	1,17
AB_B250/330	1,35	1,38	1,41
ABK_B20/30	0,48	0,49	0,50
ABK_B70/100	0,85	0,89	0,93
Komposiitti_C (Imeytetty avoin asfaltti)	0,36	0,36	0,36
Komposiitti_B (Asfalttirouhe)	0,56	0,59	0,61

6. Vaihtoehtoisen materiaalin sallittu muodonmuutos saadaan, kun referenssirakenteen kenttäkalibroidulla väsymiskriteerillä (kaava 6.7) laskettu muodonmuutos (EPS) kerrotaan taulukon 6.3 laboratoriomuodonmuutosten väsymiskertoimella.

$$\text{EPS}_{\text{mat}} = \text{Väsymiskerroin} \cdot \text{EPS}, \quad (6.7)$$

missä

EPS_{mat} = on vaihtoehtoisen materiaalin kenttäkalibroitu väsymiskriteeri (μm/m)

Väsymiskerroin=laboratoriomuodonmuutosten väsymiskerroin

EPS = päällysteen alapinnan sallittu muodonmuutos, referenssimateriaalin kenttäkalibroitu väsymiskriteeri (μm/m)

7. Tämän jälkeen mitoittamista jatketaan luvussa 6.2 (Referenssirakenteen mitoitus) esitetyllä tavalla.

7 PARANNETTAVAN RAKENTEEN MITOITUS

Tässä luvussa on esitetty vain ne rakenteen mitoitusasiat, jotka poikkeavat uuden tierakenteen mitoituksesta. Merkittävimmät poikkeamat ovat lähtötietojen hankinnassa. Määrittämällä vanhan rakenteen tilan saadaan selville vauriot, kerrospaksuudet ja materiaalien moduulit. Jako homogeenisiin osuuksiin poikkeaa myös uuden tien tapauksesta.

7.1 Kuormituskestävyysmitoituksen lähtötiedot

Rakenteen parantamisen tarve ja menetelmä määritetään vanhan rakenteen tilan perusteella. Tällöin on arvioitava vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät (vauriodiagnoosi). Tämän perusteella määritetään tarvittavat tutkimukset, joilla on toisaalta todettava vaurioitumisen syyt ja toisaalta turvattava korjausrakenteen suunnittelussa tarvittavat mitoituksen lähtötiedot. Tien vaurioituminen on joko kuormitus-, ilmasto- tai painumaperäistä.

Alustava arvio voidaan tehdä tasaisuusmittaustietojen (TPPT Menetelmäkuvaus 16 "Palvelutasomittaus (PTM) tien rakenteen parantamisen suunnittelussa") ja vauriokartoituksen perusteella (TPPT Menetelmäkuvaus 15 "Tien vauriokartoitus ja vaurioiden kuvaus"). Kartoituksen perusteella voidaan myös rajata alustavasti vaurioituneen osuuden pituus. Liikenneperäiset vauriot ovat joko päällysteen ajourien urautumista tai halkeilua (mm. verkkohalkeilu) tai pohjamaan urautumisesta (sulamisvaihe) johtuvaa epätasaisuutta. Arvio voidaan todentaa ja korjaustarve rajata mm. kantavuusmittauksilla. Taulukossa 7.1 on esitetty parannettavan rakenteen kuormituskestävyysmitoituksessa tarvittavat parametrit ja niiden arviointi- ja määrittämenetelmät laboratorioissa ja kentällä.

Taulukko 7.1. Parannettavan rakenteen kuormituskestävyysparametrien arviointi- ja määrittämenetelmät laboratorioissa ja kentällä.

Parametri	Määrittäys- tai arviointitapa	Menetelmä
pohjamaan moduuli, E_{PM}	<u>Laboratoriossa</u> 3-akselikoe arvo rakeisuuden perusteella <u>Kentällä</u> PPL + takaisinlaskenta CPTU	TPPT 1 ja 2 TPPT 11
Sitomattomien kerrosten moduuli, E_{SIT}	<u>Laboratoriossa</u> 3-akselikoe arvo rakeisuuden perusteella <u>Kentällä</u> PPL + takaisinlaskenta CPTU	TPPT 22 TPPT 1 ja 2 TPPT 11
sidottujen kerrosten moduuli, E_{SID}	<u>Laboratoriossa</u> Epäsuora vetokoe (ITT) taulukkoarvo <u>Kentällä</u> PPL + takaisinlaskenta	PANK 42 04 TIEH 66/2001 TPPT 1 ja 2
Poissonin luku, ν_i	Taulukko	TIEH 66/2001
sidotun kerroksen väsymisominaisuudet	asfaltin väsytyslaite (AVL) taulukko	PANK 42 06 TIEH 66/2001
Kuormituskertaluku, KKL_{muut}	ennuste: kaava 3.3	TPPT 3
liikenteen kasvukerroin	liikenne-ennuste	
Mitoitusjakso	valitaan / optimoidaan	
Rakennekerrospaksuudet h_i	Maatutka	TPPT 13

Rakenteen parantamisen yhteydessä selvitetään seuraavat vanhan rakenteen tilan määrittämisessä käytettävät asiat:

- Tierakenteen kunto (vauriot, tasaisuus)
- Rakennetiedot (kerrospaksuudet, materiaalit)
- Toimenpidehistoria
- Pohjamaa
- Rakenteeseen kohdistuva liikennesäätö

Vanhan rakenteen tila kuormituskestävyyden kannalta selvitetään pudotuspainolaitemittauksin ja tarkalla vauriokartoituksella. Pudotuspainomittausten suorittaminen on kuvattu TPPT Menetelmäkuvauksessa 1 ”Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus)” ja vauriokartoituksen tekeminen TPPT Menetelmäkuvauksessa 15 ”Tien vauriokartoitus ja vaurioiden kuvaus”. Kerrospaksuudet määritetään käyttäen hyväksi maatutkamittauksia ja näytteenottoja sekä tietoa tien päällystyshistoriasta. Maatutkamittausten suorittamista ja näytteenottoa on kuvattu TPPT Menetelmäkuvauksessa 13 ”Tien rakennekerrostutkimukset”.

Pudotuspainomittauksista lasketaan rakennekerrosten ja pohjamaan moduulit käyttäen mitatun taipumasuppilon lisäksi lähtötietona rakennekerrospaksuuksia (TPPT Menetelmäkuvauksessa 2 ”Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta”).

Jos takaisinlaskenta antaa vanhalle päällysteelle (ja muillekin kerroksille) epärealistisia moduuleja, suositellaan vanhan päällysteen moduuli arvioitavaksi vauriosumman mukaan taulukon 7.2 osoittamilla %-arvoilla. Muut vanhan rakenteen kerrosmoduulit lasketaan tällä päällysteen moduuliarvolla.

Tien ollessa erittäin huonossa kunnossa (vauriosumma yli $200 \text{ m}^2/100 \text{ m}$) ainakin vanha päällyste suositellaan poistettavaksi. Jos kantava kerroskin on hienontunut ja deformatunut runsaasti, se suositellaan poistettavaksi tai vahvistettavaksi esim. stabiloinnilla.

Taulukko 7.2. Parannettavan tien vanhan päällysteen suositellut moduulit takaisinlaskennan antaminen tulosten sijaan.

Luokka	Vauriosumma ($\text{m}^2/100 \text{ m}$)	Vanhan AB:n moduuli (% - lähtöarvosta)
1	< 10	80 %
2	10 – 60	60 %
3	61 – 200	40 % (harkittava kerroksen poistamista)
4	> 200	10 % (kerros suositellaan poistettavaksi)

Vanhojen ja lisättävien (poistettavien) rakennekerrosten paksuuksien ja moduulien avulla lasketaan rakenteen kriittiset muodonmuutokset (kuormituskestävyysmitoitusta varten päällysteen alapinnan vetomuodonmuutos), joiden perusteella rakenteen kuormituskestävyysmitoitusta tehdään periaatteessa samalla tavalla kuin uudenkin tien tapauksessa. Koska väsymiskriteeri perustuu aineistoon, jossa on mukana myös uudelleen päällystettyjä kohteita, sitä voidaan sinällään käyttää myös rakenteen parantamisen mitoittamiseen.

7.2 Jako homogeenisiin osuuksiin

Päällysrakenteen kuormituskestävyysmitoitusta varten tie jaetaan homogeenisiin osiin (kuva 7.3). Painumamitoitus ja routanousumitoitus tuottavat perusrakennerratkaisut, jotka ovat lähtökohtana liikennekuormitusmitoitukselle. Rakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa käytetään hyväksi tietoa vanhan rakenteen tilasta.

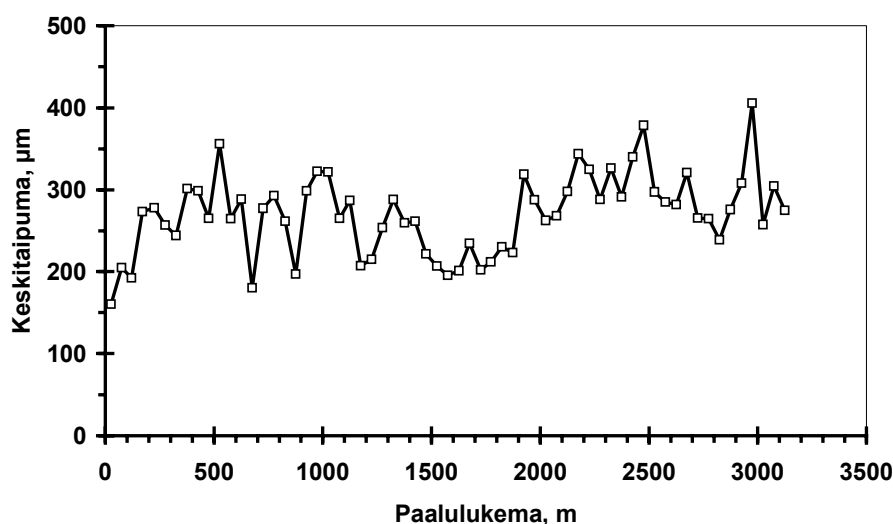
Vanhan rakenteen tila määritetään pudotuspainolaitteella ja maatutkalla, kuten luvussa 7.1 on esitetty. Jako homogeenisiin osuuksiin voidaan tehdä mitoitukseen vaikuttavien mitattujen muuttujien silmämääräisen tarkastelun perusteella (kuvaajat kustakin muuttujasta vs. paalulukema). Apuna voidaan käyttää kumulatiivisen erotuksen menetelmää, jota on havainnollistettu kuvassa 7.1, jossa on esitetty pudotuspainolaitteella mitattu maksimitaipuma kuormituslevyn alla eräällä koeosuudella. Kumulatiivista erotusta kuvaava muuttuja Z_x määritellään erotuksena kaavalla 7.1.

$$\begin{aligned} S_1 &= x_1 - x_m \\ S_2 &= x_2 - x_m + S_1, \\ S_i &= x_i - x_m + S_{i-1} \end{aligned} \quad (7.1)$$

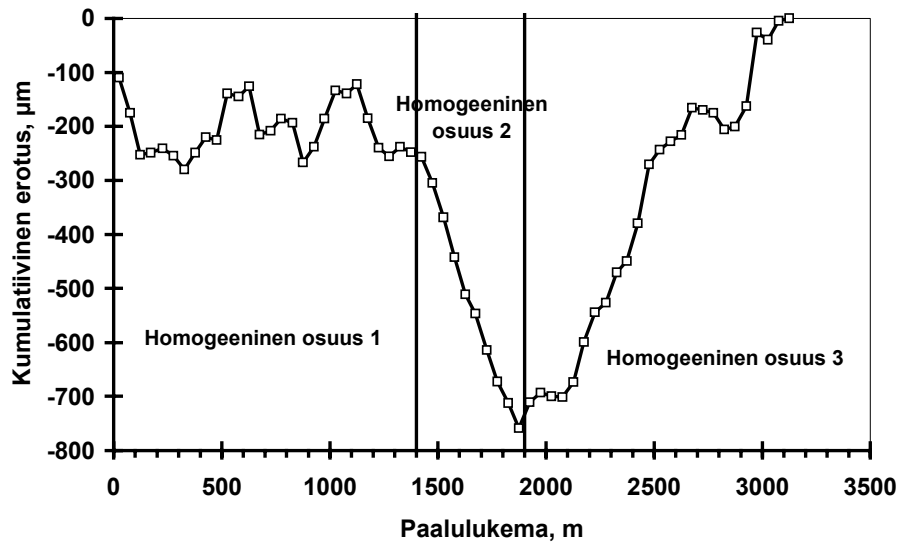
missä,

- x_i = pisteessä i mitattu suureen arvo
- x_m = suureen keskimääräinen arvo osuudella
- S_i = erotusten kumulatiivinen summa pisteessä i

Kuvassa 7.2 on esitetty muuttujan Z_x kuvaaja koeosuudella. Kohdassa, jossa muuttujan Z_x kuvaajan kulmakerroin muuttuu, homogeeninen osuus vaihtuu (mitattu suure muuttuu merkittävästi). Nähdään, että koeosuus jakautuu mitatun taipuman perusteella kolmeen homogeeniseen osuuteen. Niistä viimeisessä mitattu taipuma on selvästi suurempi kuin kahdessa ensimmäisessä.

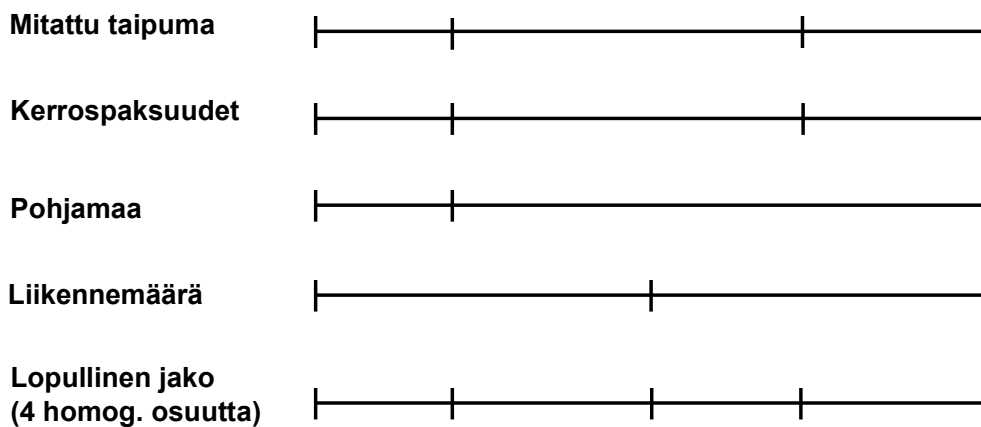


Kuva 7.1. Pudotuspainolaitteella mitattu taipuma kuormituslevyn alla esimerkkitilanteessa.



Kuva 7.2. Parannettavan tien jakaminen homogeenisiin osuuksiin kumulatiivisen erotuksen periaatteella.

Kuvassa 7.3 on esitetty kaavakuva tielinjan jakamisesta homogeenisiin osuuksiin. Mitatun taipuman perusteella tehty jako osuu samalle kohdalle kuin kerrospaksuuksien perusteella tehty jako. Myös pohjamaan (moduuli) muutoskohta osuu muilla perusteilla tehtyyn jakoon. Liikennemäärä muuttuu näistä riippumatta. Kohde jaetaan tässä esimerkissä lopulta neljään homogeeniseen osuuteen, joille tehdään kuormituskestävyysmitoitus.



Kuva 7.3. Parannettavan tien lopullinen jako homogeenisiin osuuksiin.

Edellä mainitut eroavuudet huomioonottaen parannettavan kohteen mitoitus tehdään muilta osin samalla tavalla kuin uudenkin tierakenteen mitoitus, joka on esitetty luvussa 6.

8 MITOITUSESIMERKKI

Seuraavassa on esitetty laskentaesimerkki päällysrakenteen kuormituskestävyysmitoituksesta ja lisäksi parinkymmenen vaihtoehtoisen rakenteen mitoituksen tulokset.

Laskentaesimerkkinä on kohde, jonka lähtötiedot ovat seuraavat:

- Uuden tien päällysrakenteen kuormituskestävyysmitoitus kaksikerros-asfalttibetonilla (40 mm AB + ?? mm AB)
- Mitoitusjakso = 10 vuotta
- Mitoitusjakson kumulatiivinen kuormituskertaluku = 1 000 000
- Sitomattoman rakenteen minimipaksuus = 1300 mm (saatu routamitoituksesta)
- Asfaltin jäykkyysmoduuli = 4000 MPa (AB20_B70/100)
- Kantavan kerroksen materiaalin kimmomoduuli = 300 MPa
- Jakavan kerroksen materiaalin kimmomoduuli = 100 – 150 MPa
- Pohjamaan kimmomoduuli = 50 MPa

Lasketaan keskimääräinen vuotuinen kuormituskertaluku (N_{10Y}):

$$N_{10Y} = \frac{N_{10}}{\text{Mitoitusjakso}} = \frac{1000000}{10} = 100000$$

Lasketaan referenssirakenteen kenttäkalibroidulla väsymiskriteerillä kuormituskertalukua (N_{10}) vastaava sallittu muodonmuutos (EPS):

$$\text{EPS} = \frac{\left(\sqrt{\left((\log(N_{10}) - 7.29)^2 - \frac{86900}{N_{10Y}} \right)} \right) - \log(N_{10}) + 7.29}{0.00744}$$

$$= \frac{\left(\sqrt{\left((\log(1000000) - 7.29)^2 - \frac{86900}{100000} \right)} \right) - \log(1000000) + 7.29}{0.00744} = 293 \mu\text{m} / \text{m}$$

Koska kyseessä on referenssimateriaali, ei väsymiskerrointa tarvitse laskea. Mikäli kyse on vaihtoehtoisesta rakenteesta, kerrotaan laskettu referenssirakenteen sallittu muodonmuutos (EPS) kyseisen materiaalin väsymiskertoimella luvussa 5.3 esitetyllä tavalla.

Valitaan alustava rakenne jännitys- ja muodonmuutoslaskentaa varten.

Materiaali	Paksuus (mm)	Moduuli (MPa)
AB20_B70/100	80	4000
Kantava murske	300	300
Jakava sora	500	150
Jakava sora	500	100
Pohjamaa hiekka		50

Jakavan kerroksen paksuus on jaettu kahteen osaan materiaalin moduulin jännitysriippuvuuden johdosta.

Ensimmäinen jännitys- ja muodonmuutoslaskenta tuottaa asfaltin alapinnan muodonmuutokseksi (EPS):

$$ESP = 293 \text{ (}\mu\text{m/m)}$$

Muodonmuutoksen arvo on optimaalinen, mutta kantavan kerroksen jännitystila vaatii moduulin laskemista:

Kantavan murskeen moduulia alennetaan 300 MPa ==> 280 MPa

Toinen jännitys- ja muodonmuutoslaskenta tuottaa asfaltin alapinnan muodonmuutokseksi (EPS):

$$ESP = 306 \text{ (}\mu\text{m/m)}$$

Muodonmuutoksen arvo on liian suuri, joten asfaltin paksuutta täytyy lisätä. Uusi laskenta tehdään 90 mm päällystepaksuudella, joka tuottaa muodonmuutokseksi (EPS):

$$ESP = 291 \text{ (}\mu\text{m/m)}$$

Rakenne voidaan hyväksyä, koska muodonmuutos alittaa raja-arvon 293 ja lisäksi sitomattomien kerrosten jännitystilat ja moduulit ovat tasapainossa. Näin ollen lopullinen rakenne on seuraava:

Materiaali	Paksuus (mm)	Moduuli (MPa)
AB20_B70/100	90 (40 + 50)	4000
Kantava murske	300	280
Jakava sora	500	150
Jakava sora	500	100
Pohjamaa hiekka		50

Seuraavassa on esitetty vaihtoehtoisia mitoitusratkaisuja kahdelle erilaiselle pohjamaalle. Sitomattomien kerrosten yhteispaksuuden minimi on 1300 mm, joka on määritetty routamitoituksella. Sitomattomien materiaalien lähtötiedot ovat seuraavat:

Materiaali	Paksuus (mm)	Moduuli (MPa)
Kantava murske	300	300
Jakava sora	500	150
Jakava sora	500	100
Pohjamaa		A = 50 , B = 20

Taulukossa 8.1 on esitetty tulokset 19 erilaisen rakenne/liikennemäärä-kombinaation mitoituksista.

Taulukko 8.1. Mitoitusvaihtoehtojen tulokset.

	Keskimääräinen vuotuinen kuormituskertaluku			
	50 000	100 000	200 000	300 000
Sidottu päällysrakenneratkaisu:				
RAKENNEVAIHTOEHTO_A / Paksuus	mm	mm	mm	mm
AB_B70/100 + AB_B70/100	70	40+50		
AB_B70/100 + ABK_B70/100	(40+50)	40+70	40+105	40+130
AB_B70/100 + KOMP_B (asf.rouhe)			40+105	40+130
SMA_B70/100 + KOMP_B + AB_B300				40+55+40
SMA_B70/100 + ABS_gil + AB_B300				40+60+40
SMA_B70/100 + AB_B30 + AB_B300				40+65+40
RAKENNEVAIHTOEHTO_B / Paksuus	mm	mm	mm	Mm
AB_B70/100 + AB_B70/100	40+65	40+80		
AB_B70/100 + ABK_B70/100	(40+80)	40+95	40+120	40+155
AB_B70/100 + KOMP_B(asf.rouhe)			40+120	40+145

9 KIRJALLISUUS

Apilo, L. Kantavan kerroksen asfalttibetoni, referenssimateriaalin ominaisuudet. TPPT-projekti M11, loppuraportti. VTT Yhdyskuntatekniikka. Espoo 1996.

Belt, J. Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen jäännösmoduulit ja deformatuminen. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja, 15/1997.

Burmister, D.M., The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways. Proceedings, Highway Research Board, Vol. 23, 1943.

Jämsä, H. Crack Initiation Models for Flexible Pavements. Helsinki University of Technology, Highway Engineering. Espoo 2000.

Kolisoja, P. Sitomattomien materiaalien moduulit. Vuoden 1995 kokeet. Loppuraportti TPPT M12. Tielaitos geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä, 34/1996.

Laukkanen, K., Leivo, M., Bitumi-sementti-komposiittien ominaisuudet ja tutkimusmenetelmät. TPPT-loppuraportti, Projekti M41. Tielaitoksen selvityksiä 42/1999. Helsinki 1999.

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

Pursiainen J., Ajoneuvojen ekvivalentit 2009, Akselimassatutkimus 1998-raportin aineistosta. Helsinki 2001.

Räty P., Pursiainen J. Akselimassatutkimus 1998. TIEL:n julkaisuja. Helsinki 1999.

SAS Institute Inc., SAS/STAT User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 2, Cary, NC:SAS Institute Inc., 1989.

Spoof, H. Asfaltin väsyminen. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma ASTO TR4/2 loppuraportti. VTT Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Espoo 1992.

Spoof, H., Petäjä, S., Ruotoistenmäki, A. Tien rakenteellinen kunto. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Tutkimusraportti 524. Espoo, helmikuu 2000.

TIEL Teiden suunnittelu. Tien rakenteet, kansio 4 B. TIEL:n julkaisuja 1984.

Ullidtz, P., Pavement Analysis. Developments in Civil Engineering 19. Elsevier 1987.

Alkio, R., Juvankoski, M., Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, R., Laukkanen, K., Pihlajamäki, J., Spoof, H. Tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalivalinnoille. TPPT raportti. Tiehallinnon selvityksiä 66/2001.

Juvankoski, M., Laaksonen, R. Sitomattomat materiaalit tien rakennekerroksissa. Taustatietoa materiaalivalinnoille. TPPT Raportti 22. 2001

10 LIITTEET

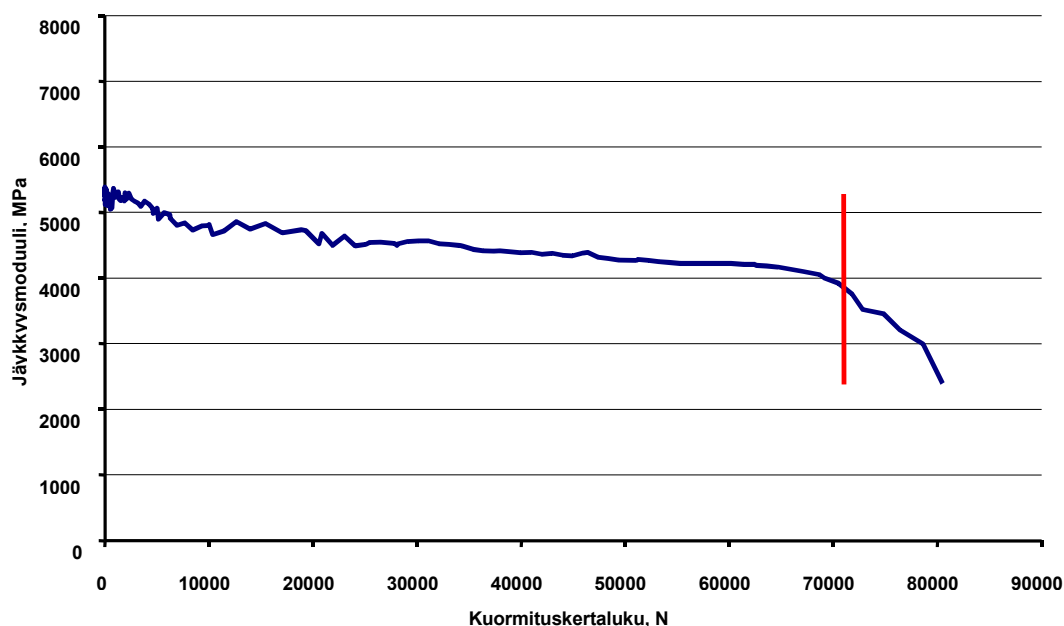
Liite 1. Tien vaurioitumisen mallintaminen

TIEN VAURIOITUMISEN MALLINTAMINEN

Tien vaurioitumismekanismi

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 1 on esitetty periaatekuva päällysteen jäykkyyssmoduulin kehittämisestä laboratoriossa suoritetun väsytykskokeen aikana. Halkeaman syntyhetkellä päällysteen jäykkyyssmoduuli alkaa laskea nopeasti.



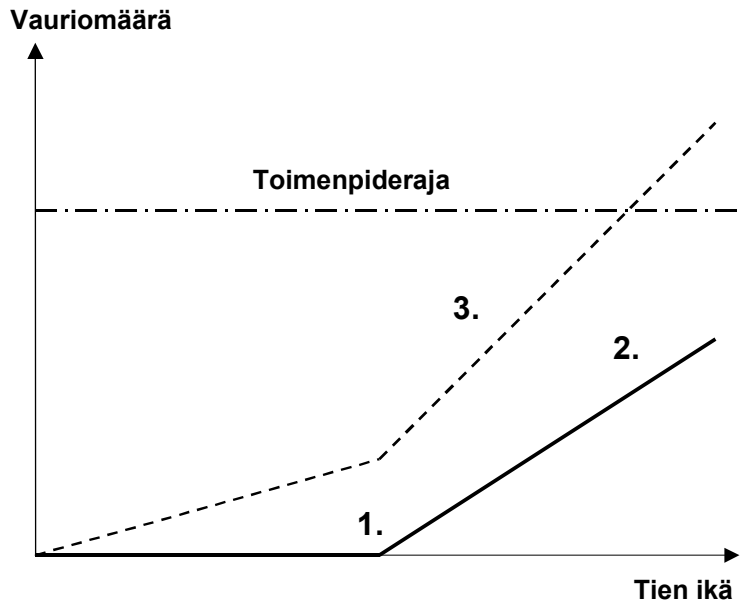
Kuva 1. Päällysteen jäykkyyssmoduulin kehittyminen väsytykskokeen aikana.

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

1. Tien edellisen rakenteenparantamis- tai päällystämisajankohdan 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 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 2. Tierakenteen vaurioitumisprosessi. Periaatekuva.

Halkeaman synnyn mallintamiseen voidaan käyttää eloonjäämisanalyysin (Survival Analysis) menetelmiä. Eloonjäämisanalyysin elinajan käsitettä vastaa aika tien rakenteen parantamisesta (tai uudelleenpäällystämisestä) ensimmäisen liikenneperäisen kuormituskestävyyshalkeaman (halkeama ajourassa) ilmaantumiseen. Tämän elinajan mallintaminen on mallintamisen ensimmäinen vaihe. Elinajan päätyttyä tien liikenneperäinen 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 yksityiskohtaisemmin vaihetta 1, liikenneperäisen vaurioitumisen alkamisajankohdan mallintamista.

Mallintamisen periaatteet

Eloonjäämisanalyysiin perustuvia regressiomallimenetelmää voidaan hyödyntää ensivaurioitumisajankohdan mallintamisessa. Vaurioitumisajankohdan mallintaminen alkaa vaurio määrätelmän valinnalla. Vaurioituneilla kohteilla tarkoitetaan tässä tapauksessa kohteita, joissa ajourien pituudesta yhden prosentin (1 %) osuudella esiintyy liikenneperäisestä aiheutuneita vaurioita (kuormituskestävyysvaurioita). 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:

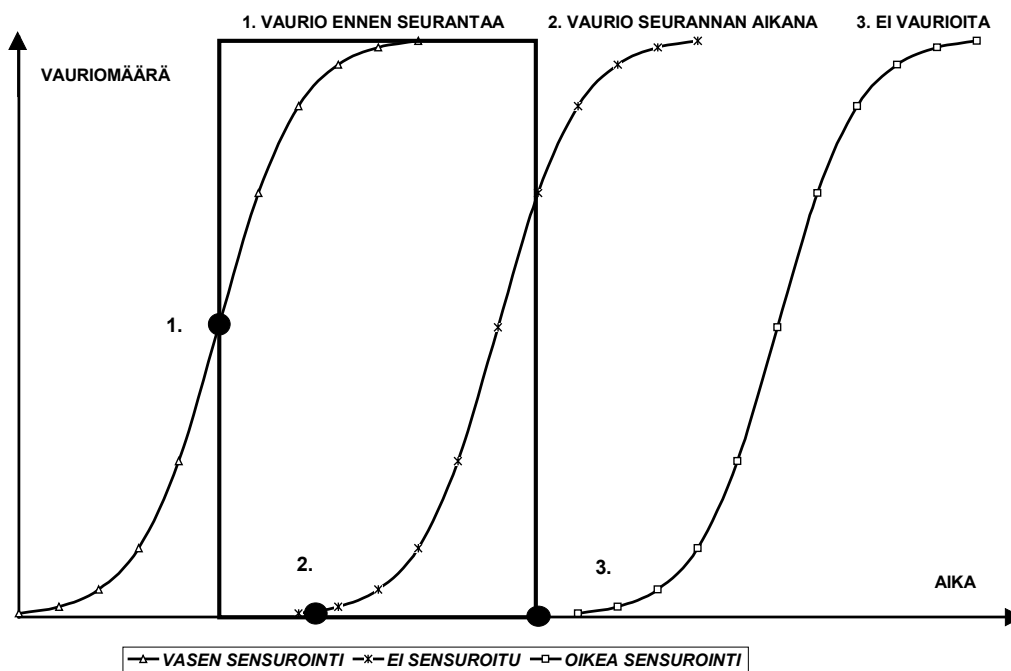
$$\log T_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip} + \sigma \varepsilon_i \quad (1)$$

missä,

T_i = elinikä ensimmäisen vaurion syntyhetkeen
 $x_{ij} : t$ = selittävien muuttujien arvoja
 $\beta_j : t$ = 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 3, jossa on esitetty havaintoaineiston periaatteellinen kuvaus. Tarkastelujaksoa voidaan kuvata ikkunana, josta vain osa vaurioitumisilmiöstä 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 ajanakaan. 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 /PARIS 1999/.



Kuva 3. Tutkimusaineiston periaatteellinen kuvaus eloonjäämisanalyysissä.

Mallien merkitsevyyttä kuvaa suure p (χ^2 -testin merkitsevyystaso), joka kertoo millä todennäköisyydellä muuttujan kertoimen arvo on nolla (muuttujalla ei ole vaikutusta vaurioitumisen synnyn ajankohtaan). Mitä pienempi kuvattu luku on, sitä merkitsevämmin 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 nollahypoteesin vallitessa 5 % todennäköisyydellä. Tavallisesti tästä päätellään, että saatu tulos on nollahypoteesin vallitessa niin harvinainen, että on aiheutta uskoa nollahypoteesi vääräksi. Toisin sanoen muuttuja selittää merkitsevästi kestävyyttä ($0.05=*$, $0.01=**$, $0.001=***$) /SAS 1989/.

Mallin tausta

Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohtamallit kehitettiin eurooppalaiselle tasolle 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 mm. PMS- järjestelmissä (Pavement Management Systems). Mallien kehityksessä käytetty aineisto kattaa eurooppalaiset olosuhteet liikenteen, ilmaston ja materiaalien osalta. Havaintotiekohteita oli kaikkiaan yli 800 kappaletta 15 maasta.

Tässä raportissa myöhemmin esitettävä malli perustuu PARIS-projektin malliin, joka on kalibroitu Suomen olosuhteisiin. Mallinnuksen tuloksena PARIS-projektissa päädyttiin taipumaerotusta (SCI300) ja vuosittaista kuormituskertalukua sisältävään malliin. Tämän PARIS-mallin primäärinä tarkoituksena oli luoda PMS-järjestelmille vaurioitumismalli, joka perustuu väsymiseen, mutta sisältää muuttujina ainoastaan tien pinnalta ainetta rikkomatta mitattavissa olevia muuttujia. Vastaavanlainen malli kehitettiin TPPT:n ja Rakenteellinen kunto projektin yhteistyönä vuosina 1999-2000 /Spoof 2000/. Mallinnus suoritettiin yhteistyössä ruotsalaisen VTI:n (Statens väg- och transportforskningsinstitut) kanssa käyttäen aineistona sekä TPPT:n että VTI:n havaintotieaineistoja. TPPT-projektissa kehitettiin tämän jälkeen vastaavasta aineistosta mallit, joissa SCI300 korvattiin päällysteen alapinnan muodonmuutoksella. Tämä malli toimii TPPT päällysrakenteen kuormituskestävyysmitoituksen referenssirakenteen kenttäkalibroituina väsymiskriteerinä.

PARIS-mallien kalibrintiaineiston kuvaus

Kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamisajankohtamallit kehitettiin PARIS-mallien pohjalta. PARIS-mallien kalibrintiin käytettiin aineistoa sekä Suomesta että Ruotsista, koska pelkkä kotimainen aineisto ei riitä mallien kehittämiseen. Yhteensä 429 kohteen aineisto jakautuu siten, että 50 kohdetta on Suomesta ja loput Ruotsista. Kohteista 45 on "vasen sensuroituja" (vaurioituminen tapahtunut ennen seurannan alkua) ja 207 on "oikea sensuroituja" (vaurioituminen ei ole vielä alkanut). Loput 177 kohdetta ovat sensuroimattomia (vaurioituminen alkanut seurannan aikana). Kohteiden ikä, joka lasketaan edellisestä päällystyksestä tai rakenteen parantamisesta, vaihtelee 3 ja 16 vuoden välillä. Kohteita on seurattu tutkimusmielessä 9 – 16 vuoden ajan. Kohteiden liikennemäärät (vuosittainen kuormituskertaluku) vaihtelivat 30000 – 450000 välillä. Rakenteet ovat ns. perinteisiä rakenteita, joissa on yksi, kaksi tai kolme asfalttipäällystettyä sitomattomien kerrosten päällä. Kohteet ovat valittu tieverkolta satunnaisesti tilastollista koesuunnittelua hyväksikäyttäen 1985 – 1992 välisenä aikana.

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 2000 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 mit-taustuloksiin. Mikäli kohteessa on suoritettu useampia mittauksia ,valittiin niistä se, joka on suoritettu mahdollisimman alussa kohteen elinkaarta. Muodonmuutokset on määritetty neu-roverkkotekniikan avulla. Neuroverkon opetusaineisto on laskettu lineaarisella monikerros-ohjelmalla (BISAR) /Jämsä 2000/.

Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus

Menetelmäkuvaukset

TPPT *Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus*

Nro

- 17 Kuormituskestävyysmitoitus. Päälysrakenteen väsyminen
- 18 Tierakenteen routamitoitus
- 19 Tien jatkuvan painumaprofiilin laskenta pixelimallilla
- 20 Päälysrakenteen elinkaarikustannusanalyysi
- 21 Mitoituksen lähtötietojen hankkiminen

Menetelmäkuvaukset

- 1 Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus)
- 2 Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta
- 3 Liikennesuunnitelman laskeminen
- 4 Ilmastorasitus. Pakkasmäärän ja sulamiskauden pituuden määrittäminen
- 5 Routaus syvyyden määrittäminen
- 6 Routauskoe. Routimiskertoimen (SP) kokeellinen määrittäminen
- 7 Routimiskertoimen määrittäminen
- 8 Lämmönjohtavuuden määrittäminen
- 9 Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa
- 10 Radiometrinen reikämittaus
- 11 CPTU - kairaus
- 12 Läpäisevän kerroksen määrittäminen painumalaskennan tarpeisiin
- 13 Tien rakennekerrostutkimukset
- 14 Routausun ja painuman mittaus
- 15 Tien vauriokartoitus ja vaurioiden kuvaus
- 16 Palvelutasomittaus (PTM) tien rakenteen parantamisen suunnittelussa