



RAKENTAMISTEKNOLOGIAN TUTKIMUSRYHMÄ

Jouko Belt, Pauli Kolisoja, Ville Alatyppö, Jarkko Valtonen

TIERAKENTEEN RAPPEUTUMINEN JA KUNNON EN- NUSTAMINEN

ISSN 1458-8293 (Elektroninen julkaisu)

ISBN 951-42-8052-0 (Elektroninen julkaisu)

Jouko Belt, Pauli Kolisoja, Ville Alatyppö, Jarkko Valtonen. Tierakenteen rappeutuminen ja kunnan ennustaminen. Oulun yliopiston rakentamisteknologian tutkimusryhmän julkaisuja 2. 43 s.

Asiasanat: Vaurio, kunto, kuormitus, olosuhde, jännitys, muodonmuutos, mittaus, ennuste

TIIVISTELMÄ

Tierakenteeseen rasituksia aiheuttavia ja sitä kautta rappeutumista aikaansaavia kuormitustekijöitä ovat liikenne- ja ilmastokuormitus sekä rakenteen omapaino. Tierakenteen toiminta ja kunto ovat liikennekuormituksen, ilmasto-olosuhteiden vaihtelun ja ikääntymisen yhteisten vaikutusten seurauksena vähitellen tapahtuvassa, mutta jatkuvassa muutostilassa koko elinkaaren ajan. TIEIKÄ-projektissa keskitytään päällysrakenteeseen, mistä syystä päähuomio kiinnitetään liikennekuormituksesta johtuvaan päällysteen halkeiluun eli väsymisvaurioitumiseen ja rakenteen poikkisuuntaiseen epätasaisuuteen eli urautumiseen.

Tierakenteisiin kohdistuva liikennekuormitus määritetään nykyisin suunnitteluvaiheessa vastaavuuskerroinmenetelmällä mitoitusajan kumulatiivisena kuormituskertalukuna. Periaatteessa tulisi pyrkiä luomaan vasteisiin perustuva menettely liikenteen tierakenteisiin aiheuttaman kuormituksen arvioimiseksi. Liikennekuormituksen mahdollisimman tarkka määrittäminen on perusedellytys käyttöiän laskennallisessa mallintamisessa ja ennustavassa infrassa.

Yleisesti käytetään lineaariseen kimmoteoriaan perustuvia monikerroslaskentamenetelyä tierakenteiden mitoittamisessa ja toiminnan arvioinnissa. Liikenteen kuormituksen monimutkaisuuden ja tierakennemateriaalien käyttäytymisen vuoksi laskentamenetelyissä on jouduttu tekemään lukuisia lähtöoletuksia ja yksinkertaistuksia. Tienrakennusmateriaalien laskentaotaksumista poikkeavat ominaisuudet pyritään ottamaan huomioon siten, että käytetään mitoitusolosuhteita vastaavia materiaaliparametreja.

Useita malleja on kehitetty sekä päällysteiden väsymiskestävyyden että sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen pysyvien muodonmuutosten suuruuden arvioimiseksi. Suurena käytännön ongelmana ovat mallien edellyttämien parametrien määrittäminen. Parametrit riippuvat yleensä materiaalityypistä. Osa parametreista riippuu myös jännitystilasta. Lämpötila ja kuormitusaika (nopeus) vaikuttavat puolestaan merkittävästi bitumil-la sidottujen materiaalien käyttäytymiseen.

Malleilla lasketut tierakenteen kestävyudet poikkeavat huomattavastikin toisistaan, mikä vaikeuttaa mallien valintaa ja soveltamista erityyppisiin rakenteisiin ja vaihteleviin ilmasto-olosuhteisiin. Yleisesti käytetyt mallit on kehitetty maissa, missä sidottujen kerrosten yhteispaksuus on tyypillisesti suuri ja sitomattomien kerrosten pieni. Myös Suomen ilmasto- ja maaperäolosuhteet poikkeavat useimmista muista maista. Edellä mainituista syistä johtuen muissa maissa kehitettyjen mallien soveltaminen Suomen olosuhteisiin on ongelmallista. Olosuhteiden osalta tulisi tuntea tarkoin päällysteen ja ilman lämpötilat, rakenteen routaantuminen, sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen kosteudet sekä niiden merkitys turmeltumisilmiöissä.

Tierakenteiden kunnan ennustamisen kannalta turmeltumisilmiöiden laskennallinen mallintaminen on perusedellytys. Mallintaminen edellyttää myös tarkkoja kuntomittauksia.

ALKUSANAT

Vuonna 2005 käynnistettiin *Tierakenteen käyttöiän hallinta uuden teknologian avulla* –tutkimusprojekti (TIEIKÄ-projekti), mikä kuuluu Tekesin INFRA Rakentaminen ja palvelut teknologiaohjelmaan. Tekesin lisäksi rahoittajina ovat Tiehallinto, Tieliikelaitos, Skanska Tekra Oy, Lemminkäinen Oyj ja Lemcon Oy, Valtatie Oy, NCC Roads Oy sekä Helsingin kaupunki. Projekti toteutetaan ryhmähankkeena, minkä osapuolina ovat Tampereen teknillisen yliopiston maa- ja pohjarakenteiden laitos, Teknillisen korkeakoulun tielaboratorio ja Oulun yliopiston rakentamisteknologian tutkimusryhmä. Projektin arvioidaan valmistuvan vuoden 2007 loppupuolella.

Tämä raportti sisältää tutkimuskokonaisuuden ensimmäisen osan ”Vaurioitumisprosessi”. Raportin laatimiseen ovat osallistuneet Jouko Belt Oulun yliopistosta, Pauli Kolisoja Tampereen teknillisestä yliopistosta sekä Ville Alatyppö ja Jarkko Valtonen Teknillisestä korkeakoulusta.

Oulussa maaliskuu 2006

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ

ALKUSANAT

1. JOHDANTO.....	6
2. TIERAKENTEEN RAPPEUTUMINEN.....	7
2.1 Rappeutumisen osatekijät ja vauriotyypit	7
2.2 Kuormitustekijät ja turmeltuminen	8
3. RAKENTEEN JA OLOSUHTEIDEN MERKITYS RAPPEUTUMISEEN	10
3.1 Päällysteen väsyminen.....	10
3.2 Poikkisuuntainen epätasaisuus	12
3.3 Pituussuuntainen epätasaisuus.....	14
4. LIIKENNEKUORMITUKSEN MÄÄRITTÄMINEN	15
5. MONIKERROSLASKENTAMENETTELY.....	16
6. TURMELTUMISMALLIT	19
6.1 Päällysteen väsymiskestävyys	19
6.2 Pysyvät muodonmuutokset	22
6.2.1 Mallintamisen periaatteet.....	22
6.2.2 Päällyste	23
6.2.3 Sitomattomat kerrokset ja alusrakenne	28
7. PÄÄTELMÄT	33
7.1 Tutkimustoiminnan kohdentaminen.....	33
7.2 Turmeltumisilmiöihin ja rasitukseen liittyvä tutkimustarve.....	34
7.3 Mittaustekniikkaan liittyvä tutkimustarve.....	37
KIRJALLISUUSLUETTELO.....	42

1. JOHDANTO

Teiden rakentamis- ja ylläpitopalveluiden tuottamisessa ollaan nopealla aikataululla siirtymässä pitkiin – jopa kymmenien vuosien mittaisiin – palvelusopimuksiin. Tästä väistämättömänä seurauksena oleva tarve tierakenteiden koko elinkaaren aikaisen kuntotilanteen hallintaan asettaa kokonaan uudenlaisia osaamisvaatimuksia teiden rakentamis- ja ylläpitopalveluita tuottaville yrityksille.

Tierakenteen käyttöiällä tarkoitetaan yleisesti sitä ajanjaksoa, jona tierakenteen toiminnallinen kunto voidaan taloudellisesti ylläpitää asetettujen vaatimusten mukaisena. Elinkaarikustannusten laskennan näkökulmasta käyttöikä voidaan määritellä sen ajanjakson pituudeksi, jonka tilaaja tai suunnittelija valitsee vaihtoehtoisten rakennusratkaisujen ja toimenpiteiden välisen kustannusvertailun pohjaksi. Rakenteen toiminnan tunteminen ja mitoittaminen käyttäen toimivia malleja ja oikeita parametreja luovat perustan käyttöiän suunnittelulle ja tierakenteen käyttöiän aikaisille kustannuksille sekä tien elinkaaren alussa että tarvittavien ylläpitotoimenpiteiden yhteydessä.

TIEIKÄ-projektin tavoitteena on nostaa tierakenteiden käyttöiän aikaisten kuntotilanteen muutosten ja vaadittavien ylläpitotoimenpiteiden ennustettavuus uudelle tarkkuustasolle modernin mittaus- ja monitorointiteknologian tarjoamia mahdollisuuksia hyväksi käyttäen. Projektin tuloksena raportoidaan tien pinnalta tehtäviin ainetta rikkomattomiin mittauksiin ja yhdessä niiden kanssa käytettävään rakenteen tilan monitorointiin perustuva tierakenteen vaurioitumisen arviointimenettely sekä laaditaan kehitettävän kuntotilan hallintajärjestelmän kokonaiskuvaus hyödyntämis- ja käyttöohjeistuksineen.

Tutkimuskokonaisuus on laaja, mistä syystä se on jaoteltu neljään keskeiseen osaan:

- Vaurioitumisprosessi
- Monitorointi ja digitaaliset mittaukset
- Käyttöiän laskennallinen mallintaminen
- Raportoiva ja ennustava infra

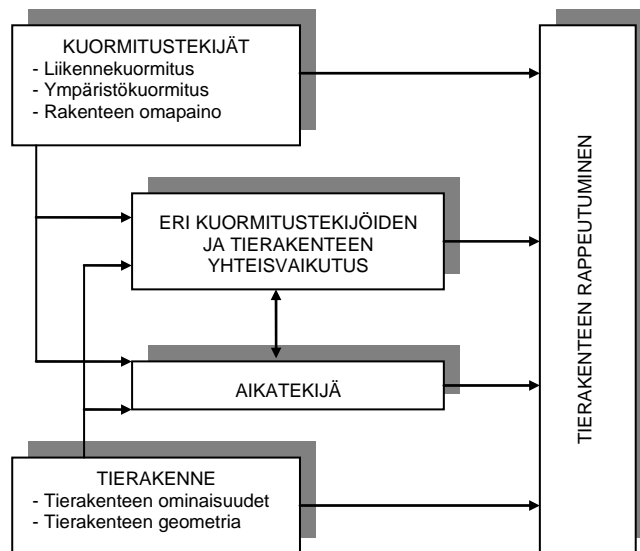
Tämä raportti sisältää tutkimuskokonaisuuden ensimmäisen osan ”Vaurioitumisprosessi”, missä kuvataan nykytietämyksen perusteella tierakenteiden rappeutuminen lyhyesti, rakenteen ja olosuhteiden merkitystä rappeutumiseen, liikennekuormituksen määrittämistä, monikerros-laskentamenettelyä ja turmeltumismalleja. Lisäksi esitetään, mitkä turmeltumisilmiöt ja muutokset rakenteista pitäisi pystyä mittaamaan, jotta rappeutumisprosessi saataisiin hallintaan, sekä valitaan alustavasti ne turmeltumisilmiöt, joiden monitorointiin ja digitaalisiin mittauksiin tutkimuksen painopiste kohdistetaan.

Raportissa käsitellään myös turmeltumisilmiöihin ja rasituksiin sekä mittaustekniikkaan liittyviä tutkimustarpeita. Arvioidaan anturien valintaperiaatteita ja esitetään yksityiskohtaisesti mitattavat asiat ja mittausten luonne.

2. TIERAKENTEEN RAPPEUTUMINEN

2.1 Rappeutumisen osatekijät ja vauriotyypit

Tierakenteen ja siinä olevien materiaalien toiminnan kannalta on keskeistä, minkälaisia jännityksiä ja muodonmuutoksia kuormitukset saavat aikaan rakenteeseen ja toisaalta miten rakenne ja materiaalit kestävät syntyviä rasituksia. Tierakenteeseen rasituksia aiheuttavia ja sitä kautta rappeutumista aikaansaavia kuormitustekijöitä ovat liikenne- ja ilmastokuormitus sekä rakenteen omapaino (kuva 1). Rappeutumis-termillä tarkoitetaan (koko) tierakenteen kunnan heikkenemistä, mikä ilmenee tien pinnan pituus- ja poikkisuuntaisena epätasaisuutena sekä halkeamina.



Kuva 1. Tierakenteen rappeutumisen osatekijät [Belt ym., 2000].

Liikenne- ja ilmastokuormitukset poikkeavat luonteeltaan toisistaan. Liikennekuormitus on lyhytaikaista ja usein toistuvaa kuormitusta. Ilmastokuormitus on pääosin vuodenaikojen mukaan toistuvaa ja siten vaikutusmekanismiltaan hidasta. Tierakenteen kuormituskestävyyden kannalta merkittävin liikennekuormitus syntyy raskaan liikenteen aiheuttamana. Henkilöautoliikenteen rasitukset näkyvät tiestöllä ainoastaan nastarenkaiden synnyttäminä kulumisurina. Ilmastokuormituksen päätekijöitä ovat vuodenaikojen mukaan vaihtuvat lämpötila, kosteusolot ja routa. Rakenteen omapaino on myös kuormitustekijä, minkä aiheuttamat rasitukset ovat merkittäviä lähinnä pehmeiköillä ja tien kohdissa, missä alusrakenteen laatu vaihtuu.

Päällysteen vanheneminen on myös tierakenteen rappeutumiseen vaikuttava tekijä. Iän myötä bituminen sideaine kovenee, mikä kasvattaa päällysteen jäykkyyttä. Sideaineen koveneminen lisää päällysteen halkeilua. Päällysteen jäykkyyden lisääntyminen puolestaan pienentää liikennekuormituksesta tierakenteeseen aiheutuvia rasituksia.

Jo syntyneillä vaurioilla on myös oma merkityksensä tierakenteen käyttäytymiseen. Tien pintaan syntyvät epätasaisuudet ja vauriot lisäävät liikennekuormituksen aiheuttamia rasituksia. Halkeamien kautta tierakenteeseen pääsee vettä heikentämään tierak-

kenteen rasiuksen sietokykyä. Edellä mainitut tekijät saavat aikaan sen, että tien rappeutuminen muodostuu itseään kiihdyttäväksi prosessiksi.

Todellisuudessa tierakenteen toiminta ja kunto ovat liikennekuormituksen, ilmasto-olosuhteiden vaihtelun ja ikääntymisen yhteisten vaikutusten seurauksena vähitellen tapahtuvassa, mutta jatkuvassa muutostilassa koko elinkaarensa ajan.

Tien pinnalla näkyvät vauriot voidaan luokitella seuraavasti:

Taulukko 1. Päälystetyn tiestön vauriotyypit.

Päätyyppi	Alatyypit
Halkeama	Poikkihalkeama Pituushalkeama Vinohalkeama Saumahalkeama Verkkohalkeama
Epätasaisuus	Pituussuuntainen epätasaisuus Poikkisuuntainen epätasaisuus
Hajoamisvaurio	Purkauma Reikä

2.2 Kuormitustekijät ja turmeltuminen

Tierakenteen osa voi vaurioitua eli turmeltua usean eri ilmiön seurauksena (taulukko 2). Yleensä turmeltumisilmiöiden seurauksena syntyy tiettytyypisiä vaurioita tien pintaan. Pintavaurioiden perusteella yksinään ei pystytä kuitenkaan yleensä yksilöimään tarkasti turmeltumisilmiötä, koska eri ilmiöt saattavat aiheuttaa samankaltaisia pintavaurioita. Lisäksi ilmiöt syntyvät useamman kuin yhden kuormitustekijän vaikutuksesta. Myös tierakenne, käytetyt materiaalit ja olosuhteet vaikuttavat ilmiöiden synnyttämään tien pinnan vaurioitumiseen.

Tierakenne toimii aina yhtenä kokonaisuutena eli muutos jossakin kerroksessa vaikuttaa koko rakenteen toimintaan ja sitä kautta tien rappeutumiseen. Yksittäinen vaurio nopeuttaa yleensä myös toisen tyyppisten vaurioiden muodostumista. Esimerkiksi halkeama nopeuttaa päällysteen väsymistä, urautumista ja pituussuuntaisen epätasaisuuden kasvua.

Tasaisellakin tiellä halkeama on tien epäjatkuvuuskohta, missä liikennekuormituksen aiheuttama rasitus on suurempi kuin muualla. Rasitusvaikutusta lisää edelleen se, että halkeama ulottuu yleensä syvälle tierakenteeseen. Halkeaman kautta tierakenteeseen pääsee kosteutta ja jossain määrin myös hienoaainesta, mikä nopeuttaa tierakenteen kunnan heikkenemistä.

Halkeaman yhteyteen syntyy pituussuuntaista epätasaisuutta. Ylittäessään epätasaisen tien kohdan liikkuva ajoneuvo joutuu pystysuuntaiseen liikkeeseen, mikä synnyttää dynaamisia lisäkuormia. Dynaamisen kuormituksen kasvu nopeuttaa päällysteen väsymistä sekä eri rakennekerrosten ja alusrakenteen pysyvien muodonmuutosten kehittymistä. Myös pituussuuntainen epätasaisuus lisääntyy dynaamisen kuormituksen kasvaessa.

Taulukko 2. Kuormitustekijät, turmeltumisilmiöt ja pintavauriot.

Turmeltumisilmiö	Pintavaurio	Vaikuttavia tekijöitä
Liikennekuormitus Kulutuskerroksen kuluminen Sidotun kerroksen väsyminen Leikkausrasituksista johtuva päällysteen vaurioituminen Rakenteen deformatiivisuudesta johtuva päällysteen vaur. Sidottujen kerrosten pysyvät muodonmuutokset Sitomattomien kerrosten pysyvät muodonmuutokset Alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset Sitomattomien materiaalien hienoneminen	Urautuminen (Pituus- ja) verkkohalkeama (Pituus- ja) verkkohalkeama (Pituus- ja) verkkohalkeama poikkisuuntainen epätasais. Urautuminen Urautuminen (poikkisuuntainen epätasaisuus) Poikki- ja pituussuuntainen epätasaisuus Poikkisuuntainen epätas. (Pituus- ja) verkkohalkeama	Kiviaines, olosuhteet Rakenne, sidotun kerroksen ominaisuudet Ohut päällyste ja heikko kantava kerros Ohut päällyste, heikko rakenne, kapea tie Sidottujen kerrosten ominais., hidas liikenne, olosuhteet Materiaaliominaisuudet, rakenne, olosuhteet Materiaaliominaisuudet, rakenne, olosuhteet Materiaaliominaisuudet, ohut päällyste, olosuhteet
Ilmastokuormitus (Päällysteen) kutistuminen Bitumin koveneminen Routanousut	Poikkihalkeilu Halkeilu, hajoaminen Pituussuuntainen epätas. pituushalkeilu, muu halkeilu	Bitumin laatu, rakenne Bitumin laatu, tyhjätilla Materiaaliominaisuudet, rakenne, olosuhteet
Liikenne- ja ilmastokuormitus Heijastushalkeilu	Halkeilu	Rakenne
Rakenteen omapaino Alusrakenteen tiivistyminen ja painuminen	Pituussuuntainen epätas., sivukaltevuuden muutokset, halkeilu	Materiaaliominaisuudet, rakenteen paino, rakenne, olosuhteet
(Työvirheet) Hajoaminen Saumojen epätasaisuus (Huomattava) alkutiivistyminen	Purkauma, reikä Saumojen porrastuneisuus Poikki- ja pituussuuntainen epätasaisuus, sivukaltevuuden muutokset, halkeilu	Epähomogeenisuus, rakenne Työmenetelmät Työmenetelmät, olosuhteet materiaaliominaisuudet

Liikennekuormituksen aiheuttama tien pinnalla näkyvä vaurioituminen on poikkisuuntaista epätasaisuutta (urautumista) ja/tai (ajourissa olevaa) pituus- ja verkkohalkeilua. Alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset aiheuttavat myös pituussuuntaista epätasaisuutta. Ilmastokuormitus aiheuttaa halkeilua ja routimiseen liittyvää pituussuuntaista epätasaisuutta. Pehmeiköillä (savi, turve) syntyy puolestaan rakenteen painon seurauksena painumia, jotka aiheuttavat pituussuuntaista epätasaisuutta ja poikkigeometrian muutoksia.

TIEIKÄ-projektissa keskitytään päällysrakenteeseen, mistä syystä päähuomio kiinnitetään liikennekuormituksesta johtuvaan päällysteen halkeiluun ja rakenteen poikkisuuntaiseen epätasaisuuteen eli urautumiseen. Kulutuskerroksen kulumista, työvirheistä johtuvaa vaurioitumista tai heijastushalkeilua ei erityisemmin selvitetä.

3. RAKENTEEN JA OLOSUHTEIDEN MERKITYS RAPPEUTUMISEEN

3.1 Päällysteen väsyminen

Jokaisella ylityskerralla tietä kuormittava ajoneuvon rengas saa aikaan tierakenteen taipumisen. Rakenteen taipuminen synnyttää sidottujen kerrosten yläpintaan puristusrasituksen ja alapintaan vetorasituksen eli vetojännityksen ja siitä johtuvan vetomuodonmuutoksen. Vetomuodonmuutosten toistuessa riittävän monta kertaa sidottu kerros alkaa vaurioitua eli väsyä [Ehrola, 1996].

Päällysteen väsyminen johtuu siitä, että bitumilla ja sitä kautta päällysteellä on sekä kimmoisia että viskoosisia ominaisuuksia. Jos päällyste olisi täysin kimmainen, väsymistä ei esiintyisi. Käytännössä väsyminen tarkoittaa sitä, että bitumin murtolujuus ja –venymä pienenevät kuormituskertojen lisääntyessä.

Alkuvaiheessa väsyminen ilmenee sidotun kerroksen alapintaan syntyvinä pituussuuntaisina hiushalkeamina ajourissa. Liikennekuormitusten jatkuessa hiushalkeamat laajenevat ja muodostavat hiushalkeamaverkkoa. Samalla päällysteen jäykkyys pienenee ja pyöräkuorman synnyttämät palautuvat vetomuodonmuutokset kasvavat. Hiushalkeamien laajeneminen lisääntyy ja ne yhtyvät makrohalkeamiksi edeten samalla tien pintaa kohti. Tällöin päällysteeseen alkaa muodostua tien pinnalla näkyviä vaurioita [Ehrola, 1996].

Tien pinnalla näkyvät väsymisvauriot alkavat pääosin pituussuuntaisina halkeamina ajourien keskellä, missä liikennekuormituksen päällysteeseen kohdistama rasitus on suurinta. Pyöräkuormitusten aiheuttamat päällysteen alapinnan poikkisuuntaiset vetomuodonmuutokset ovat suurempia kuin pituussuuntaiset vetomuodonmuutokset. Vaurioitumisen edetessä halkeamat lisääntyvät ja päällysteeseen syntyy monikulmiomaisia repeämiä eli verkkohalkeilua. Vaurioitumista nopeuttaa se, että pituushalkeama muodostaa tiehen epäjatkuvuuskohdan, missä päällyste ei enää toimi laattana eikä jaa kuormituksia tasaisesti alempiin kerroksiin.

Liikennekuormituksen aiheuttaman väsymisprosessin seurauksena päällysteen jäykkyys pienenee asteittain. Päällysteen jäykkyys saattaa olla enää vain puolet vastaavan uuden päällysteen jäykkyydestä ennen kuin verkkohalkeilua voidaan havaita tien pinnalla. Esimerkiksi määritettäessä väsymiskestävyyttä laboratorioskokeilla kuormitusten määrää, millä päällysteen jäykkyysmoduuli on laskenut puoleen alkuperäisestä, voidaan pitää väsymiskestävyytenä.

Päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksia voidaan parhaiten pienentää käyttämällä päällysteen alla olevassa kerroksessa hyvää materiaalia (korkea moduuli) sekä kasvatamalla päällysteen paksuutta ja jäykkyyttä (taulukko 3).

Lämpötila vaikuttaa merkittävästi päällysteen jäykkyyteen ja sitä kautta väsymiseen. Korkeissa lämpötiloissa päällysteen jäykkyys on alhainen, mikä lisää periaatteessa päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksia. Osittain tämä kompensoituu sillä, että päällysteen alhaisen jäykkyyden takia ylimmän sitomattoman kerroksen jännitystila kasvaa ja lisää ko. kerroksen jäykkyyttä (moduulia), mikä puolestaan vähentää päällysteen vetomuodonmuutoksia. Toisaalta lämpötila vaikuttaa päällysteen väsymisominaisuuksiin siten, että korkeammissa lämpötiloissa päällyste kestää väsymistä enemmän kuin alemmissa lämpötiloissa, jos vetomuodonmuutos on sama. Käytännössä päällysteen lämpötilan nousu yleensä pienentää väsymiskestävyyttä.

Taulukko 3. Rakennetekijöiden vaikutus päällysteen alapinnan vaakasuoraan vetomuodonmuutokseen [Ehrola, 1996].

Tekijä	Muutos	Asfalttipäällysteen alapinnan vetomuodonmuutos
Asfalttipäällysteen paksuus - luja alusta - heikko alusta	Kasvu	Kohtalaisesti laskeva Voimakkaasti laskeva
Asfalttipäällysteen jäykkyys - paksu päällyste - ohut päällyste	Kasvu	Erittäin voimakkaasti laskeva Vaikutus vähäinen
Kantavan kerroksen paksuus - luja alusta - heikko alusta	Kasvu	Vaikutus vähäinen Kohtalaisesti laskeva
Kantavan kerroksen jäykkyys (moduuli)	Kasvu	Erittäin voimakkaasti laskeva

Sitomattomien materiaalien jäykkyyteen lämpötila ei käytännössä vaikuta niin kauan kuin niiden lämpötila pysyy 0°C yläpuolella. Kosteustilalla sen sijaan on huomattava merkitys sitomattomien materiaalien jäykkyyteen ja merkitys on yleensä sitä suurempi mitä hienoainespitoisempaa materiaali on. Alhaisessa kosteuspitoisuudessa hienoaines toimii karkeampien partikkeleiden välisenä sementoivana aineena, jolloin materiaalin jäykkyys voi nousta yli kaksinkertaiseksi kosteaan materiaaliin verrattuna [Saarenketo et al. 2001]. Toisaalta jos sitomattoman materiaalin kosteuspitoisuus nousee niin korkeaksi, että materiaali on lähellä veden kyllästämää tilaa eli maarakeiden välinen huokostila on käytännössä täynnä vettä, sen jäykkyys toistuvan kuormituksen alaisena voi hyvin nopeasti alentua. Vaikutusmekanismina on tällöin huokostilassa olevaan veteen muodostuva ylipaine, joka alentaa maarakeiden välisiä tehokkaita jännityksiä, joiden suuruudesta materiaalin jäykkyys puolestaan riippuu. Erityisen suuri riski huokosveden ylipaineen kehittymiselle on runsaasti hienoainesta sisältävillä materiaaleilla, joiden vedenläpäisevyys on avoimemman rakenteen omaavia materiaaleja alhaisempi.

Päällysteen väsymiskestävyys riippuu rakennetekijöiden lisäksi merkittävästi myös päällysteen ominaisuuksista (taulukko 4). Paksun päällysteen väsymiskestävyys lisääntyy yleensä päällysteen jäykkyyden lisääntyessä.

Ohutpäällysteisillä (≤ 80 mm) tierakenteilla verkkohalkeamien muodostuminen poikkeaa edellä esitetystä paksujen päällysteiden väsymisvaurioitumismekanismista. Ohutpäällysteisillä tierakenteilla sitomattomien kerrosten pysyvät muodonmuutokset (urautuminen) muodostuvat suuriksi. Päällysteen mukautuessa pysyviin muodonmuutoksiin siihen syntyvät poikkisuuntaiset vetomuodonmuutokset ajourissa voivat ylittää päällys-

teen siirtymiensietokyvyn. Tällöin päällyste voi ikään kuin revetä synnyttäen pituushalkeamaa ajouran keskelle. Tämän seurauksena liikennekuormituksen aiheuttamat raskat kasvat ja aiheuttavat päällysteen lisävaurioitumista kuten verkkohalkeamia [Belt ym., 2002].

Taulukko 4. Paksun asfalttipäällysteen väsymiskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä [Spoof, 1992, Myre, 1993].

Tekijä	Muutos	Tekijän muuttamisen vaikutus	
		Jäykkyyteen	Väsymiskestävyyteen
Sideaineen kovuus	Kasvu	Lisäävä	Lisäävä
Sideainepitoisuus	Kasvu	Lisäävä ¹	Lisäävä
Rakeisuuskäyrä	Avoimesta tiiviimpään	Lisäävä	Lisäävä
Kiviainestyyppi	Murskatun materiaalin osuuden kasvu	Lisäävä	Lisäävä
Tyhjätila	Lasku	Lisäävä	Lisäävä
Lämpötila	Lasku	Lisäävä	Lisäävä

¹ Saavuttaa optimin tasolla, joka on stabiilisuusvaatimusten yläpuolella.

3.2 Poikkisuuntainen epätasaisuus

Poikkisuuntaisen epätasaisuuden eli urautumisen pääasialliset syyt ovat päällysteen kulumisen sekä päällysteen, sitomattomien päällysrakennekerrosten ja alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset. Urautumista esiintyy tien poikkileikkauksessa pyörien kulku-urien kohdilla. Päällysteen kulumisen pääasiallinen syy on nastarenkaiden käyttö talviolosuhteissa.

Raskas liikenne aiheuttaa päällysteen plastista deformaatiota ja tiivistymistä synnyttäen pysyviä muodonmuutoksia. Liikennekuormituksen aiheuttamat leikkausjännitykset synnyttävät plastista deformaatiota, mille on tunnusomaista materiaalin siirtyminen sivusuunnassa. Tiivistyminen johtuu raskaan liikenteen aiheuttamasta jälkitiivistymisestä. Plastinen deformaatio on tyypillistä kohteissa, missä raskaan liikenteen nopeus on alhainen kuten esim. linja-autopysäkeillä ja liittymissä. Perimmäinen syy päällysteen pysyviin muodonmuutoksiin on päällysteen viskoelastisuus, minkä seurauksena osa kuormitusten synnyttämistä muodonmuutoksista jää pysyviksi.

Päällysteen pysyvien muodonmuutosten suuruus riippuu ulkoisista kuormitus- ja olosuhdetekijöistä sekä päällysteen ominaisuuksista. Kuormitus- ja olosuhdetekijöitä ovat mm. liikenteen määrä, kuormitusten suuruus, kuormitusaika (liikenteen nopeus) ja kuormitusten jakautuminen tien poikkileikkauksessa sekä päällysteen lämpötila (taulukko 5). Pysyvien muodonmuutosten vastustuskykyyn voidaan vaikuttaa käytettävien materiaalien (sideaineen, lisäaineiden ja kiviaineksen) valinnalla, massan suhteutuksella ja huolellisella päällysteen valmistamisella eli tekijöillä, mitkä vaikuttavat päällysteen jäykkyyteen.

Tien pinnalla näkyvässä urautumisessa ovat mukana päällysteessä tapahtuvan urautumisen lisäksi sitomattomissa rakennekerroksissa ja alusrakenteessa syntyvät pysyvät muodonmuutokset. Liikenteen kuormittaessa tierakennetta sitomaton materiaali pyrkii siirtymään ajourien kohdalla alaspäin samalla syrjäyttäen vieressä olevaa materiaalia sivulle. Syrjäytyvä materiaali liikkuu sivulle ja ylöspäin pienintä vastusta kohden. Pää-

lysteen alapuolisen rakenteen pysyvät muodonmuutokset ovat seurausta ajourien kohdalla tapahtuvasta sitomattoman materiaalin painumisesta ja ajourien välissä tapahtuvasta kohoamisesta.

Taulukko 5. Asfalttipäällysteiden deformatiiviseen vaikuttavat ulkoiset tekijät [OECD, 1988, PIARC, 1995].

Ulkoinen tekijä	Vaikuttavat osatekijät
Liikenne	Kuormitusten määrä Kuormitusten frekvenssi Kuormitusten poikittaisjakauma
Kuormitukset	Pystysuora vaikutus (paino, kosketuspaine, kosketuspinta) Tangentiaalinen vaikutus Kuormitusaika
Ilmasto	Lämpötila

Sitomattoman materiaalin pysyviin muodonmuutoksiin vaikuttavat mm. [Lekarp, 1997]:

- jännitystilaa (kuormitusten suuruus ja rakenne)
- kuormitusten määrä
- kosteusolosuhteet
- jännityshistoria (aiemmat kuormitukset)
- materiaalin tiiviys
- materiaalin rakeisuus ja kiviaines

Sitomattomien materiaalien ominaisuudet riippuvat vallitsevan jännitystilasta lisäksi raekokouksista, tiivyydestä ja vallitsevasta kosteustilasta. Materiaaleilla, joiden raekokouksikäyrä on tasaisesti kaartuva, maksimi raekoko suuri ja jotka sisältävät vähän savilajitetta (<0.002 mm), on pääsääntöisesti hyvät pysyvät muodonmuutosominaisuudet. Tiiviydellä on merkittävä vaikutus myös pysyvien muodonmuutosten syntymiseen. Yleisesti ottaen tiiviillä materiaalilla pysyvien muodonmuutosten määrä on aina vähäisempi kuin löyhässä tilassa olevalla [Ehrola, 1996].

Rakeiden fysikaaliset ominaisuudet kuten rakeiden muoto, pinnan karkeus, lujuus ja pysyvyys ovat tekijöitä, joilla on merkitystä karkearakeisten materiaalien pysyvien muodonmuutosten kehittymiseen. Kiviaineksen lujuudella on myös merkitystä pysyviin muodonmuutoksiin. Kiviaineksen rakeiden murenemisen ja rikkoutumisen seurauksena materiaalin hienoainepitoisuus lisääntyy. Kiviaineksen lujuuden merkitys korostuu tie-rakenteen ylimmässä sitomattomassa kerroksessa, missä liikennekuormituksen aiheuttama rasitus on suuri. Kiviaineksen rakeiden kyky vastustaa mekaanista hienontumista sekä kemiallista ja fysikaalista rapautumista riippuu kiviaineksen mineralogiasta sekä kiviaineksen rakenteesta eli kutouksesta.

Kosteustilalla on merkittävä vaikutus sitomattomien materiaalien palautuvaan muodonmuutokseen. Vaikutusmekanismit ovat tällöin periaatteessa varsin samanlaiset kuin mitä sitomattomien materiaalien jäykkyyden osalta on aiempaan jo to-

dettu. Hyvin alhaisen vesipitoisuuden omaavassa materiaalissa hienoaaines toimii karkeampien rakeiden välisenä sementoivana aineena lisäten materiaalin lujuutta ja näin myös sen kykyä vastustaa palautumattomia muodonmuutoksia. Kosteuspitoisuuden noustessa tämä vaikutus kuitenkin heikkenee. Veden kyllästävä tilaa lähestyttäessä sitomattoman materiaalin lujuus voi puolestaan alentua hyvin nopeasti toistuvan kuorituksen aiheuttaman huokosveden ylipaineen kehittymisen ja tästä aiheutuvan maa-rakeiden välisen tehokkaan jännityksen romahtamisen takia. Suurimmillaan riski huokosveden ylipaineen kehittymiselle ja tästä aiheutuvalle nopealle deformatumiselle on runsaasti hienoaainesta sisältävillä sitomattomilla materiaaleilla. Hienoainekseen määrän lisäksi asiaan vaikuttaa kiviaineksen ja erityisesti siihen sisältyvien hienorakeisten lajitteiden mineralogia ja laatu, joista pohjimmaltaan riippuu sekä materiaalin kyky imeä itseensä vettä erityisesti materiaalin jäätyminen yhteydessä että niiden kyky pidättää vettä, joka materiaaliin on päätyntä esimerkiksi sade- tai sulamisvesistä.

Tierakenteessa oleva ylimääräinen kosteus on pääosin peräisin sade- ja sulamisvesistä. Osa sadevedestä imeytyy sorapientareista, tieluiskista tai suoraan päällysteen läpi rakennekerrokseen. Sadevesi vaikuttaa myös pohjaveden pinnan korkeuteen ja sitä kautta varsinkin alusrakenteen vesipitoisuuteen.

Päällysrakenteen ollessa ohut ja alusrakenteen routivaa materiaalia alusrakenteeseen syntyy kevätolosuhteissa helposti pysyviä muodonmuutoksia. lisääntyneen veden ja alentuneen tiiviyden seurauksena. Routimisen yhteydessä tapahtuu materiaalin tilavuuden kasvua, mikä aiheutuu alapuolisista maakerroksista ja pohjavedestä imeytyvän sekä rakenteessa olevan veden jäätymisestä. Keväällä roudan sulaessa tierakenteeseen vapautuu runsaasti ylimääräistä kosteutta. Sulamiskauden tilanteen tekee ongelmalliseksi se, että sulaminen alkaa ylhäältä päin. Sulamisrintaman alapuolisen osan ollessa jäässä ylimääräisen veden poistuminen rakenteesta vaikeutuu merkittävästi. Samanaikaisesti myös routineen alusrakenteen tiiviyden on alhainen.

Sitomattomien kerrosten pysyvät muodonmuutokset ovat yleensä merkittäviä ohutpäällysteisillä alemman luokan teillä, joilla on tunnusomaista, että poikkileikkaus on kapea ja päällysrakenne usein ohut. Liikenteen kuormittaessa kapeilla teillä reunan puoleinen osa materiaalista liikkuu pääasiassa vaakasuunnassa, mikä edesauttaa pysyvien muodonmuutosten kehittymistä päällysteen alapuolisessa rakenteessa. Ohuen päällysteen takia liikennekuormituksen aiheuttamat rasitukset ovat suuria varsinkin ylimmässä sitomattomassa kerroksessa, mikä myös lisää pysyviä muodonmuutoksia.

3.3 Pituussuuntainen epätasaisuus

Epätasaiset routanousut ja tierakenteen oman painon aiheuttamat painumat ovat tien pituussuuntaisen epätasaisuuden pääasialliset syyt. Painumat johtuvat alusrakenteen kokoonpuristumisesta, mitä esiintyy pääasiassa heikoilla alusrakennemateriaaleilla (savi, turve). Liikennekuormitus vaikuttaa pituussuuntaisen epätasaisuuden kehittymiseen dynaamisten rasitusten lisääntymisen kautta varsinkin siinä vaiheessa, kun jo esiintyy muista syistä johtuvaa pituussuuntaista epätasaisuutta [Belt ym., 2002].

Epätasaisuutta aiheutuu myös mm. alusrakennemateriaalien ja olosuhteiden vaihtelusta, tierakenteen epäjatkuvuuskohtista kuten rummuista yms. ja päällysrakenteen epähomogeenisuudesta (rakennepaksuuksien erot, materiaalien vaihtelut, puutteellinen ja epätasainen tiivistys). Eri tekijöiden osuus kulloinkin syntyvään epätasaisuuteen vaihtelee hyvin paljon ja keskinäisiä osuuksia on vaikea erottaa toisistaan. Suomessa routiminen on useimmissa tapauksissa tärkein syy pituussuuntaisten epätasaisuuksien syn-

tymiseen. Routanousujen lisääntyessä riski suurten pituussuuntaisten epätasaisuuksien esiintymiselle kasvaa merkittävästi, koska routanousujen epätasaisuus on yleensä sitä suurempaa mitä suurempia routanousut ovat.

AB-teillä pituussuuntainen epätasaisuus on yleensä vähäistä. Tämä johtuu toisaalta paksusta päällysrakenteesta, jolloin IRI:n lisääntyminen on vähäistä, ja toisaalta siitä, että IRI-arvoa käytetään kunnostamiskriteerinä. Tällöin suuret pituussuuntaiset epätasaisuudet poistetaan kunnostamalla. Lisäksi nastarengaskulumisesta johtuva uudelleenpäällystäminen pienentää myös IRI-arvoa. PAB-V/O ja SOP-teillä suuret IRI-arvot johtuvat pääasiassa ohuesta ja usein rakentamattomasta päällysrakenteesta. Ohuella päällysrakenteella routanousujen epätasaisuus on suurta ja kuormituskestävyys alhainen.

4. LIIKENNEKUORMITUKSEN MÄÄRITTÄMINEN

Tierakenteisiin kohdistuva liikennekuormitus määritetään suunnitteluvaiheessa vastaavuuskerroinmenetelmällä mitoitussajan kumulatiivisena kuormituskertalukuna. Vastaavuuskerroinmenetelmässä kullakin akseli- ja ajoneuvotyypillä on oma vastaavuuskerroin, jolla tämä ajoneuvotyyppi kuormittaa rakennetta suhteessa standardiakselin mukaiseen kuormitukseen.

Vastaavuuskertoimien määrittämisessä on erityyppisten akselikuormitusten ekvivalenttikertoimia laskettaessa käytetty neljännen potenssin sääntöä tierakenteen vaurioitumisen suhteen (kaava 1). Eksponenttina käytetty arvo 4 edustaa AASHO – tiekokeen perusteella joustavilla tierakenteilla määritettyä keskimääräistä arvoa, jossa erilaiset tierakenteen vauriot ovat mukana yhteisarvona. Ajoneuvotyypeille on määritetty vastaavuuskertoimet akselikuormitusten ekvivalenttikertoimien ja ajoneuvotyypin keskimääräisen akselistokokoonpanon perusteella [Ehrola, 1996].

$$e_i = \left(\frac{P_i}{P_{st}} \right)^4, \quad (1)$$

missä e_i on akselikuormituksen i ekvivalenttikerroin

P_i tarkasteltava akselikuorma

P_{st} standardiakselikuorma

Nykyinen kuormituskertaluvun laskentamenettely pohjautuu aikaan, jolloin mittaus- ja tietotekniikka ei ollut kovin kehittyntä. Tästä syystä kuormituskertaluvun laskennassa ei ole pystytty ottamaan perusteellisesti huomioon liikennekuormituksesta tierakenteisiin kohdistuviin rasituksiin vaikuttavia tekijöitä (taulukko 6).

Temmeksen automaattisen mittaus- ja tallennusjärjestelmän kaltaisilla systeemeillä on mahdollista määrittää yksittäisten ajoneuvojen aiheuttamat rasitukset, olosuhteet ja ajotapa luotettavasti samanaikaisesti. Tällöin on mahdollista luoda vasteisiin perustuva menettely liikenteen tierakenteisiin aiheuttaman kuormituksen arvioimiseksi. Vasteisiin perustuvalla menettelyllä liikennekuormituksen arvioinnissa päästään selkeästi parempaan tarkkuuteen kuin perinteisillä menetelmillä. Vasteisiin perustuva menettely on myös periaatteeltaan "oikea" tapa arvioida liikennekuormituksen rasittavuutta. Liiken-

nekuormituksen mahdollisimman tarkka määrittäminen on perusedellytys käyttöön laskennallisessa mallintamisessa ja ennustavassa infrassa.

Taulukko 6. Liikennekuormituksen rasittavuuteen vaikuttavia tekijöitä.

Vaikuttava tekijä	Vaikutus/vaihtelu
Turmeltumisilmiö Väsyminen Deformoituminen	Potenssin n arvo noin 2 Potenssin n arvo noin 5
Ajoneuvo Ominaisuudet Kuormausaste	Vaihtelee paljon Vaihtelee paljon
Ajotapa Nopeus Ajolinja Ajoneuvojen väli	Vaihtelee Vaihtelee Vaihtelee paljon (päällysteen palautuminen)
Tierakenne Tyyppi/kerrospaksuudet Materiaalit Laatu	Vaihtelee Vaihtelee Vaihtelee (heikot kohdat)
Olosuhteet (liikennekuormituksen ajallinen kertymä) Lämpötila Kosteus Alusrakenteen routiminen	Vaihtelee vuorokauden ja vuodenajoittain paljon Vaihtelee vuodenajoittain ja sateiden mukaan Keväällä suuri kosteus ja alhainen tiiviys

5. MONIKERROSLASKENTAMENETTELY

Lineaariseen kimmoteoriaan perustuvissa monikerroslaskentamenettelyissä liikennekuormituksesta johtuviksi tierakenteen kriittisiksi vasteiksi yleensä otaksutaan sidottujen kerrosten alareunaan syntyvä vetomuodonmuutos ja alusrakenteen yläpintaan muodostuva puristusmuodonmuutos. Usein tarkastellaan myös sitomattomien päällysrakennekerrosten yläpintojen puristusmuodonmuutoksia, mikä on erityisen tärkeää ohutpäällysteisillä tierakenteilla. Tarkastelukohtana käytetään useimmiten yksikkö- tai paripyörän keskikohtaa. Tällainen kuormitustilanne on periaatteessa erikoistapaus, koska esim. leikkausjännitys vaihtaa suuntaansa tarkastelukohdassa. Liikkuvan liikenteen kuormituksen monimutkaisuuden ja tierakennemateriaalien käyttäytymisen vuoksi laskentamenettelyissä on jouduttu tekemään sekä lähtöoletuksia että yksinkertaistuksia (taulukko 7).

Liikennekuormitus otaksutaan staattiseksi ja tasaisesti jakautuneeksi pystysuoraksi kosketuspaineeksi, joka vaikuttaa tietyn kokoisella ympyrän muotoisella alalla. Liikenteen kuormitus välittyy tierakenteeseen todellisuudessa liikkuvan ajoneuvon renkaiden välityksellä. Tällöin kuormitukseen tulee erilaisia dynaamisia komponentteja. Tällaisia ovat hitaus- ja vaimennusvoimat [Liimatta ym., 1999] sekä pyörivän renkaan ja tien pinnan väliseen kosketuspintaan syntyvät leikkausjännitykset.

Pyöräkuorman synnyttämä pystysuora normaalijännitys (kosketuspaine) ei ole tasaisesti jakautuneena renkaan kosketuspinnassa. Renkaan pintakuviot ja pintakuvioiden ja renkaan reunan väliset jäykkyyserot saavat aikaan sen, että kosketuspaineen jakauma poikkeaa tasaisesta jakaumasta. Renkaan kosketuskuvio tien pinnassa ei myöskään ole todellisuudessa ympyrän muotoinen vaan usein muodoltaan lähempänä suorakaidetta.

Taulukko 7. Monikerroslaskentamenettelyissä käytettyjä oletuksia ja tilanne todellisuudessa [Ehrola, 1996].

Liikennekuormitus, tierakenne ja materiaalit	Laskentaolettaus	Tilanne todellisuudessa
Liikennekuormitus	Staattinen	Dynaaminen Hitaus- ja vaimennusvoimat
	Pystysuora kosketuspaine tien pinnassa	Lisäksi horisontaaliset leikkausvoimat renkaiden ja tien pinnan välisessä kosketuspinnassa
	Kosketuspaine tasaisesti jakautunut	Rengaskuorman synnyttämä kosketuspaine tien pinnassa ei tasaisesti jakautunut
	Kosketuspaineen kuormituspinta ympyrän muotoinen	Rengaskuorman kosketuskuvio poikkeaa ympyrän muodosta
Tierakenne	Tierakenne muodostuu vaakasuorista tasapaksuista rakennekerroksista, jotka lepäävät puoliavaruuden mukaisen alustan päällä.	Jokseenkin olettamusta vastaava
	Rakennekerrokset ovat vaakatasossa äärettömän pitkiä	Tien poikkisuunnassa rakennekerrokset eivät ole äärettömän pitkiä.
	Kerrostien rajapinnoilla täysin kehittynyt kitka.	Jokseenkin olettamusta vastaava
Rakennekerrokset ja materiaalit	Rakennekerrokset (materiaalit) ovat homogeenisiä ja isotrooppisia.	Rakennekerrosten homogeenisuus ja isotrooppisuus ovat rajallisia.
	Materiaalit ovat lineaarisesti kimmoisia	Sitomattomat materiaalit eivät ole täysin kimmoisia, toimivat usein epälineaarisesti ja eivät kestä vetoa.
		Bitumilla sidotut materiaalit ovat viskoelastisia

Ajoneuvon liikkumisesta ja tien pinnan epätasaisuudesta aiheutuu ajoneuvon pyöräkuormiin dynaamisia lisäkuormia, jotka lisääntyvät tien epätasaisuuden kasvaessa. Rakenteellisista otaksumista vain olettaus, että rakennekerrokset ovat äärettömän pitkiä tien poikkisuunnassa, poikkeaa merkittävästi todellisuudesta.

Materiaaliohaksumat, kuten lineaarinen kimmoisuus, homogeenisuus ja isotrooppisuus, merkitsevät sitä, että materiaalien vasteiden analysointiin voidaan käyttää Hooken lain mukaisia konstitutiivisiä laskentamalleja. Bitumilla sidotut materiaalit ovat kuitenkin viskoelastisia, eli niiden kuormituskäyttäytyminen riippuu kuormitusajasta ja lämpötilasta. Sitomattomat materiaalit eivät myöskään ole täysin kimmoisia ja niiden kuormituskäyttäytyminen riippuu vallitsevasta jännitystilasta sekä ovat vetoa kestävämpiä.

Tienrakennusmateriaalien laskentaotaksumista poikkeavat ominaisuudet yritetään saada vastaamaan käytännön tarkkuudella lineaarisen kimmoisuuden vaatimuksia siten, että käytetään laskennoissa mitoitusolosuhteita vastaavia materiaaliparametreja. Tämä koskee lähinnä materiaalien moduularvoja eli jäykkyyksiä. Sitomattomille materiaaleille tulee käyttää kuormitusolosuhteiden mukaisia jännitystiloja vastaavia resilienssimoduulien arvoja. Bitumilla sidotuille materiaaleille tulee puolestaan käyttää kuormitusaikoja ja lämpötiloja vastaavia jäykkyyksiä. Poisson-luvulle käytetään joustavien tierakenteiden tarkastelussa yleisesti vakioarvoa 0,35. Vakioarvon käytön perusteena on se, että Poisson-luvun määrittäminen on työlästä ja toisaalta pienillä Poisson-luvun vaihteluilla on vain vähäinen merkitys laskettuihin vasteisiin.

Tien rakennekerrokset pyritään rakentamaan tasalaatuisiksi, jolloin käytännön tarkkuudella voidaan laskentojen lähtökohdaksi hyvällä syyllä otaksua rakennekerrosten homogeenisuus. Sitomattomien materiaalien ominaisuudet ovat yleensä eri suuntiin poikkeavia eli materiaalit ovat todellisuudessa anisotrooppisia.

Rakennekerrosten ja alusrakenteen materiaaliominaisuuksien lähtöarvoina ovat kuormitusolosuhteisiin sidotut resilienssimoduuli M_r ja Poisson-luku ν . Olosuhteiden ja ilmaston vaikutukset otetaan huomioon määrittämällä kriittiset rasitukset ilmastovyöhykkeittäisillä periodeilla ja yhdistämällä periodikohtaiset tulokset Minerin säännön mukaisesti:

$$\sum_{i=1}^J \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (2)$$

missä n_i on kuormitusten lukumäärä muodonmuutostasolla ε_i
 N_i sallittujen kuormitusten määrä muodonmuutostasolla ε_i
 J muodonmuutostasojen määrä (vuodenaikojen mukaiset periodit)

Monikerroslaskentamenettelyn toimivuus edellyttää, että kuormitusolosuhteet ja niiden merkitys moduuleihin pystytään ottamaan riittävän tarkasti huomioon. Käytännössä esim. päällysteen lämpötila vaihtelee huomattavasti sekä vuoden että vuorokauden aikana. Tällöin muutamaa periodia käytettäessä joudutaan määrittämään ns. ekvivalenttilämpötilat, mitkä käytännössä kuvaisivat varsin laajaa lämpötila-aluetta ja niissä tulisi pystyä ottamaan huomioon myös liikennekuormituksen kertyminen eri lämpötiloissa.

Päällysteen lämpötilan merkittävä vaihtelu vaikuttaa paljon päällysteen jäykkyyteen. Tällöin tulisi tuntee mahdollisimman tarkkaan päällysteen jäykkyyden lämpötilariippuvuus kenttäolosuhteissa. Päällysteen jäykkyys vaikuttaa myös alla olevien sitomattomien kerrosten jännitystilaan, millä puolestaan on suuri merkitys sitomattomien kerrosten moduuleihin. Tästä syystä tulisi tuntee puolestaan tarkkaan myös sitomattomien kerrosten moduulien jännitystilariippuvuus kenttäolosuhteissa. Kosteusolosuhteet vaikuttavat myös sitomattomien kerrosten moduuleihin. Olosuhteiden lisäksi ajoneuvojen ominaisuudet ja ajotapa vaihtelevat suuresti (taulukko 6).

Monikerroslaskentamenettelyä hyödyntävien analyttisten mitoitustarkastelujen yhteydessä deformatiivisriskin arviointikriteerinä on perinteisesti käytetty alusrakenteen yläpintaan syntyvää puristusmuodonmuutosta. Kuten aiempaan on jo todettu, suomalaisissa oloissa tyyppillisten ohuiden päällysteiden alla myös ylimpiin sitomattomiin rakennekerroksiin kohdistuvien rasitusten tarkastelu on kuitenkin vähintään yhtä tärkeää. Näidenkin osalta deformatiivisriskitarkastelu on yleensä pyritty tekemään kerrosten yläpinnoille syntyviin puristusmuodonmuutoksiin perustuen. Tähän menettelyyn lienee

päädytty paljolti siksi, että näin tarkastelu päästään tekemään varsin analogisesti asfalttipäällysteille yleisesti sovellettavan väsymistarkastelun kanssa.

Todellisuudessa sitomattomien materiaalien deformatiivisuuden kannalta oleellisempaa on kuitenkin se, kuinka suuria materiaaliin kohdistuvat rasitukset, erityisesti leikkausjännitykset, ovat suhteessa materiaalin käytettävissä olevaan lujuuteen tarkasteltavassa jännitystilassa. Koska sitomattoman materiaalin lujuus riippuu käytännössä aina siinä vallitsevien tehokkaiden jännitysten suuruudesta, on tätä lähestymistapaa soveltavissa deformatiivistarkasteluissa liikennekuormitustilanteesta rakenteeseen mobilisoiduvien rasitusten kokonaisvaltainen hallinta erityisen tärkeää. Monikerroslaskentamenettelyille ominaisen kerroksittain lineaarisesti kimmoisen materiaalimallin käyttö muodostuu tällöin merkittäväksi ongelmaksi. Osittain tämä johtuu siitä, että pelkän lineaarisesti kimmoisen materiaalimallin käyttö kuvaa materiaalit automaattisesti vetoa kestävinä, mitä sitomattomat materiaalit perusluonteensa mukaisesti luonnollisesti eivät todellisuudessa ole. Jännitystilalaskelmien kannalta sitomattomien materiaalien näennäinen vedonkestävyys aiheuttaa kuitenkin merkittävän virheen esimerkiksi jännitystilan keskimääräistä tasoa kuvaavaan hydrostaattiseen jännitystilakomponenttiin.

Osittain yllä mainittua ongelmaa on mahdollista kiertää sisällyttämällä laskentamalliin vetojännitysten eliminointiominaisuus (nk. 'tension cut-off'). Tässäkään tapauksessa lineaarinen kerrosrakennemalli ei kuitenkaan pysty riittävällä tarkkuudella kuvaamaan tierakenteen sitomattomissa kerroksissa liikennekuormituksen alla toteutuvia jännityspolkuja. Näin ollen onkin todettava, että erityisesti deformatiivistarkastelujen kannalta monikerroslaskentamenettelyn soveltamiseen liittyy vielä merkittäviä ongelmia ja puutteita.

Monikerroslaskentamenettelyä voidaan periaatteessa soveltaa myös siten, että siinä hyödynnettäisiin suoraan tierakenteesta mitattuja vasteita, joissa on välillisesti mukana pääosa taulukon 6 tekijöistä. Tällöin päästäisiin todennäköisesti selvästi aikaisempaa parempaan tarkkuuteen, mikä on edellytys pyrittäessä ennustamaan tierakenteen kuntoilan muutoksia.

6. TURMELTUMISMALLIT

6.1 Päällysteen väsymiskestävyys

Päällysteen väsymiskestävyuden määrittämiseksi on olemassa lukuisa joukko valmiita laskentamalleja, missä väsymiskestävyys on määritetty laboratoriokokeilla, koeradoilta tai havaintoteiltä saatujen tulosten perusteella. Malleilla lasketut asfalttipäällysteen väsymiskestävyudet poikkeavat toisistaan, mikä vaikeuttaa mallien valintaa ja soveltamista erityyppisiin päällysteisiin ja vaihteleviin ilmasto-olosuhteisiin. Mallien muuttujina voivat olla päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksen lisäksi päällysteen jäykkyys, bitumipitoisuus ja tyhjätila. Päällysteen väsymiskestävyuden arvioimisessa käytetään yleisesti mm. seuraavia kestoikämalleja [Liimatta ym., 1999]:

$$\text{Asphalt Institute: } N_f = 6.32 \cdot 10^{17} \cdot C \cdot \varepsilon_t^{-3.291} \cdot S^{-0.854} \quad (3)$$

$$\text{missä } C = 10^{4.84 \left[\frac{V_b}{V_v + V_b} - 0.69 \right]}$$

$$\text{Shell: } N_f = 1.585 \cdot 10^{19} \cdot \varepsilon_t^{-5} \cdot S^{-1.8} \cdot (0.856 \cdot V_b + 1.08)^5 \quad (4)$$

$$\text{Ruotsi: } N_f = 3.66 \cdot 10^{13} \cdot \varepsilon_t^{-2.17} \cdot S^{-0.78} \cdot (1 + 2.3 \cdot 10^{11} \cdot \varepsilon_t^{-5.0}) \quad (5)$$

$$\text{Belgia: } N_f = 1.786 \cdot 10^{15} \cdot \varepsilon_t^{-4.76} \quad (6)$$

$$\text{TRRL: } N_f = 1.38 \cdot 10^{16} \cdot \varepsilon_t^{-4.32} \quad (7)$$

$$\text{SHRP: } N_f = k \cdot 2.0 \cdot 10^{21} \cdot e^{0.077 \cdot TA} \cdot \varepsilon_t^{-3.624} \cdot S^{-2.72} \quad (k=10..14) \quad (8)$$

Nottingham:

$$\log N_f = 14.39 \cdot \log V_b + 24.2 \cdot \log SP - k - \log \varepsilon_t \cdot (5.13 \cdot \log V_b - 8.63 \cdot \log SP - 15.8) \quad (9)$$

missä k on 46.82 kriittinen kunto
 k 46.06 vaurio

Norja:

$$\log N_f = 34.533 - 6.145 \cdot \log \varepsilon_t - 3.395 \cdot \log S + 0.386 \cdot \log V_b \cdot MF - 0.0788 \cdot V_v \quad (10)$$

Nordic SHRP-LTTP:

$$N_f = 10^{6.56 - 0.003 \cdot \varepsilon_t - 2658469 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t \cdot N_f}\right)} \quad (11)$$

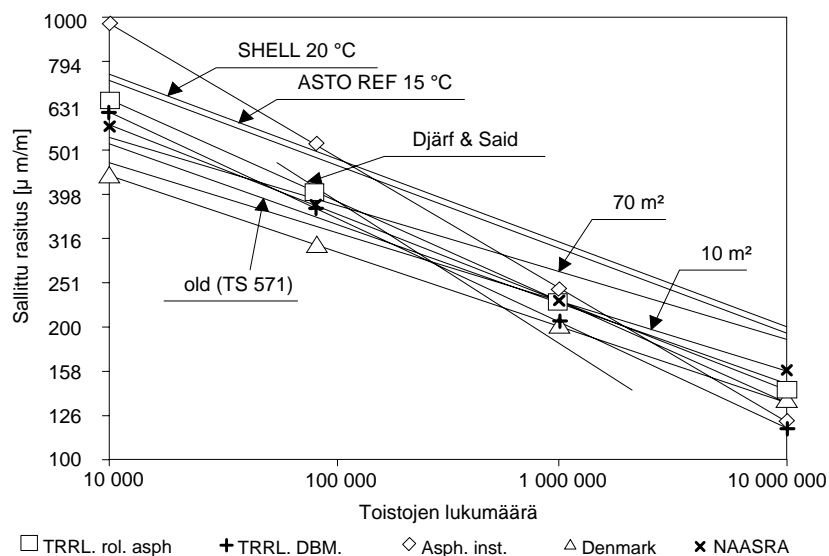
Edellä esitetyissä väsymisyhtälöissä esiintyvät muuttujat ovat:

N_f	sallittu kuormituskertaluku päällysteen väsymisen suhteen
ε_t	päällysteen alapinnan vetomuodonmuutos, [$\mu\text{m}/\text{m}$]
S	päällysteen jäykkyys, [Mpa]
V_b	bitumin määrä, [tilavuus-%]
V_v	tyhjätila, [%]
SP	pehmenemispiste, [$^{\circ}\text{C}$]
TA	täyttöaste, [%]
N_f	vuosittainen kuormituskertaluku
MF	'modefactor' (vakio voima / muodonmuutos)

Eri tutkimuksissa asfalttipäällysteille määritetyissä väsymissuorissa on suuri hajonta, mikä johtuu ainakin osittain siitä, että tutkimuksia on tehty hyvin erilaisilla massoilla ja erilaisilla menetelmillä (kuva 2). Pääosin väsymissuorat ovat kuitenkin samansuuntaisia. Poikkeuksen tekevät Asfaltti Institutin ja Djärf & Saidin suorat, jotka ovat selvästi muita jyrkempiä. Väsymissuorat, jotka on varustettu merkinnöillä 10 m² ja 70 m², perustuvat suomalaisiin kenttätutkimuksiin [Huhtala ym., 1993]. Numeroarvot ilmoittavat vaurioitumisasteen, jonka perusteella päällysteen väsymisen raja ja kuormitusten määrä on määritetty. Päällysteen vaurioitumisastetta kuvataan näissä vauriosummalla, mihin on laskettu tässä yhteydessä vain sellaiset vauriot, joiden voidaan otaksua johtuvan päällysteen väsymisestä [Ehrola, 1996].

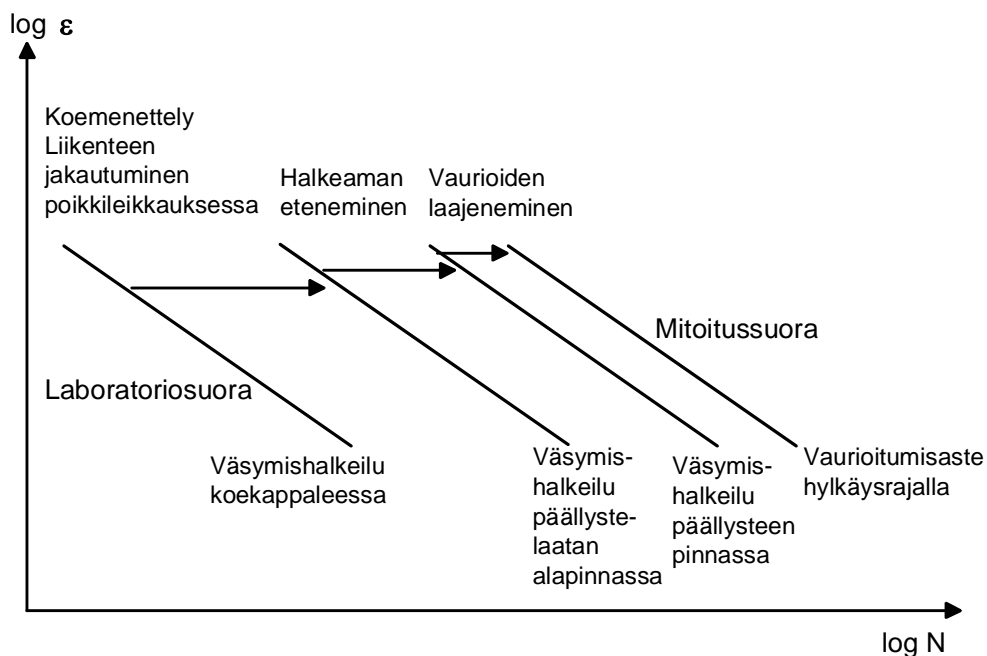
Päällysteen väsymiskestävyyttä kuvaavissa malleissa on yleensä mukana myös päällysteen jäykkyys. Tällä on merkitystä silloin, kun tarkastellaan erilaisen massakoostumuksen omaavia päällysteitä tai otetaan väsymistarkastelussa huomioon päällysteen lämpötilavaihtelut. Pienen jäykkyyden omaava päällyste kestää samalla muodonmuutostasolla selvästi enemmän kuormituksia kuin jäykkä päällyste. Tämä johtuu siitä, että jäykkyyden lisääntyminen tekee päällysteen murtumisherkäksi. Päällystepaksuuden ollessa vakio jäykkyyden kasvu pienentää kuitenkin syntyviä vetomuodonmuutoksia, joten jäykkyyden perusteella ei voida suoraan ennustaa väsymiskestävyyttä [Liimatta

ym., 1999]. Em. syistä päällysteen jäykkyys tulisi pystyä määrittämään mahdollisimman tarkoin eri lämpötiloissa.



Kuva 2. Asfalttipäällysteiden väsymissuoria [Huhtala ym., 1993, Ullidtz, 1987].

Laboratorio-oloissa määritetyt väsymiskestävyydet ovat ongelmallisia, koska laboratorio-kokeet joudutaan tekemään kenttäoloja voimakkaasti yksinkertaistavissa oloissa. Tämän takia laboratoriossa saadut väsymiskestävyydet eivät vastaa suoraan väsymiskestävyyksiä tiellä, vaan tulokset joudutaan muuttamaan kenttäoloja vastaaviksi monivaiheisen muunnosketjun avulla (kuva 3).



Kuva 3. Päällysteen väsymiskestävyyden laboratorio- ja kenttäolosuhteissa.

TPPT-projektissa kalibroitiin PARIS-projektissa kehitetty kenttähavaintoihin perustuva kuormituskestävyydsvaurioitumisen alkamisajankohtamalli Suomen oloihin soveltuvaksi.

Tulokseksi saatiin ns. TPPT-referenssirakenteen kenttäkalibroitu päällysteen alapinnan vetomuodonmuutokseen perustuva väsymiskriteeri [Spoof ym., 2001]:

$$N_{10} = 10^{7.29 - 0.00372 \times (EPS) - 5840000 \times \left(\frac{1}{EPS \times N_{10} Y} \right)} \quad (12)$$

missä	N_{10} on	kumulatiivinen kuormituskertaluku halkeilun syntyhetkellä
	EPS	päällysteen alapinnan sallittu vetomuodonmuutos [$\mu\text{m}/\text{m}$]
	$N_{10} Y$	mitoitusjakson keskimääräinen vuotuinen kuormituskertaluku

Malli 12 on tarkoitettu tien kuormituskestävyyssmitoitukseen. Mitoitusjakson pituudeksi suositellaan 10 vuotta. Mallilla arvioidaan liikenneperäisen vaurioitumisen alkamista ajourassa, mikä ei ole sama kuin tien kuormituskestävyys, koska tie on vielä käyttökelpoinen liikenneperäisen vaurioitumisen alkamisen jälkeenkin. Tien kestoikä tulisi arvioida kestoikämallilla (kunnon ennustemalleilla), jotka ilmaisevat monenko vuoden kulluttua rakenne saavuttaa etukäteen sovitun toimenpiderajan. Kunnon ennustemallit ovat vielä varsin kehittymättömiä. Esim. tienpidon ohjauksessa ja ohjelmoinnissa vaurioitumisnopeudet paksupäällysteisillä teillä ovat liikennemääräluokittain vakioita.

6.2 Pysyvät muodonmuutokset

6.2.1 Mallintamisen periaatteet

Yleisesti on käytetty kahdenlaista lähestymistapaa pysyvistä muodonmuutoksista johtuvan urautumisen rajoittamiseksi. Toisessa lähestymistavassa urautuminen minimoidaan rajoittamalla alusrakenteen yläpinnan puristusmuodonmuutoksia. Tällöin oletetaan, että alusrakenteen yläpuolisten kerrosten pysyvät muodonmuutokset ovat vähäisiä, jos noudatetaan materiaalien valinnassa, päällysteen suhteutuksessa ja rakentamisessa annettuja ohjeita. Toisessa lähestymistavassa arvioidaan kunkin kerroksen pysyvät muodonmuutokset erikseen. Tämän jälkeen eri kerrosten pysyvät muodonmuutokset summataan ja saadaan tierakenteen kokonaisdeformaatio [Federal Highway Administration, 1995].

Molemmassa lähestymistavoissa ongelmana on se, että urautumisen ennustaminen pohjautuu pääosin oletettuihin materiaaliominaisuuksiin todellisten ominaisuuksien sijasta. Yleensä tunnetaan jossain määrin alusrakenteen ominaisuuksia ja niiden vaihtelua.

Alusrakenteen yläpinnan puristusmuodonmuutoksiin perustuvan menettelyn toimivuus edellyttää, että käytetään standardi kerrospaksuuksia ja tyyppimateriaaleja. Käytännössä, jos päällysteen paksuus on suuri, voidaan otaksua, että merkittävä osa deformaation tapahtuu sidotuissa kerroksissa. Toisaalta, jos päällysteen paksuus on pieni ja sitomattomien kerrosten yhteispaksuus suuri kuten on useimmiten tilanne Suomessa, voidaan otaksua, että juuri sitomattomat päällysrakennekerrokset deformoituvat merkittävästi.

Tierakennusmateriaalien deformaation riippuu olennaisesti jännityssuhteesta (deviatorinen jännitys / maksimi deviatorinen jännitys). Jännityssuhteen ollessa vähemmän kuin 60 – 70 % maksimi lujuudesta pysyvät muodonmuutokset jäävät yleensä vähäisiksi. Pysyviin muodonmuutoksiin vaikuttaa jonkin verran myös jännityshistoria. Yleensä

suuret jännitykset aiheuttavat paljon suurempia pysyviä muodonmuutoksia kuin pienet jännitykset.

Huang [1993] ehdottaa seuraavanlaista menettelyä kokonaisurautumisen ennakoimiseksi:

1. Jaetaan päällyys- ja alusrakenne osakerroksiin sekä arvioidaan vertikaalinen ja radiaalinen jännitys kunkin osakerroksen keskellä.
2. Määritetään syklisellä kuormituksella (dynaaminen kolmiakσιαalikoe) tierakenteessa käytettävien materiaalien suhteelliset pysyvät muodonmuutokset käyttäen suurta kuormitusten lukumäärää. Jännitystila valitaan siten, että vertikaalinen syklinen jännityspulssi vastaa liikennekuormituksen tierakenteeseen synnyttämää kuormituspulssia ($\sigma_1 - \sigma_3$).
3. Lasketaan kunkin kerroksen pystysuorat pysyvät muodonmuutokset halutulla kuormitusten määrällä kertomalla suhteelliset pysyvät muodonmuutokset kerroksen paksuudella.
4. Laskemalla yhteen eri kerrosten pysyvät muodonmuutokset saadaan tien pinnan urautuminen.

Alusrakenteen osalta voidaan käyttää joko yhtä tai useampaa osakerrosta. Jos käytetään yhtä kerrosta, alusrakenteen paksuuden oletetaan olevan rajallinen. Pysty- ja vaakajännitykset määritetään ko. kerroksen keskeltä. Jos käytetään useampaa kerrosta, pysyvät muodonmuutokset pienenevät syvyyden lisääntyessä kunnes ne muodostuvat olemattomiksi. Tällöin ei tarvitse määrittää lisäkerrosten pysyviä muodonmuutoksia.

Lukuisia malleja on kehitetty pysyvien muodonmuutosten suuruuden arvioimiseksi. Suurena käytännön ongelmana ovat mallien edellyttämien parametrien määrittäminen. Parametrit riippuvat yleensä materiaalityypistä. Osa parametreista riippuu myös jännitystilasta. Lämpötila ja kuormitusaika (nopeus) vaikuttavat puolestaan merkittävästi bitumilla sidottujen materiaalien käyttäytymiseen.

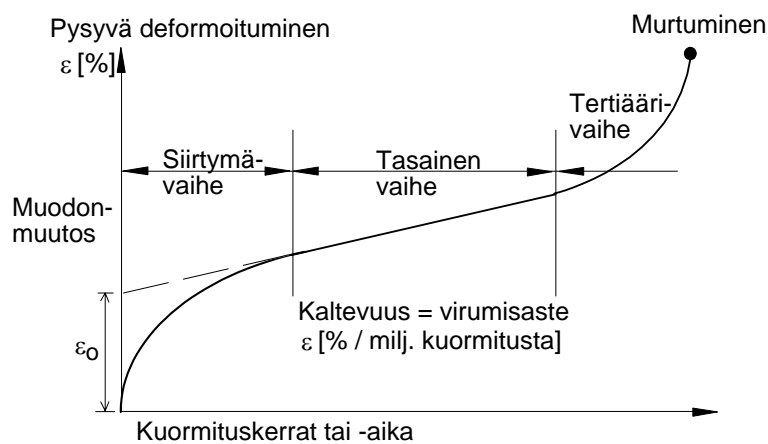
Yleisesti käytetyt urautumismallit on kehitetty maissa, missä sidottujen kerrosten yhteispaksuus on tyypillisesti suuri ja sitomattomien kerrosten pieni. Myös Suomen ilmasto- ja maaperäolosuhteet poikkeavat useimmista muista maista. Edellä mainituista syistä johtuen yleisesti käytettyjen urautumismallien soveltaminen Suomen olosuhteisiin on ongelmallista.

6.2.2 Päällyste

Päällysteen urautumisen aiheuttavat nastarengaskuluma, päällysteen ja alempien rakennekerrosten pysyvät muodonmuutokset eli deformaatio. Näistä kuluma on päällysteen kulutuskestävyyden ja liikennemäärän funktio. Päällysteen deformaatio on puolestaan merkittävästi päällystemassan koostumuksen ja rakenteen funktio: kiviaines, tyhjätila, bitumin laatu ja määrä. Lämpötila, liikenteen kuormitus ja nopeus vaikuttavat myös deformaation määrään [Laaksonen et al. 2004].

Deformaatiouran kehitys on nopeampaa alussa, kun uusi rakenne otetaan liikenteelle siinä tapahtuvan jälkitiivistymisen takia. Deformaation kehittyminen siis yleensä hidastuu ajassa, kun taas päällysteen nastarengaskuluma säilyy lähes vakiona. Vaikka kuluma pysyy lähes vakiona eri vuosina, niin urautuminen kiihtyy uran keskittäessä liikennettä uraan. Päällysteen deformaatioon vaikuttavat suuresti myös päällysteen alpuoliset kerrokset [Laaksonen et al. 2004].

Bitumilla sidotulla rakenteella syntyy periaatteessa jokaisen kuormituksen jälkeen tietty pysyvä muodonmuutos kuormituskertojen lukumäärästä riippumatta. Jos kuormitusten välinen lepoaika on riittävän pitkä, ehtii viskoelastinen eli viivästynyt kimmoinen muodonmuutos palautua kokonaan ja pysyväksi muodonmuutokseksi jää tällöin vain palautumaton viskoosinen muodonmuutos. Pysyvän muodonmuutoksen osuus lyhyillä kuormitusajoilla (liikenteen kuormitusajat) ja kohtuullisilla lämpötiloilla on käytännössä pieni (kuva 4).



Kuva 4. Pysyvstä muodonmuutoksesta on havaittavissa kolme vaihetta ennen murtumista [Ehrola, 1996].

Koska Suomessa sidotut kerrokset ovat ohuita verrattuna esimerkiksi Keski-Euroopan normaaleihin sidottujen rakenteiden kerrospaksuuksiin, ei paksuille kerroksille määritettyjä pysyviä muodonmuutosmalleja voida Suomen oloihin varauksettomasti käyttää.

Päällysteen pysyvien muodonmuutosten mallit pohjautuvat yleisesti joko olemassa olevan rakenteen mittauksiin (urasyvyys, liikennekuormitus, massan ominaisuudet) tai mekanistis-empiirisiin analyyseihin samoista parametreista. Suomessa käytetyt mallit pohjautuvat pääosin seurantamittaustulosten regressioanalyyseihin, mistä syystä ne ovat vain osittain teoreettisia malleja, ts. mallit ovat keinotekoisia ja luotettavia ainoastaan niillä rakenteilla, joihin regressioanalyyysi perustuu.

Teoriaa lähestyvät mallit monimutkaistuvat sitä mukaa mitä enemmän muuttujia malleissa otetaan huomioon. Malleissa olevien muuttujien määrän on oltava pieni, jotta malleista olisi myös käytännön kannalta hyötyä (mm. asfalttiteollisuus). Kuvaavaa malleissa on, että niissä esiintyy vakiokertoimia, jotka saadaan nomogrammeista tai ne on määritetty kokeellisesti. Vakiokertoimet voivat joskus olla hyvinkin tarkasti määritettyjä, joissakin malleissa on esitetty vakiokertoimia kuuden desimaalin tarkkuudella. Tällaisen mallin käyttökelpoisuus ja yleinen tarkkuus on kyseenalainen. Elementtimenetelmällä kehitetyt kontinuumimallit ovat matemaattisesti hyvinkin haastavia. Ne voivat olla kohdallisen tarkkoja, mutta niiden käyttö on hyvin epäkäytännöllistä.

Monia erilaisia malleja on kehitetty 30 viime vuoden aikana kuvaamaan pysyviä muodonmuutoksia. Ohessa on esitetty kaikkein yksinkertaisimmat mallit; monimutkaisia malleja ei ole oikeastaan järkevää käsitellä, koska niillä on ilmeisesti ollut tarkoitus arvioida paikallisia olosuhteita ja materiaaleja, eivätkä mallit ole kovinkaan käyttökelpoisia. Mallit voidaan jakaa niiden matemaattisuuden pohjalta kolmeen peruskategoriaan: puoli-logaritmiset mallit, eksponentiaaliset mallit ja muut mallit [Zhou, 2004]. Logaritmisista malleista esimerkkinä on Barksdalen vuonna 1972 esittämä malli:

$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= a_1 + b_1 \log N \\ \text{Barksdale: } \varepsilon_{pn} &= \frac{b_1}{N} (N > 1) \end{aligned} \quad (13)$$

missä	ε_p on	kumulatiivinen pysyvä muodonmuutos
	N	kuormitusten lukumäärä
	ε_{pn}	pysyvä muodonmuutos yhden kuormituksen jälkeen
	a_1, b_1	positiivisia regressiokertoimia

Eksponentiaalisista malleista esimerkkeinä esitetään:

$$\text{Yksinkertainen malli: } \varepsilon_p = aN^b \quad (14)$$

$$\text{VESYS-malli: } \varepsilon_{pn} = \mu \varepsilon_r N^{-\alpha} \quad (15)$$

$$\text{Ohio State -malli: } \varepsilon_p = aN^{1-m} \quad (16)$$

$$\text{Superpave-malli: } \log \varepsilon_p = \log \varepsilon_p(1) + S \log N \quad (17)$$

AASHTO2002-malli:

$$\log \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \log C + 0,4262 \log N : \log(C) = -3,74938 + 2,02755 \log(T) \quad (18)$$

missä	$\varepsilon_p, \varepsilon_{pn}$ ja N ovat	samat kuin edellä
	ε_r	jäännösmuodonmuutos (ei riipu jännityksistä)
	$\varepsilon_p(1)$	1. kuormituksen muodonmuutos
	a, b, m ja S	positiivisia regressiokertoimia
	μ	suhdeluku (pysyvän ja palautuvan muodonmuutoksen suhde)
	$\alpha=1-b$	pysyvän muodonmuutoksen parametri (muodonmuutoksen kasvun hidastuminen kuormituksen jatkuessa, yleensä >0)
	C	lämpötilasta riippuva vakio

Yhdysvalloissa tällä hetkellä käytössä olevan deformaation laskentaan käytetään vuoden 2002 Design Guidessa määritettyä peruskaavaa:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = aT^b N^c \quad (19)$$

missä a, b ja c ovat vakiokertoimia

Tästä edelleen on kehitetty esikalibroitu malli, jota käytetään tarkempaan analyysiin

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \beta_{r1} 10^{-3,15552} T^{1,734 \cdot \beta_{r2}} N^{0,39937 \cdot \beta_{r3}} \quad (20)$$

missä	$\beta_{r1}, r2, r3$ ovat	vakiokertoimia
	T	lämpötila (°F)
	N	kuormituskertaluku (80kN)

Kun tiedetään kuormitus (esim. BISAR tai KENLAYER –laskentaohjelmilla), voidaan ε_{rz} laskea kaavalla

$$\varepsilon_r = \frac{1}{|E|} (\sigma_z - \mu\sigma_x - \mu\sigma_y) \quad (21)$$

Dynaamisen moduulin E laskenta esitetään jäljempänä (kaava 24).

Yksinkertainen mutta kattava laskentakokonaisuus

Italiassa Palermon yliopistossa on kehitetty kohtalaisen hyvin toimiva malli käyttäen vanhoja ja yksinkertaisia malleja, joissa otetaan huomioon bitumin ominaisuudet, kuormitus ja sen nopeus, yms. Alla on lyhyesti esitetty mallissa käytettävät yhtälöt perusteluineen.

Päällysteen eri kerrosten muodonmuutos lasketaan kaavalla

$$\Delta h = \sum_{i,j,m} \varepsilon_{mij}^p h_m n_{ij} \quad (22)$$

missä	$\varepsilon_{i,j,m}$ on	tietyn kerroksen (m) muodonmuutos kuormitusmäärän (i) ja ajan suhteen (j)
	n_{ij}	kuormituskertaluku (N)
	h_m	kerroksen paksuus

Kuormituksesta (N) aiheutuva pysyvä muodonmuutos lasketaan kaavalla

$$\varepsilon_p = H \frac{\sigma_v - \sigma_h}{E} \left(\frac{N}{1000f} \right)^B \quad (23)$$

missä	N on	kuormituskertaluku (80 kN akselipainolla)
	f	kuormituksen taajuus (normaalisti 20 Hz)
	B	kokemuseräinen vakio (Verstraeten et al. suositteli tutkimuksissaan käytettäväksi arvoa 0,25)

H	Bitumin ominaisuusvakio, jonka arvoksi em. tutkimuksissa on suositettu käytettävän arvoa 115
E	materiaalin jäykkyysmoduuli, joka lasketaan alla olevalla kaavalla (24)
$\sigma_{V,H}$	pystysuuntainen ja –vaakasuuntainen jännitys, jotka voidaan laskea esim. BISAR tai KENLAYER –laskentaohjelmilla kullekin materiaalille erikseen

Bitumisen materiaalin jäykkyysmoduuli E (MPa) voidaan laskea kaavalla

$$|E| = E_b \left(1 + \frac{2,5}{n} \times \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n, \text{ missä} \quad (24)$$

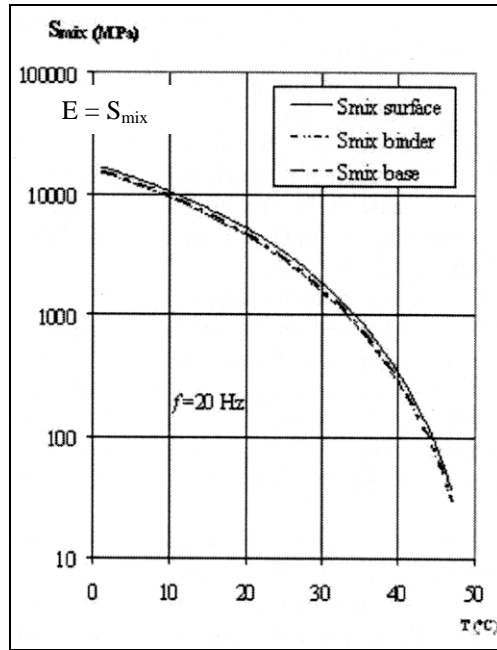
$$n = 0,831 \log \left(\frac{40000}{S_b} \right), \text{ ja } C_v = \frac{100 \left(\frac{V_a}{V_a + V_b} \right)}{97 + [100 - (V_a + V_b)]} \text{ ja} \quad (25)$$

$$E_b = 1,157 \cdot 10^{-7} \cdot t^{-0,368} \cdot e^{-PI} \cdot (T_{R\&B} - T)^5 \quad (26)$$

missä	V_a on	kiviaineksen tilavuusosuus massasta (%)
	V_b	bitumin osuus massan tilavuudesta (%)
	t	kuormitusaika (20 Hz taajuudella 0,05 sekuntia, malli pätee välillä 0,01-0,1 s)
	PI	bitumin penetraatioindeksi (bitumin jäykkyyden lämpötilaherkkyys, mallissa väli -1...+1)
	$T_{R\&B}$	bitumin pehmenemispiste (°C)
	T	lämpötila (°C)

Kaava ottaa huomioon lämpötilan ja materiaalin ominaisuudet. E_b kuvaa bitumin jäykkyyttä (MPa). Malli pätee kun $TR\&B-T$ on välillä 20...60 °C. Kuvassa 5 on esitetty jäykkyysmoduulin E lämpötilariippuvuus tietyllä massatyypillä ja vakiokuormituksella.

Pysyvien muodonmuutosmallien välillä on huomattavia eroja. Erot johtuvat kahdesta tekijästä: toinen tekijä on teoreettisen matemaattisen mallin eroavuus (logaritminen vai eksponentiaalinen) ja toinen on vakiokertoimien arviointi tai laskenta. Yleispätevää laskentamenettelyä deformaation arviointiin ei ole olemassa. Erilaisten mallien tulosten eroista on tehty monia tutkimuksia, joiden pääasiallisena tuloksena on ollut, että mallien avulla saadut tulokset eroavat toisistaan noin 10...20 %. Jos tarkastellaan oikeaa tapahtunutta deformaatiota ja mallista saatua deformaatiota, ero on pienimmilläänkin keskimääräisesti samansuuruinen.

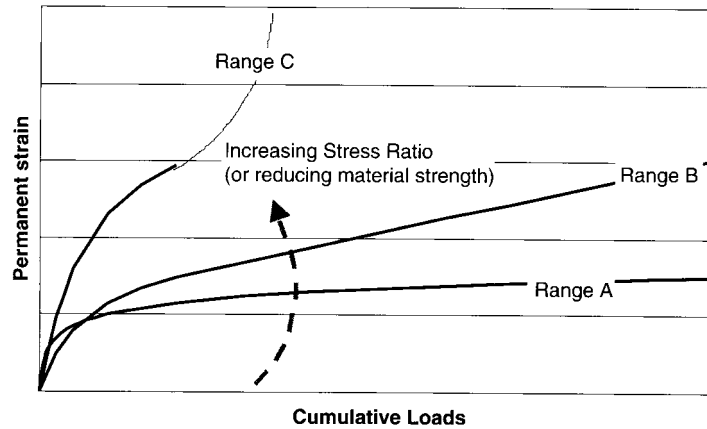


Kuva 5 Esimerkki jäykkyysmoduulin E riippuvuus lämpötilasta vakiokuormitusnopeudella (20 Hz) [Celauro, 2005].

6.2.3 Sitomattomat kerrokset ja alusrakenne

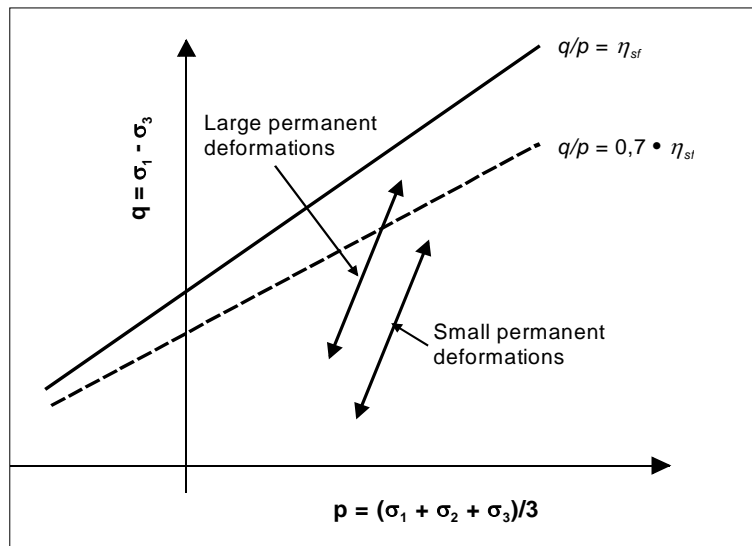
Aiempana sitomattomiin kerroksiin syntyvien pysyvien muodonmuutosten on jo todettu riippuvan monista materiaalin laatuun (rakeisuusjakautuman muoto, hienoainespitoisuus, partikkelien muoto ja pinnan karkeus, mineraloginen koostumus jne.) ja tilaan (lähinnä kosteus- ja tiiviystila) liittyvistä ominaisuuksista. Lisäksi syntyvien muodonmuutosten suuruuteen vaikuttaa luonnollisesti materiaaliin kohdistuvan rasituksen suuruus suhteessa materiaalin kapasiteettiin (vrt. luku 4) sekä kuormituksen toistumiskertojen lukumäärä. Verrattuna bitumilla sidottuihin materiaaleihin kuormituksen vaikutusajalla ja peräkkäisten kuormituskertojen väliajalla sen paremmin kuin lämpötilallakaan – niin kauan kun lämpötila pysyy 0°C:een yläpuolella - ei toisaalta ole sitomattomien kerrosten materiaalien ja alusrakenteen kannalta sanottavaa merkitystä syntyvien pysyvien muodonmuutosten suuruuteen.

Kuvan 4 tapaan myös sitomattomaan materiaaliin kuormituskertojen määrän funktiona kehittyvissä pysyvissä muodonmuutoksissa voidaan usein havaita erilaisia vaiheita. Aivan alussa toistuva kuormitus synnyttää yleensä aina ainakin jonkin verran suhteellisen nopeasti kehittyvää pysyvää muodonmuutosta, jonka voidaan tien sitomattoman rakennekerroksen tapauksessa ajatella edustavan osittain ehkä jo rakentamisen aikana tapahtuvaa materiaalin alkutiivistymistä. Jos toistuvan kuormituksen taso suhteessa materiaalin lujuuteen on kohtuullinen, muodonmuutokset ovat yleensä hidastuvia ja kuormituskertaa kohti syntyvä pysyvä muodonmuutos voi jopa lähestyä asymptoottisesti nollaa (tapaus A kuvassa 6). Toisaalta jos kuormitustaso on korkeampi, pysyvien muodonmuutosten kasvu voi jatkua tasaisena koko ajan ja pahimmillaan materiaali voi romahtaa toistuvan kuormituksen alaisena hyvinkin nopeasti (tapaukset B ja C kuvassa 6).



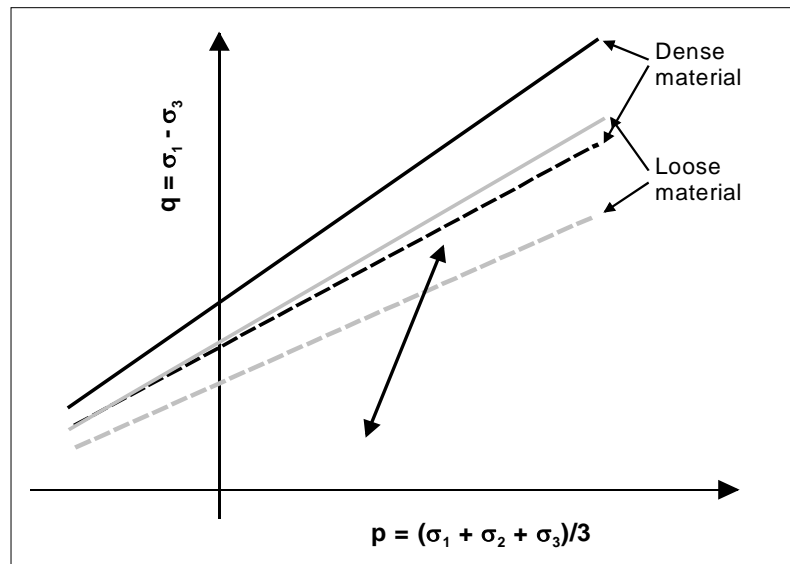
Kuva 6. Toistuvan kuormituksen alaisena olevan sitomattoman materiaalin pysyvän muodonmuutostäyttymisen periaatteelliset vaihtoehdot [Arnold et al. 2004].

Liikennekuormituksen alaisena olevassa tierakenteessa vallitsevien jännitysten kannalta edellä sanottua voidaan havainnollistaa periaatteessa kuvien 7 – 9 mukaisilla jännityspolkukuvaaajilla. Kuvassa 7 esitettyjen jännityspolkujen voidaan ajatella kuvaavan jännitystilän vaihtelua tien sitomattomassa rakennekerroksessa liikennekuormituksen ollessa tarkastelupisteen päällä ja toisaalta kuormituksen ollessa pelkkää rakennekerrosten omaa painoa vastaavalla tasolla. Jos liikennekuormitustilannetta vastaavat jännityksen huippuarvot tällöin pysyvät tietyn kriittisen tason - noin 60 – 70 % vastaavasta staattisen tilan lujuudesta - alapuolella, pysyvien muodonmuutosten kertyminen on hidasta (kuvan 6 tapaus A). Kriittistä rasiutusta korkeammilla jännityssuhteen huippuarvoilla muodonmuutoksia syntyy vastaavasti huomattavasti nopeammin (tapaus B tai C kuvassa 6).



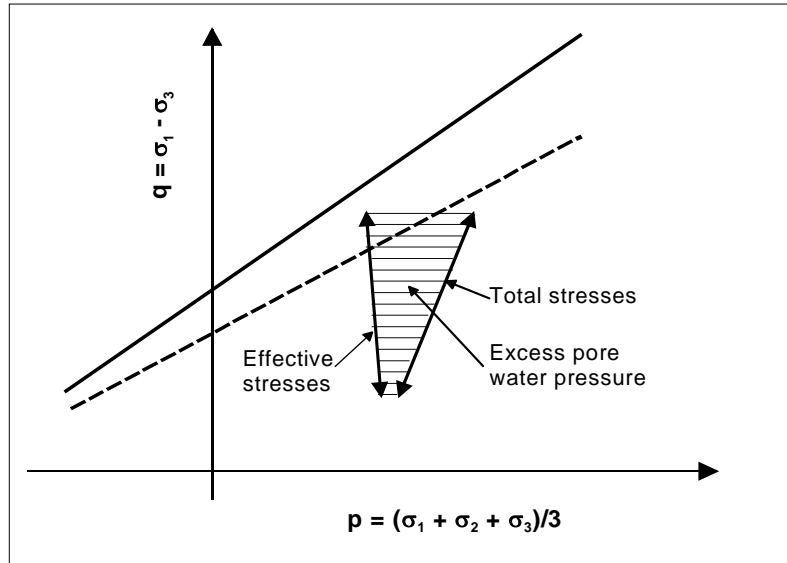
Kuva 7. Kuormitustason periaatteellinen vaikutus sitomattoman materiaalin pysyvien muodonmuutosten kertymisnopeuteen [Kolisoja, 1998]. Kuvassa yhtenäinen viiva edustaa materiaalin staattisen tilan lujuutta ja katkoviiva pysyvien muodonmuutosten kannalta kriittistä kuormitustasoa toistuvassa kuormituksessa.

Koska määrättyllä syvyydellä tietynlaisen päällysteen alla olevassa sitomattomassa rakennekerroksessa vaikuttavat jännitykset riippuvat ensisijaisesti rakenteeseen kohdistuvasta ulkoisesta kuormituksesta, voidaan rakennekerroksen lujuuden vaikutusta pysyvien muodonmuutosten kertymisnopeuteen vastaavasti havainnollistaa periaatteellisella tasolla kuvan 8 mukaisesti. Siinä tietynsuuruudesta kuormituksesta aiheutuva rasitus jää hyvälaatuisella materiaalilla selvästi nopean deformaation kannalta kriittisen kuormitustason alapuolelle, kun taas ominaisuuksiltaan heikommassa materiaalissa tämä kriittinen taso ylittyy selvästi. Perimmäisenä syynä materiaalin alhaisempaan lujuuteen voi tällöin olla esimerkiksi heikompi tiiviys tai korkeampi kosteuspitoisuus.



Kuva 8. *Materiaalin lujuuden periaatteellinen vaikutus sitomattoman materiaalin pysyvien muodonmuutosten kertymisnopeuteen [Kolisoja, 1998].*

Erityisen suuri riski sitomattoman materiaalin nopealle deformaation syntymälle syntyy silloin kun materiaali on joko kokonaan tai ainakin lähes kokonaan veden kyllästyneessä tilassa. Tällöin materiaaliin voi nopeasti muuttuvan syklisen kuormituksen vaikutuksesta syntyä huokosveden ylipainetta, joka tehokkaiden jännitysten periaatteen mukaisesti pienentää vastaavasti materiaalin lujuuden kannalta oleellisia kiviainespartikkeleiden välisiä tehokkaita jännityksiä. Kuvan 9 mukaisessa jännityspolkuesityksessä tämä näkyy siten, että ulkoisesta kuormituksesta riippuvaan, kuvaajan pystyakselilla esitettyyn deviatoriseen jännitykseen huokosvedenpaineen kasvu ei vaikuta, mutta vaaka-akselilla esitettyyn hydrostaattiseen jännitykseen huokosvedenpaine vaikuttaa suuruutensa verran alentavasti. Tällöin kuvan 9 mukainen jännityspolku kiertyy vastapäivään ja kuormituksen alaisena olevassa rakenteessa toteutuva jännitystila päättyy huomattavasti lähemmäksi materiaalissa vallitsevia tehokkaita jännityksiä vastaavaa todellista lujuutta. Käytännössä tilannetta pahentaa yleensä vielä oleellisesti se, että korkean kylästyneen omaavan materiaalin lujuus on todennäköisesti kaiken kaikkiaan alhaisempi kuin ominaisuuksiltaan muuten samanlaisen, mutta kuivemmassa tilassa olevan materiaalin lujuus.



Kuva 9. Materiaaliin kehittyvän huokosvedenpaineen periaatteellinen vaikutus sitomattoman materiaalin pysyvien muodonmuutosten kertymisnopeuteen [Kolisjoja, 1998].

Myös sitomattomiin materiaaleihin kuormituskertamäärän funktiona kehittyvien pysyvien muodonmuutosten mallintamiseen on pyritty käyttämään samantyyppisiä logaritmi- ja eksponentiaalisia malleja, joita on esitelty jo edellä kappaleessa 5.2.2 (kaavat 13 ja 14). Näitä sovellettaessa niin materiaalin laadussa ja tilassa kuin myös siihen kohdistuvissa kuormituksissa tapahtuvien muutosten vaikutus pyritään ottamaan huomioon suoraan kaavoihin sisältyvien parametrien arvoissa. Erilaisten jännitystilojen ja olosuhteiden huomioon ottamiseksi kaavojen parametrit olisi tällöin periaatteessa määritettävä tapauskohtaisesti erikseen, mikä tekee niiden käytännön soveltamisen kaavojen yksikertaisesta matemaattisesta muodosta huolimatta varsin hankalaksi. Verrattaessa kaavoja 13 ja 14 kuvan 6 mukaisiin sitomattoman materiaalin erilaisiin periaatteellisiin käyttäytymismalleihin on toisaalta myös varsin selvää, että kummallakaan mainituista kaavoista ei ole mahdollista kuvata sekä kuormituskertojen määrän myötä stabiloituvaa käyttäytymistä (tapaus A kuvassa 6) että nopeaan deformatumiseen johtavaa kuormitustilannetta (tapaus C kuvassa 6).

Eräänä keinona välttää erilaisiin jännitystilyhdistelmiin liittyvien parametriarvojen tapauskohtainen määrittämistarve on ollut pyrkimys löytämään yhteys tiettyä jännitysyhdistelmää vastaavan kimmoisen muodonmuutosvasteen ja tällä jännitysyhdistelmällä toistuvassa kuormituksessa kertyvien pysyvien muodonmuutosten välille. Esimerkkeinä tästä lähestymistavasta voidaan mainita kaavan 15 mukainen VESYS-malli sekä Verkeran (1979) esittämä malli:

$$\varepsilon_p(N) = a \cdot \varepsilon_r \cdot N^b \quad (27)$$

missä $\varepsilon_p(N)$ on	pysyvä muodonmuutos N kuormituskerran jälkeen
ε_r	kimmainen muodonmuutos tarkasteltavalla jännitystasolla
N	kuormituskertojen lukumäärä
a, b	materiaaliparametreja

Vaikka monet tutkijat ovatkin omien tutkimusaineistojensa perusteella kritisoineet kaavojen 15 ja 27 mukaista lähestymistapaa, on niiden kanssa analogisella mallinnustavalla onnistuttu kuvaamaan muun muassa Oulun yliopistossa tehtyjen, liikkuvan pyöräkuorman perustuvien TKT-laiteajojen yhteydessä havaittuja pysyviä muodonmuutoksia varsin onnistuneesti [Belt ym., 2000].

Vuosien kuluessa monet tutkijat ovat esitelleet lukuisia erilaisia pysyvän muodonmuutoksen kertymismalleja, joissa materiaalisissa vallitsevan jännitystilän vaikutus on nimellisesti pyritty ottamaan huomioon. Erään ehkä kehittyneimmistä tämän ryhmän malleista ovat esitelleet Gidel et al. (2001):

$$\varepsilon_1^p(N) = \varepsilon_{10}^p \cdot \left[1 - \left(\frac{N}{N_0} \right)^{-B} \right] \cdot \left[\frac{L_{\max}}{p_a} \right]^n \cdot \frac{1}{\left(m + \frac{s}{p_{\max}} - \frac{q_{\max}}{p_{\max}} \right)} \quad (28)$$

missä L_{\max} on	$\sqrt{p_{\max}^2 + q_{\max}^2}$
p_{\max}	syklisen kuormituksen maksimiarvoa vastaava hydrostaattinen jännitys
q_{\max}	syklisen kuormituksen maksimiarvoa vastaava deviatorinen jännitys
p_a	100 kPa
ε_{10}^p, B, n	mallin parametreja
m, s	materiaalin murtolujuuutta kuvien 7 – 9 mukaisessa koordinaatistossa vastaavan suoran ($q = m \cdot p + s$) kaltevuus ja leikkauspiste pystyakselilla

Kaavan 28 esitysmuotoa tarkastelemalla voidaan todeta, että kahden toisistaan riippumattoman funktion tulona saatavan muodonmuutosarvon ensimmäinen tekijä ottaa huomioon kuormituskertojen lukumäärän ja jälkimmäinen vastaavasti jännitystason vaikutuksen.

Toisen suhteellisen tuoreen mallin, jonka avulla on mahdollista kuvata sekä stabiloituvaa että eri nopeuksilla suuriinkin pysyviin muodonmuutoksiin päätyvää sitomattoman materiaalin käyttäytymistä on esitellyt Huurman (1997):

$$\varepsilon_p(N) = A \cdot \left(\frac{N}{1000} \right)^B + C \cdot \left(e^{\frac{D \cdot N}{1000}} - 1 \right) \quad (29)$$

missä $\varepsilon_p(N)$ on	pysyvä muodonmuutos N kuormituskerran jälkeen
A, B, C, D	jännityssuhteesta ($\sigma_1/\sigma_{1,f}$) riippuvia materiaaliparametreja
σ_1	suurin pääjännitys
$\sigma_{1,f}$	murtotilannetta vastaava suurin pääjännitys samalla jännitystasolla

Tässä mallissa ensimmäinen yhteenlaskettava termi kuvaa toistuvan kuormituksen alkuvaiheelle tyypillistä nopeaa mutta varsin pian hidastuvaa muodonmuutoksen kasvua (kuva 6). Jälkimmäisen termin avulla pystytään vastaavasti kuvaamaan parametrien C

ja D arvoista riippuen joko kuormituksen toistokertojen myötä stabiloituvaa käyttäytymistä tai jatkuvaan pysyvien muodonmuutosten kasvuun päätyvää kuormitustilannetta.

Varsin kattava katsaus sekä sitomattomien materiaalien palautuvaan että palautumattomaan muodonmuutoskäyttäytymiseen vaikuttavista tekijöistä samoin kuin muodonmuutosten mallintamiseen käytetyistä lähestymistavoista on koottuna tuoreessa Ratahallintokeskuksen raportissa [Brecciaroli ja Kolisoja, 2006].

Karkearakeisten alusrakennemateriaalien käyttäytymistä niin palautuvien kuin palautumattomienkin muodonmuutosten suhteen voidaan pitää hyvin analogisena sille, mitä sitomattomille rakennekerrosmateriaaleille on yleensä todettu. Hienorakeisilla alusrakennemateriaaleilla tilanne sitä vastoin on jossain määrin toinen. Ensinnäkin niiden palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä kuvaavien moduularvojen on yleensä havaittu aleneva materiaaliin kohdistuvan deviatorisen jännityksen kasvun myötä. Pysyvien muodonmuutosten kannalta hienorakeisten alusrakennemateriaalien käyttäytymiseen keskeisesti vaikuttava piirre on puolestaan niiden routivuus. Routimisesta johtuen materiaalien kyllästysaste voi roudan sulamisvaiheessa keväällä nousta hyvin korkeaksi samalla kun niiden tiiviys on alhainen. Tällöin hienorakeiset alusrakennemateriaalit voivat olla erityisen alttiita suurillekin pysyville muodonmuutoksille.

Laskennallisten mallinnustarkastelujen kannalta routineiden hienorakeisten alusrakennemateriaalien pysyvien muodonmuutosten käsittely on varsin haasteellista. Toisaalta alusrakenteen pysyvillä muodonmuutoksilla lienee kuitenkin mainittavampaa merkitystä vain kaikkein alempiluokkaisilla teillä, koska jo noin metrin paksuisen päällysrakenteen alapuolella pohjamaan yläpintaan liikennekuormituksesta aiheutuvat rasitukset jäävät vain muutaman kPa:n suuruusluokkaan. Alempiluokkaisten teiden alusrakenteen deformaantumiseen liittyviä kysymyksiä on hiljattain käsitelty melko laajasti ainakin Roadex II –projektiin (2005) liittyvissä raporteissa.

7. PÄÄTELMÄT

7.1 Tutkimustoiminnan kohdentaminen

TIEIKÄ-projektin tavoitteena on parantaa tierakenteiden käyttöiän aikaisten kuntotilanteen muutosten ja vaadittavien ylläpitotoimenpiteiden ennustettavuutta modernin mittaus- ja monitorointiteknologian tarjoamia mahdollisuuksia hyväksi käyttäen. Projektin tuloksena tullaan raportoimaan tien pinnalta tehtäviin ainetta rikkomattomiin mittauksiin ja rakenteen tilan monitorointiin perustuva tierakenteen vaurioitumisen arviointimenetely sekä laatimaan kehitettävän kuntotilan hallintajärjestelmän kokonaiskuvaus hyödyntämis- ja käyttöohjeistuksineen.

TIEIKÄ –projektissa keskitytään päällysrakenteen toimintaan, mistä syystä tutkimustoiminnan painopiste on liikenneperäisissä turmeltumisilmiöissä ja niihin vaikuttavissa tekijöissä lukuunottamatta kulutuskerroksen kulumista. Tierakenteiden kunnon ennustamisen kannalta tärkeimmät turmeltumisilmiöt ovat tällöin:

- Sidottujen kerroksen väsyminen
- Sidottujen kerrosten pysyvät muodonmuutokset
- Sitomattomien kerrosten (ja alusrakenteen) pysyvät muodonmuutokset

Mittausteknisistä syistä tulee pystyä määrittämään/arvioimaan kulutuskerroksen kulumisen osuus kokonaisurautumisesta. Myös alkutiivistyminen tulisi pystyä erottamaan muista pysyvistä muodonmuutoksista.

Rakenne- ja materiaalitekijöiden lisäksi olosuhteilla on merkittävä vaikutus liikennepe-
räisissä turmeltumisilmiöissä. Tästä syystä tulee tarkastella myös seuraavia tekijöitä ja
niiden merkitystä ko. turmeltumisilmiöissä:

- Bitumilla sidottujen kerrosten ja ilman lämpötilat
- Rakenteen routaantuminen (lämpötilat)
- Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen kosteudet

Liikennekuormituksen rasittavuuteen vaikuttavat myös ajoneuvo- ja ajotapatekijät (tau-
lukko 6). Myös liikennekuormituksen rasittavuuden arviointimenettely kaipaa huolellista
tarkastelua.

Tierakenteiden kunnan ennustamisen kannalta turmeltumisilmiöiden laskennallinen
mallintaminen on perusedellytys. Mallintaminen edellyttää vaste- olosuhdemittausten
lisäksi tarkkoja kuntomittauksia.

7.2 Turmeltumisilmiöihin ja rasitukseen liittyvä tutkimustarve

Sidottujen kerrosten väsyminen

Bitumilla sidottujen kerrosten väsymistä laboratorio-oloissa on selvitetty paljon eri me-
netelmillä. Laboratorio-oloissa väsyminen katsotaan yleensä tapahtuneeksi, kun veny-
mäliuska katkeaa tai moduuli on alentunut puoleen alkuperäisestä. Suurena ongelma-
na on se, että laboratoriotulokset eivät vastaa suoraan väsymiskestävyyksiä tiellä, vaan
ne joudutaan kalibroimaan kenttähavaintojen perusteella. Esim. TPPT-projektissa ka-
libroitiin Suomen oloihin soveltuva kuormituskestävyysvaurioitumisen alkamismalli.
Ongelmaksi jäi se, että mallinnuksessa käytettiin laskennallisia suhteellisia päällysteen
alapinnan vetomuodonmuutoksia mitattujen sijasta.

Vetomuodonmuutosten laskennallinen määrittäminen edellyttää eri kerrosten ja osittain
myös alusrakenteen moduulien tarkkaa tuntemista. Päällysteen jäykkyys riippuu huo-
mattavasti lämpötilasta, mistä syystä on tunnettava tarkkaan päällysteen lämpötila ja
päällysteen jäykkyyden riippuvuus lämpötilasta. Ylimmän sitomattoman kerroksen jäyk-
kyys vaikuttaa myös merkittävästi vetomuodonmuutoksen suuruuteen, mistä syystä tu-
lisi tuntea tarkoin ko. kerroksessa vallitseva jännitystila ja kimmoiset muodonmuutok-
set. Erityisenä ongelmana sitomattoman kantavan kerroksen osalta on se, että ko. ker-
roksen moduuli riippuu jännitystilasta, mikä puolestaan on kerroksen yläosassa selvästi
suurempi kuin alaosassa.

Väsymisen osalta monikerros-laskentamenettely toiminee vähintään kohtuullisesti. Mer-
kittävänä ongelmana on vetorasitusten summaaminen, koska rasitukset riippuvat huo-
mattavasti vaihtelevien liikennekuormitusten lisäksi vaihtelevista olosuhteista (lämpöti-
la, kosteus, alusrakenteen mahdollinen routiminen).

TIEIKÄ-projektin kannalta käytännön ongelmana on myös projektin lyhyt kesto. Yleensä ensimmäisten väsymiseen liittyvien tien pinnalla havaittavien vaurioiden syntymiseen menee useita vuosia.

Sidottujen kerrosten pysyvät muodonmuutokset

Bitumilla sidottujen kerrosten deformatumista on selvitetty paljon laboratorio-oloissa. Pääpaino on ollut massatekijöiden merkityksen selvittämisessä. Laboratoriokokeina on käytetty mm. Marshall-koetta, halkaisuvetolujuuskoetta, kolmiaksaalikoetta sekä staattisia ja dynaamisia virumiskokeita. Esimerkiksi Asphalt institutessa on kehitetty dynaamisten kolmiaksaalikokeiden tulosten regressioanalyysillä seuraava malli pysyvien muodonmuutosten arvioimiseksi:

$$\log \varepsilon_p = - 14.97 + 0.408 N + 6.865 \log T + 1.107 \log \sigma_d \quad (30)$$

$$- 0.117 \log V + 1.908 P_{\text{eff}} + 0.971 \log V_v \quad R^2 = 0.842$$

missä

ε_p	on	pysyvä muodonmuutos, in
N		kuormitusten määrä
T		lämpötila, °F
σ_d		deviatorinen jännitys, lbf/in ²
V		viskositeetti + 21 °C lämpötilassa, Ps x 10 ⁶
P_{eff}		bitumin määrä tilavuus-%
V_v		tyhjättila, %

Laboratoriokokeiden tuloksia voidaan käyttää suoraan lähinnä päällysteiden vertailuun, mutta ei kentällä tapahtuvan deformatumisen arviointiin ilman verifiointia. Laboratoriokokeisiin perustuvien mallien suurimpana heikkoutena on se, että niissä ei pystytä ottamaan huomioon riittävästi liikennekuormitusten ja olosuhteiden vaihtelun eikä rakenteen vaikutuksia deformatumiseen. Lisäksi laboratoriokokeiden kuormitus ei vastaa liikkuvan pyörän kuormitusta (mm. pääjännitysten kiertyminen).

Päällysteen lämpötilalla on merkittävä vaikutus jäykkyyteen ja sitä kautta deformatumiseen, mistä syystä päällysteen lämpötila ja sen jakaantuminen syvyysuunnassa on tunnettava tarkasti. Samoin on tunnettava liikennekuormitus ja sen vaihtelu mahdollisimman tarkoin.

Päällysteen ominaisuuksien merkitys deformatumiseen tunnetaan melko hyvin. Varsinaisista laskentamenetelmistä, jotka pohjautuisivat päällysteominaisuuksien lisäksi liikennekuormituksen aiheuttamiin rasituksiin, on selvä puute. Päällysteen deformatumisen rajoittamiseksi on yleensä eri maissa ohjeita, minkä tyyppisiä päällysteitä ja sideaineita tulisi käyttää tietyntyyppisillä teillä ja ilmastoalueilla.

Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset

Perinteisesti sitomattoman rakenteen osan deformatumista on minimoitu rajoittamalla alusrakenteen yläpinnan puristusmuodonmuutosta. Suomen oloissa päällysteen pakkaus on yleensä pieni ja sitomattomien kerrosten yhteispakkaus suuri, mistä syystä

myös sitomattomiin kerroksiin syntyy herkästi pysyviä muodonmuutoksia. Alusrakenteen routimisen takia myös alusrakenne saattaa deformatua varsinkin, jos päällysrakenteen paksuus on pieni. Kimmoisen puristusmuodonmuutoksen rajoittamismenettelyssä ei oteta huomioon sitä, että materiaaliominaisuuksilla, jotka saattavat vaihdella huomattavasti, on suuri merkitys deformatumiseen. Kosteusolot vaikuttavat myös merkittävästi deformatumiseen. Lisäksi kapeilla teillä myös tien poikkigeometria vaikuttaa sitomattomien kerrosten pysyviin muodonmuutoksiin.

Monikerroslaskentamenettelyllä voidaan määrittää toki kimmoisia jännityksiä ja muodonmuutoksia lähtien materiaalien kimmoisista ominaisuuksista, mutta niissä ei pystytä ainakaan suoraan ottamaan huomioon pysyviä muodonmuutosominaisuuksia, jos ne eivät täysin riipu kimmoisista ominaisuuksista. Tästä syystä tulisi ainakin kokeilla elementtimenetelmän käyttöä.

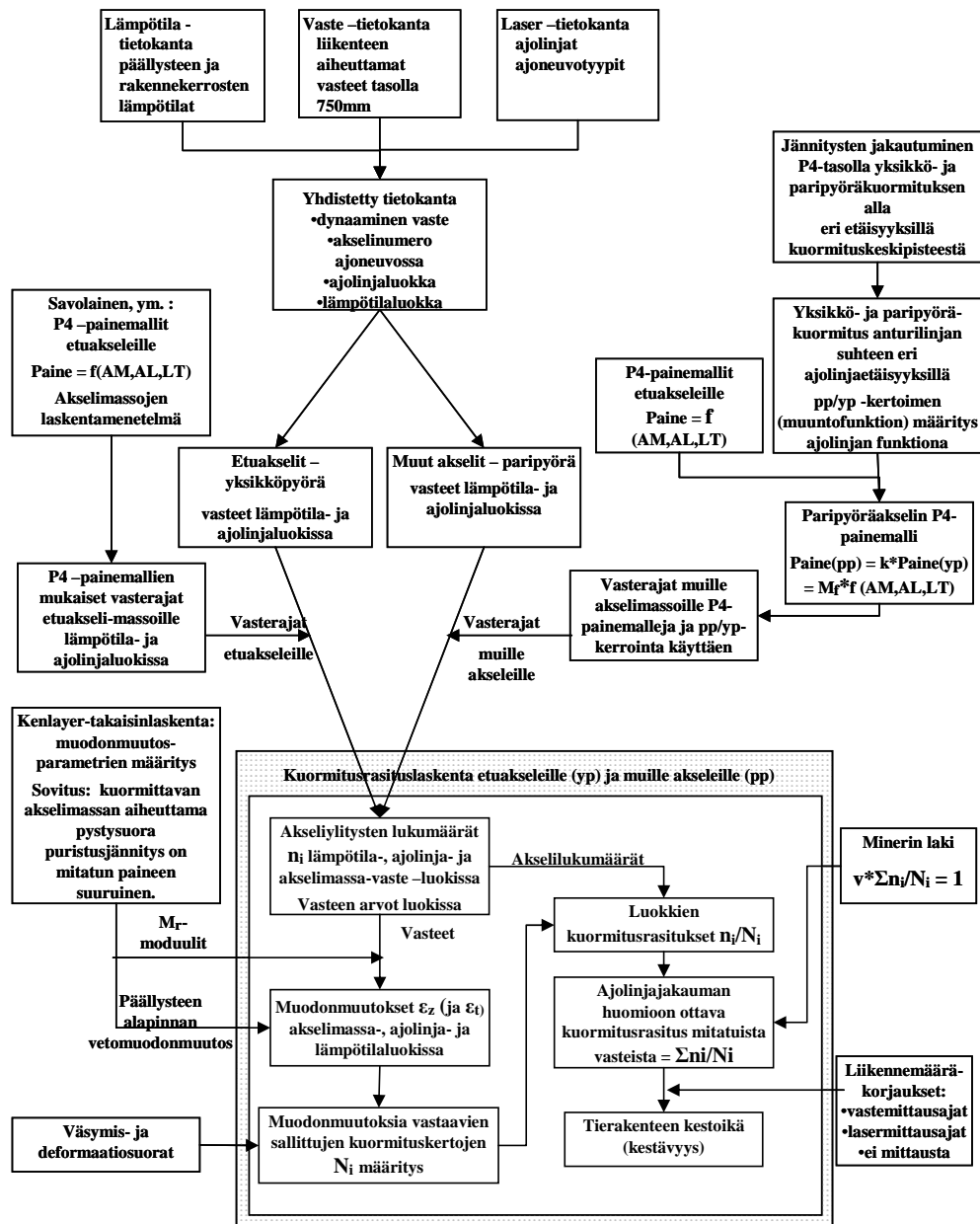
Sitomattomien materiaalien pysyvät muodonmuutosominaisuudet vaihtelevat huomattavasti ja ominaisuuksien määrittäminen laboratorio-oloissa on työlästä sekä kallista. Näistä syistä olisi tarpeen kehittää menettely, millä voitaisiin luokitella sitomattomia materiaaleja pysyvien muodonmuutosten suhteen tai ainakin tunnistaa ongelmalliset materiaalit. Pitkän tähtäimen tavoitteena voisi olla menettely, missä kimmoisten vasteiden lisäksi olisi mukana jokin materiaalin pysyviä muodonmuutosominaisuuksia kuvaava tekijä, arvioitaessa pysyvien muodonmuutosten kehittymistä.

Kosteus vaikuttaa merkittävästi sitomattomien materiaalien pysyviin ominaisuuksiin, mistä syystä ideaalitapauksessa olisi käytettävissä menettely, millä voitaisiin helposti määrittää tierakenteen kosteusolot. Tähän ei ole mahdollista päästä ainakaan lähitulevaisuudessa, koska jo perustietämys esim. kosteuden vuodenaikaisvaihtelusta tierakenteessa on hyvin puutteellista puhumattakaan materiaaliominaisuuksien merkityksestä kosteusvaihteluun.

Liikennekuormituksen määrittäminen

Tarkasteltavien turmeltumisilmiöiden kannalta liikennekuormitus on tärkein rasitustekijä. Instrumentoiduilla kohteilla voidaan määrittää periaatteessa kaikkien (raskaiden) ajoneuvojen ajotapa ja rasitukset sekä lämpötila- ja kosteusolosuhteet samanaikaisesti, mikä mahdollistaa periaatteessa vasteisiin perustuvan menettelyn liikenteen tierakenteisiin aiheuttaman kuormituksen määrittämisessä. Vasteisiin perustuva menettely olisi selvä edistysaskel nykyiseen vastaavuuskerroinmenettelyyn verrattuna. Temmeksen instrumentoidulla koekohteella on tehty alustavia laskelmia kuvan 10 mukaisella menettelyllä liikennekuormituksen arvioimiseksi vasteiden avulla ottaen huomioon ajoneuvojen ajolinjat ja päällysteen lämpötila.

Ajolinjajakauman ja lämpötilan vaikutus kuormituskestävyyteen – menettely vasteista määrittäessä



Kuva 10. Menettelytapaluonnos liikennekuormituksen määrittämisestä mitattujen vasteiden avulla [Joensuu, 2004].

7.3 Mittaustekniikkaan liittyvä tutkimustarve

Kimmoiset muodonmuutokset

Kenttäoloissa päällysteen vetomuodonmuutosten suora määrittäminen on osoittautunut ongelmalliseksi mm. seuraavista syistä:

- Venymäliuskojen asentaminen on vaativa tehtävä

- Venymäliuskojen kestävyys on puutteellista
- Ajolinjat vaikuttavat merkittävästi tuloksiin (kontrolloitava)

Sidottujen kerrosten jäykkyyden ja pienen kerrospaksuuden takia päällysteen (pienen) kimmoisen kokoonpuristumisen mittaaminen tiellä on mittausteknisesti myös vaativa tehtävä. Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen kimmoisten kokoonpuristumisten määrittämistä hankaloittavat usein materiaalin karkeus tai epähomogeenisuus. Kimmoisten muodonmuutosten kuten muidenkin mittausten tekeminen tierakenteen sisältä edellyttää antureiden huolellista asentamista, jotta anturit mittaisivat luotettavasti nimenomaan rakenteen toimintaa. Tällöin edellytetään, että anturit pysyvät oikeassa asennossa ja kiinnittyvät pysyvästi välyksittä rakenteeseen.

Sidottujen ja sitomattomien kerrosten pysyvät muodonmuutokset

Kenttäoloissa tien pinnan urautuminen on helppo määrittää. Päällysteen deformaation kannalta ongelmina ovat kulumisen ja pysyvien muodonmuutosten erottaminen toisistaan sekä muiden kerrosten kuin päällysteen pysyvien muodonmuutosten huomiointi. Vuodessa tapahtuva kulumisen, mikä aiheutuu pääosin nastarenkaista, määritetään yleensä syksyllä ja seuraavana keväänä tehtyjen pintamittausten erotuksena. Talvella pysyvien muodonmuutosten syntyminen on vähäistä, mistä syystä menetelmä on varsin luotettava.

Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen pysyvien muodonmuutosten erottaminen päällysteen deformaatiosta on selvästi kulumista haastavampi tehtävä. Tiellä pysyvät muodonmuutokset syntyvät pitkän ajan kuluessa, mikä edellyttää, että myös mittausjärjestelmät toimivat vuosia.

Päällysteiden deformaatiosta ja kulumista on selvitetty jo pitkään pyörrevirtatekniikalla, mikä edellyttää, että asennetaan heijastavia levyjä/kalvoja halutulle syvyydelle tierakenteeseen. Yleensä käytetty mittaussyvyys on ollut pieni. Jos halutaan käyttää pyörrevirtatekniikkaa paksujen päällysteiden ja muiden päällysrakennekerrosten pysyvien muodonmuutosten määrittämiseen, tulee selvittää kontrolloiduissa oloissa, kuinka syvältä menetelmällä on mahdollista mitata ja millä tarkkuudella sekä mikä on toistettavuus.

Sähköisesti toimivilta mittausmenetelmiltä edellytetään puolestaan pitkäaikaista mekaanista kestävyyttä (anturit, johdotus, liitokset). Mahdollisuuksien mukaan tulisi pyrkiä mittaamaan mahdollisimman suoraan pysyviä siirtymiä kuten esim. potentiometreillä.

Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen pysyvien muodonmuutosten määrittäminen valmiista tierakenteesta on haastava tehtävä. Tällä hetkellä ei ole olemassa tarkkaa ja luotettavaa menetelmää käytettävissä. Tästä huolimatta tulisi kuitenkin pyrkiä määrittämään myös kenttäoloissa eri kerrosten pysyvät muodonmuutokset, koska ne muodostaisivat tässä suhteessa pohjan ennustettaessa koko tierakenteen urautumista.

Tierakenteen lämpötilat

Tierakenteen lämpötilojen mittaaminen on mittausteknisesti hallinnassa (esim. Termeksen instrumentoitu koetie). Pt100-antureiden lisäksi on olemassa mikroelektronikkaa sisältäviä antureita, jotka eivät tarvitse erillistä signaalinkäsittelyä, ovat luonnollisel-

ta kohinaltaan pieniä ja tunteettomia kaapelipituudelle tai kaapelin lämpötilalle. Lisäksi anturit ovat huomattavasti halvempia kuin Pt100-anturit.

Lämpötilatiedon hyödyntämisen kannalta tulosten mallintaminen on välttämätöntä sekä sidottujen kerrosten lämpötilan että tierakenteen routaantumisen ja sulamisen kannalta. Tierakenteen lämpötilajakaantumisen tarkka selvittäminen edellyttää lukuisia antureita. Toisaalta lämpötilamuutokset ovat suhteellisen hitaita myös päällysteessä, missä muutokset ovat muuta tierakennettä nopeampia. Käytännössä riittänee lämpötilojen tallennus esim. 15 min välein.

Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen kosteudet

Tierakenteen sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen kosteuksia eikä varsinkaan niiden vaihtelua juuri tunneta. Mittausteknisesti kosteuden määrittäminen ainetta rikkomattomilla menetelmillä on erityisesti karkeilla materiaaleilla ongelmallista. Todennäköisesti kosteuksia joudutaan mittaamaan välillisesti materiaalien sähköisten ominaisuuksien avulla. Tällöin etukäteen jouduttanee määrittämään käytettävän materiaalin kosteuden ja sähköisen ominaisuuden välinen yhteys.

Percoaseman tyyppisillä mittausjärjestelmillä pystytään kosteuspitoisuus ja sen muutokset määrittämään dielektrisyiden ja sähkönjohtavuuden perusteella. Tämän lisäksi tulisi selvittää myös muun tyyppisten materiaalien sähköisiin ominaisuuksiin perustuviin menetelmien käyttöä.

Yhtenä selvitettävänä asiana on määrittää, mistä kosteus on peräisin (ylhäältä, alhaalta vai sivulta). Kosteustietojen hyödyntäminen edellyttää myös tulosten mallintamista.

Anturien valintaperiaatteet

Anturien valinnan lähtökohtina ovat mm. seuraavat tekijät:

- Pitkäaikaiset jatkuvat mittaukset
- Laskentamenetelmien edellyttämät vaste-, ajotapa- ja olosuhdetekijät
- Automaattinen tiedon keruu ja anturien sähköisesti tuottama digitaalinen data

Anturien yleisiä vaatimuksia ovat mm.:

- Anturien tuottaman datan on kuvattava fysikaalista ilmiötä ja sen vaihteluita riittävän tarkasti
- Mahdollisimman suora fysikaalisen ilmiön ja lopputuloksen välinen yhteys
- Pystyttävä verifioimaan laboratorio-oloissa ennen tiehen asentamista
- Perinteisesti anturit tuottavat pistekohtaista tietoa, vaikka tarve olisi 3D-tieto. Joka tapauksessa tarvitaan tarkkoja pistekohtaisia mittauksia mm. jatkuvien mitausten kalibrointiin.

Anturien yksityiskohtaisina vaatimuksina ovat mm.:

- Anturin toiminta-alueen soveltuvuus määrää suurelta osin anturin tulosten käyttömahdollisuudet
- Fyysinen kestävyys (mahdollinen anturin kapselointi on otettava huomioon)
- Riittävä tarkkuus
- Helppo asentaa mittaamaan haluttua ilmiötä oikeassa paikassa
- Kalibroituavuus
- Edullinen hinta (mahdollinen anturin kapselointi on otettava huomioon)
- Soveltuu helposti mittausjärjestelmään. Parhaimmillaan ei tarvita lainkaan erillisiä signaalin käsittelymoduuleita (laskee kustannuksia).
- Suositetaan vähän virtaa edellyttäviä ja samaa käyttöjännitettä käyttäviä antureita
- Mahdollisuuksien mukaan MEMS-tyyppisiä antureita, joilla on laajahko käyttöjännitealue (6 – 30 V) ja suurehko tulojännite (esim. 0 – 5 V) sekä riippumattomuus kaapelin resistanssin muutoksista (pituus, lämpötila)
- Mielellään differentiaalimittaukseen soveltuva (sietää ympäristön aiheuttamia kohinähäiriöitä) sekä käytetään yhdessä kierrettyparikaapeloinnin kanssa. Lisäksi kaapelijatkoksia tulisi välttää.
- Helposti kaapeloitavissa
- Lisäksi kannattaisi selvittää antureiden yhdistämisen mahdollisuudet (yksittäisten mittauspisteiden vähentäminen ja kaapeloinnin helpottuminen)

Kaikkia edellä mainittuja asioita ei pystytä yhtä aikaa ottamaan huomioon.

Mitattavat asiat ja mittausten luonne

Mitattavat asiat voidaan jakaa vaste-, pysyviin muodonmuutos-, olosuhde- ja liikenne-mittauksiin.

Vasteet (jatkuvat nopeat mittaukset)

- Päälysteen alapinnan vetomuodonmuutos pituus- ja poikkisuunnassa (olisi tarpeellista, mutta käytännössä saattaa olla ongelmallista)
- Päälysteen samoin kuin muiden kerrosten kimmoisten kokoonpuristumien suora mittaaminen olisi tarpeellista (moduulit, lämpötila- ja jännitystilariippuvuus)
- Eri kerroksissa vallitsevat pystysuorat jännitykset (paineet) sekä resurssien puitteissa myös vaakasuuntaisia jännityksiä

Pysyvät muodonmuutokset (määräajoin tehtävät mittaukset)

- Kerrosten kokoonpuristumat
- Tien pinnan urautuminen (päälysteen kulumisen huomioon ottaminen)
- Sivusiirtymät

Olosuhteet (jatkuvat hitaat mittaukset)

- Eri kerrosten ja ilman lämpötilat (vrt. Temmes)
- Sitomattomien kerrosten (ja alusrakenteen) kosteudet
- Pohjaveden pinnan korkeus (vrt. Temmes)
- Muut

Liikenne (jatkuvat nopeat mittaukset)

- Ajoneuvo- ja ajotapamittaukset (vrt. Temmes)
- Visuaalinen tapauskohtainen havainnointi kameralla (esim. ajoneuvon akselitorakenteen ja kuormausasteen arviointi)

Mitattavia asioita on paljon, mistä syystä kullakin koalueella tulee tarkoin harkita, mitä mittauksia ja missä laajuudessa mittauksia tarvitaan. Koekohteiden rakenteiden erojen takia lienee myös tarkoituksenmukaista räätälöidä kullekin koalueella oma mittausjärjestelmä.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Arnold, G., Dawson, A., Hughes, D., Robinson, D. 2004. Deformation Behaviour of Granular Pavements. Proceedings, 6th International Symposium on Pavements Unbound, Nottingham, England, UK.

Belt, J., Lämsä, V.P., Ehrola, E. 2000. Sitomattoman kantavan kerroksen muodonmuutokset. Tiehallinnon selvityksiä 60/2000. Tiehallinto, Helsinki.

Belt, J., Lämsä, V.P., Liimatta, L., Ehrola, E. 2000. Kevytpäällysteteiden vauriomallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet. Tielaitoksen selvityksiä 18/2000. Helsinki.

Belt, J., Lämsä, V.P., Savolainen, M., Ehrola, E. 2002. Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto. Tiehallinnon selvityksiä 15/2002. Helsinki.

Brecciaroli, F., Kolisoja, P. 2006. Resilient and permanent deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading. Literature review. Publications of Finnish Rail Administration A x/2006.

Celauro, C. 2005 Influence of the Hourly Variation of Temperature on the Estimation of Fatigue Damage and Rutting in Flexible Pavement Design. The International Journal of Pavement Engineering.

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. Helsinki.

Federal Highway Administration. 1995. Pavement Analysis and Design Checks. NHI Course No. 13130. Publication No. FHWA-HI-95-021.

Gidel, G, Hornych, P.; Chauvin, J.J., Breyse, D., Denis, A. 2001. Nouvelle Approche pour l'Étude de Déformations Permanentes des Graves non Traitées à l'Appareil Triaxial à Chargement Répétés. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, No. 233.

Huang, Y.H. 1993. Pavement Analysis and Design. Prentive-Hall, Inc.

Huhtala, M., Kurki, T., Orama, R., Pihlajamäki, J., Ruotoistenmäki, A. 1993. Väsymis-suorat tierakenteen mitoitusta varten. Tielaitoksen selvityksiä 47/1993. Helsinki.

Huurman, M. 1997. Permanent Deformation in Concrete Block Pavements. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Joensuu, L. 2004. Temmeksen koetien kuormituskestävyys. Diplomityö. Espoo.

Kolisoja P. 1998. Large scale dynamic triaxial tests for Arbeidsfelleskapet KPG, Results of the permanent deformation tests. Kvalitet av pukk- och grusindustriens produkter, delprosjektrapport 20.

Laaksonen R., Kivikoski, H., Pienimöki, M., Korkiala-Tanttu, L., Törnqvist, J. 2005. Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa. Deformaation laskentatyökalun kehittäminen. Tiehallinnon selvityksiä 57/2004. Helsinki.

Lekarp, F. 1997. Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials. Licentiate Thesis. Kungliga Tekniska Högskolan.

Liimatta, L., Ehrola, E. 1999. Analyttisessä mitoituksessa käytettävät asfalttipäällysteen jäykkyydet ja väsymismallit. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 50/1999. Helsinki.

Myre, J., 1993. Fatigue Cracking. Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 22.

OECD. 1988. Heavy Trucks, Climate and Pavement Damage. Report prepared by an OECD scientific experts group. Road Transport Research. Paris.

PIARC 1995. Bituminous Materials With A High Resistance To Flow Rutting. PIARC Technical committees on Flexible and concrete roads. Paris.

Roadex II 2005. Roadex II –project 2003 – 2005, Focusing on Low Volume Roads in the Northern Periphery. Saatavilla: www.roadex.org

Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N., Ylitapio, S. 2001. Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet. Tiehallinnon selvityksiä 9/2001. Helsinki.

Spoof, H. 1992. Asfaltin väsyminen. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma ASTO 1987-1992. VTT, Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio n:o 74. Espoo.

Spoof, H., Pihlajamäki, J. 2001. Kuormituskestävyyksimitoitus – Päällysrakenteen väsyminen. TPPT menetelmäkuvaus 17. Espoo.

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

Veverka, V. 1979. Raming Van de Spoordiepte Bij Wagen met een Bitumineuze Verharding. De Wegentechniek, Vol. XXIV, No. 3.

Zhou F. et al. 2004. Verification and Modeling of Three-Stage Permanent Deformation Behavior of Asphalt Mixes. Journal of Transportation Engineering. ASCE 0733-947X.

OULUN YLIOPISTON RAKENTAMISTEKNOLOGIAN TUTKIMUSRYHMÄN JULKAISUJA

1. Rantsi, Tuomas & Aho, Timo:
Käyttäjän kiinteistön hallinta –INSIDE™. 2002.
2. Belt, J., Kolisoja, P., Alatyppö, V., Valtonen, J.:
Tierakenteen rappeutuminen ja kunnan ennustaminen. 2006.

ISSN 1458-8293 (Elektroninen julkaisu)

ISBN 951-42-8052-0 (Elektroninen julkaisu)