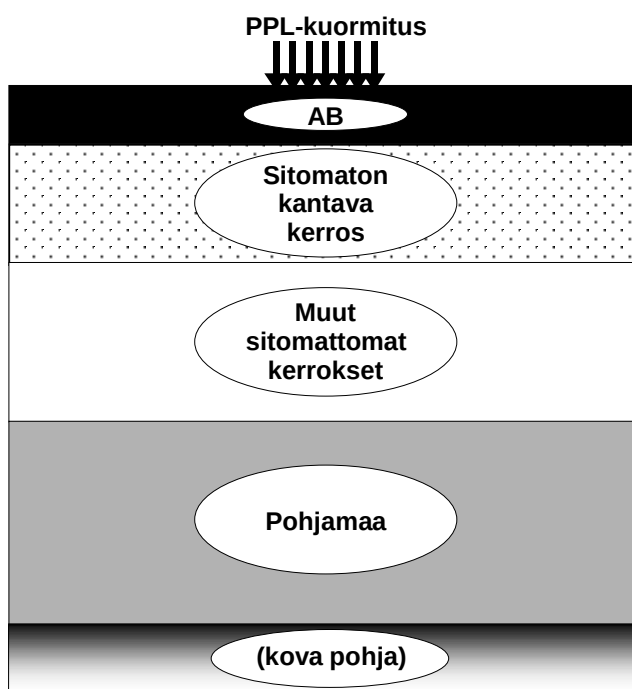


RAKENNEKERROSMODUULIEN TAKAISINLASKENTA SEKÄ JÄNNITYSTEN JA MUODON- MUUTOSTEN LASKENTA



Harri Spoof
Sami Petäjä

VTT Yhdyskuntatekniikka

Alkusanat

Tien pohja- ja päällysrakenteet –tutkimusohjelman (TPPT) lopputulosten tavoitteena on entistä kestävämpien uusien ja perusparannettavien kestopäällystettyjen teiden rakentaminen siten, että myös rakenteiden vuosikustannukset alenevat. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi on tärkeää, että tierakenteet suunnitellaan paikallisiin olosuhteisiin. Suunnittelussa käytetään hyväksi paikallisten olosuhteiden suomat mahdollisuudet ja otetaan huomioon olosuhteiden asettamat rajoitukset.

TPPT-ohjelmassa kehitetään tierakenteiden mitoitusta (TPPT-suunnittelujärjestelmä). Suunnittelujärjestelmässä esitetään ne menettelytavat ja keinot, joita käyttäen tie-rakenne voidaan kohdekohtaisesti suunnitella ja mitoittaa. Ohjelman tuloksena laaditaan myös yhteenveto ohjelmaan sisältyneistä koerakenteista sekä yhteenveto materiaaaliteknisestä kehityksestä.

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

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

Tämän ”Pudotuspainolaitemittaus” menetelmäkuvauksen ovat laatineet Harri Spoof ja Sami Petäjä VTT Yhdyskuntatekniikasta. Alkuperäisversion laadintaan on VTT:llä olleessaan osallistunut myös Antti Ruotoistenmäki (nykyisin Inframan Oy). Menetelmäkuvauksen sisältö on käyty läpi yhdessä tielaitoksen asiantuntijoiden kanssa.

SISÄLLYSLUETTELO

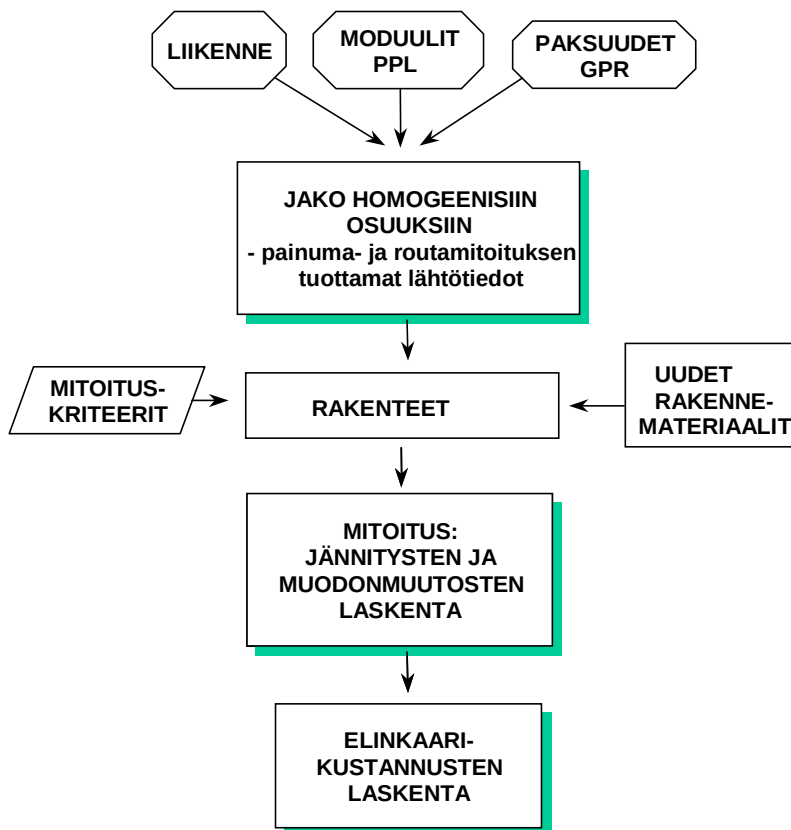
1	JOHDANTO	4
2	JAKO HOMOGEENISIIN OSUUKSIIN	6
3	RAKENNEKERROSMODUULIEN TAKAISINLASKENTA	8
3.1	Takaisinlaskennan periaate	8
3.2	Takaisinlaskennan lähtötiedot	9
3.2.1	Rakennekerrokset	9
3.2.2	Materiaalit	10
3.2.3	Poissonin luku	11
3.2.4	Kuorma	11
3.2.5	Mitatut taipumat	11
3.3	Päällysteen jäykkyysmoduulin lämpötilakorjaus	11
3.4	Takaisinlaskennan tulokset	12
4	JÄNNITYSTEN JA MUODONMUUTOSTEN LASKENTA	12
5	TULOSTEN RAPORTOINTI	16
6	KIRJALLISUUS	16

1 JOHDANTO

Tien rakenteen ja sen eri kerrosten materiaalien käyttäytymistä liikennekuormituksen alaisena kuvaa tien pinnan pystysuora siirtymä (taipuma). Rakennetutkimuksissa liikennekuormitusta simuloidaan pudotuspainolaitteella (PPL). Pudotuspainolaittekoeksessa mitataan tien pinnan taipuma, joka tapahtuu tien pintaan kohdistuva voiman johdosta. Taipuma mitataan yleensä kuormituslevyn alla sekä usealla eri etäisyydellä kuormituslevystä, jolloin saadaan mitattua ns. taipumasuppilo. Pudotuspainolaittekoeksessa mitattu taipumasuppilo kuvaa tien kuormituskestävyyttä, ts. tierakenteen kykyä kestää toistuvia liikennekuormituksia. Taipumasuppilon muodon perusteella voidaan arvioida tien rakennekerrosten ominaisuuksia. Ns. takaisinlaskentaohjelmilla voidaan laskea pudotuspainolaittekoeksessa mitatusta taipumasuppilosta tien rakennekerrosten muodonmuutosmoduulit.

TPPT -suunnittelujärjestelmässä pudotuspainolaitetta käytetään vanhan rakenteen tilan määrittämiseen. Mittaustuloksista lasketaan rakennekerrosten moduulit, jotka tarvitaan analyttisessä mitoitusmenetelmässä.

TPPT-suunnittelujärjestelmän kuormituskestävyyssitoitusta on havainnollistettu kuvassa 1. Parannettavan rakenteen mitoituksen lähtötietoina tarvitaan olemassa olevien rakennekerrosten moduulit ja paksuudet. Paksuudet tarvitaan lähtötietoina myös moduulien takaisinlaskennassa. Niiden määrittämistä käsitellään TPPT-menetelmäkuvaussessa ”Tien rakennekerrospaksuuksien määrittäminen ja rakennekerrostutkimukset”. Lisäksi mitoituksen lähtötietona tarvitaan tieto tiehen viimeisen rakenteellisen kunnostustoimenpiteen jälkeen kohdistuneesta liikennekuormituksesta sekä nykyisestä ja ennakoitavasta tulevasta liikennekuormituksesta.

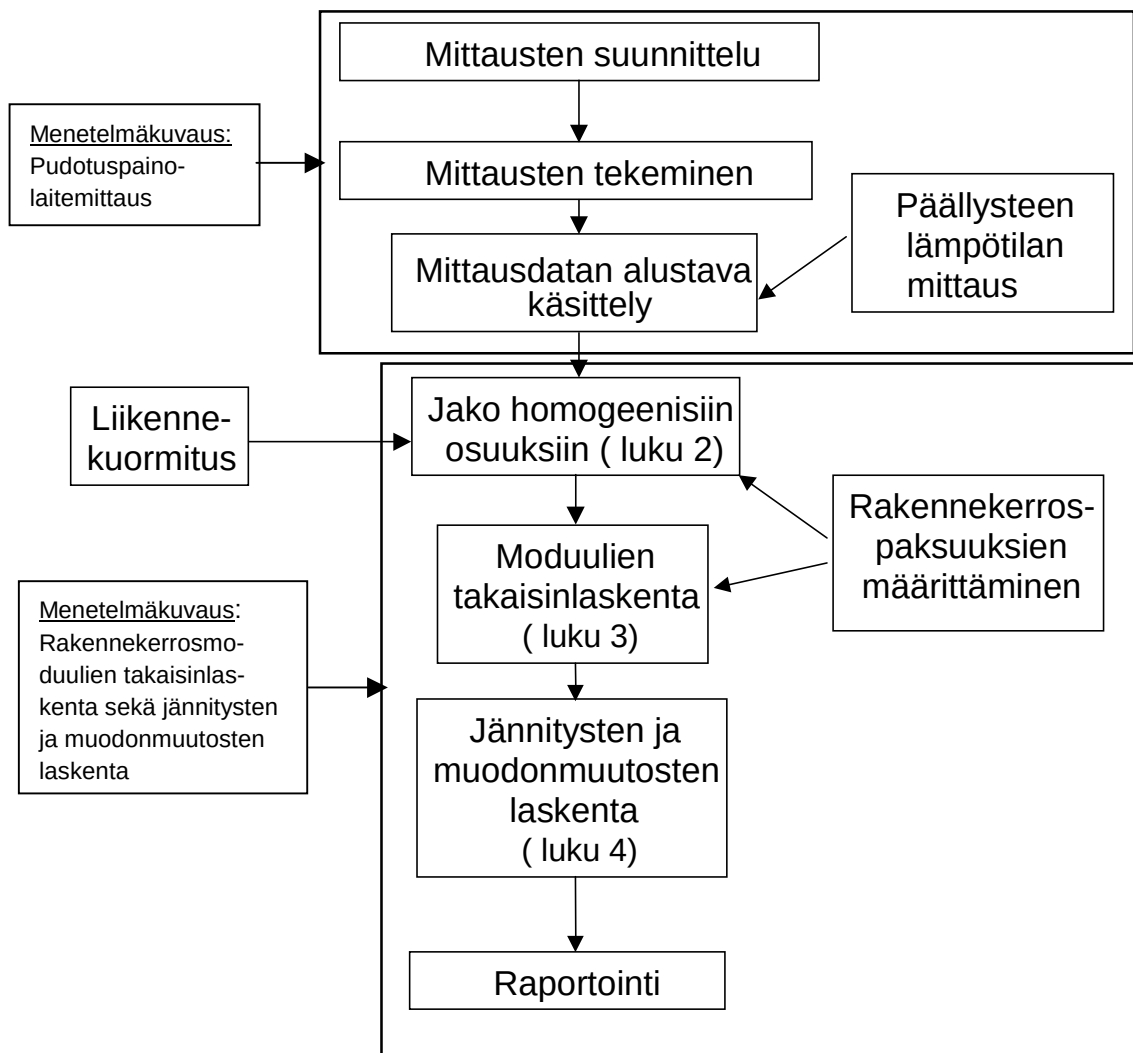


Kuva 1. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuormituskestävyyssitoitus.

Kohde jaetaan kuormituskestävyysmitoitusta varten painuma- ja routamitoituksen sekä mitattujen lähtötietojen perusteella homogeenisiin osuuksiin. Kullekin homogeeniselle osuudelle mitoitetaan vaihtoehtoiset rakenneratkaisut ja tehdään elinkaari-kustannusten arviointi. Mitoituskriteerejä ovat mm. rakennevaihtoehtojen tekninen soveltuvuus sekä tierakenteeseen mitoitusaikana kohdistuva kuormituskertaluku.

Pohjamaan ja rakenteeseen jäävien kerrosten moduulit määritetään takaisinlaskennalla ja uusien kerrosten moduulit selvitetään yleensä laboratoriossa. Moduulien laskeminen tässä menetelmäkuvauksessa perustuu lineaariseen monikerrosteoriaan.

Pudotuspainolaitekoetta on havainnollistettu kuvassa 2, jossa on esitetty myös viittaukset tämän menetelmäkuvauksen lukuihin, joissa ko. asiaa käsitellään. Mittausten suunnittelu, tekeminen ja mittausdatan alustava käsittely on esitetty TPPT-menetelmäkuvauksessa "Pudotuspainolaitemittaus".



Kuva 2. Pudotuspainomittausten suunnittelu, mittaukset ja tulosten käsittely.

2 JAKO HOMOGEENISIIN OSUUKSIIN

Rakennesuunnittelua varten suunniteltava tielinja jaetaan homogeenisiin osiin liikennesuunnittelun (vuosittainen kuormituskertaluku) sekä pohjamaan ja rakennekerrosten moduulien perusteella. Painumamitoitus ja routanousumitoitus tuottavat perusrakennerratkaisut, jotka mitoitetaan liikennekuormitukselle. Jako homogeenisiin osuuksiin voidaan tehdä ja sitä voidaan tarkistaa seuraavissa suunnitteluvaiheissa:

- mittauksia suunniteltaessa
- mittausten esikäsittelyssä
- moduulien laskennan jälkeen.

Kuvassa 3 on esitetty pudotuspainolaitteella mitattu maksimitaipuma kuormituslevyn alla eräällä koeosuudella. Jako homogeenisiin osuuksiin voidaan tehdä muuttujien silmämääräisen tarkastelun perusteella (kuvaajat kustakin muuttujasta vs. paalulukema).

Homogeenisten osuuksien määrittelyssä voidaan käyttää kumulatiivisen erotuksen menetelmää, jota on havainnollistettu kuvassa 4. Kumulatiivista erotusta kuvaava muuttuja Z_x määritellään kaavoilla (1)

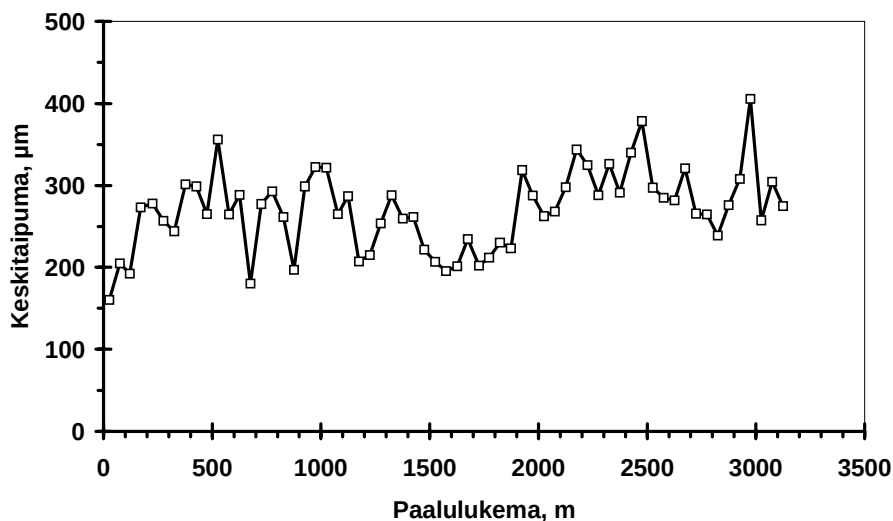
$$S_1 = x_1 - x_m$$

$$S_2 = x_2 - x_m + S_1 \quad (1)$$

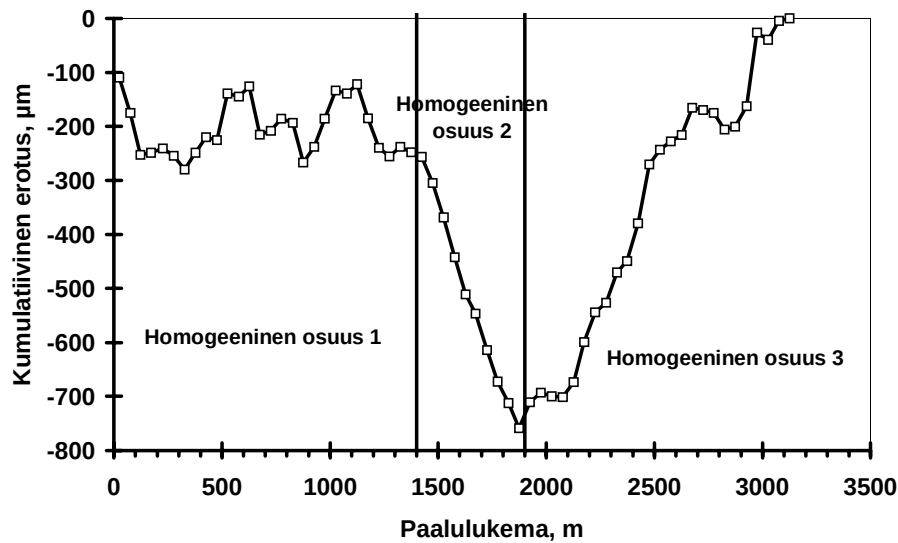
$$S_i = x_i - x_m + S_{i-1}$$

missä x_i on pisteessä i mitattu suureen arvo
 x_m suureen keskimääräinen arvo osuudella
 S_i erotusten kumulatiivinen summa pisteessä i

Kuvassa 4 on esitetty muuttujan Z_x kuvaaja koeosuudella. Kohdassa, jossa muuttujan Z_x kuvaajan kulmakerroin muuttuu, on homogeeninen osuuden rajakohta vaihtuu (mitattu suure muuttuu merkittävästi). Kuvasta nähdään, että koeosuus jakautuu mitatun taipuman perusteella kolmeen homogeeniseen osuuteen. Niistä viimeisessä mitatun taipuma on selvästi pienempi kuin kahdessa ensimmäisessä.

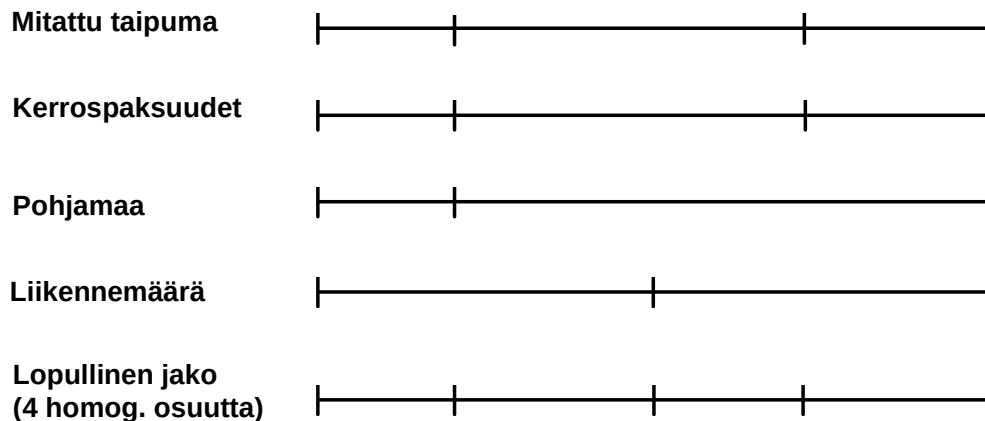


Kuva 3. Pudotuspainolaitteella mitattu taipuma kuormituslevyn alla, esimerkki.



Kuva 4. Parannettavan tien jakaminen homogeenisiin osuuksiin kumulatiivisen erotuksen periaatteella.

Kuvassa 5 on esitetty periaatekuva tarkasteltavan tien jakamisesta homogeenisiin osuuksiin. Mitatun taipuman perusteella tehty jako vastaa kerrospaksuuksien perusteella tehtyä jako. Myös pohjamaan muutoskohta osuu muilla perusteilla tehtyyn jakoon. Liikennemäärä muuttuu näistä riippumatta. Kohde jaetaan tässä esimerkissä lopulta neljään homogeeniseen osuuteen, joille tehdään osuuskohtainen kuormituskestävyysmitoitus.



Kuva 5. Parannettavan tien jako homogeenisiin osuuksiin, esimerkki.

Jakoa homogeenisiin osuuksiin arvioidaan jaon perusteena olleiden muuttujien (taipumat, moduulit, rakennekerrospaksuudet) variaatiokertoimen perusteella. Variaatiokerroin (cv) lasketaan kaavalla (2)

$$cv = 100 \% * (\text{keskihajonta} / \text{keskiarvo}) \quad (2)$$

Osuuksien homogeenisuutta arvioidaan variaatiokertoimen perusteella seuraavasti:

- <20 % homogeeninen
- 20 .. 40 % melko homogeeninen
- > 40 % epähomogeeninen

Mikäli yhdistämällä kaksi peräkkäistä osuutta muuttujien variaatiokerroin $< 20 \%$, osuudet yhdistetään yleensä yhdeksi osuudeksi, ellei ole muita syitä erottaa niitä erillisiksi osuuksiksi. Mikäli variaatiokerroin vaihtelee välillä $20..40 \%$, jako tai yhdistäminen arvioidaan erikseen. Mikäli vaihtelu on $> 40 \%$, osuudet pidetään erillisinä.

Muodonmuutosmoduulien takaisinlaskentaan valitaan yhtä homogeenista osuutta kohden:

- ensisijaisesti kaikki mitatut lämpötilakorjaamattomat taipumasuppilot

Takaisinlaskentaan voidaan valita vaihtoehtoisesti myös

- mediaanisuppilo tai mieluiten todellinen mitattu suppilo, joka on lähinnä mitattujen taipumien mediaania
- todellinen mitattu suppilo, joka on lähinnä 'tilastollista' (esim. keskiarvo+1*keskihajonta) suppiloa

3 RAKENNEKERROSMODUULIEN TAKAISINLASKENTA

3.1 Takaisinlaskennan periaate

Moduulien takaisinlaskennan periaatteena on iteroida sellaiset kerrosten moduulit, jotka tuottavat saman laskennallisen taipumasuppilon kuin mitattu taipumasuppilo tietyllä kuormituksella. Eri takaisinlaskentaohjelmat perustuvat erilaisiin laskentamalleihin, esim. monikerrosteoriaan, elementtimenetelmään (FEM) tai Odemarkin vastinpaksuusmenetelmään. Tässä menetelmäkuvauksessa laskennoissa esitetään käytettäväksi monikerrosteoriaan perustuvia ohjelmia, joita ovat mm. Modulus, Modcomp3, Kenlayer, Bisar ja Apas. Niissä tehdään seuraavat oletukset:

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

Eri ohjelmat tarvitsevat rakennekerrosten ja pohjamaan moduulien lähtötietona yleensä joko alkuarvot, joista lähtien ohjelma iteroi vastauksen, tai moduulien ylä- ja alarajat, joista lähtien etsitään interpoloimalla sopivat moduulit rakennekerroksille. Usein ohjelmissa lasketaan mitatun ja lasketun taipuman erotus kunkin anturin kohdalla jomalla kummalla kaavoista (3) tai (4):

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|d_{l,i} - d_{m,i}|}{d_{m,i}} * 100\% \leq \text{vaadittu tarkkuus} \quad (3)$$

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{d_{l,i} - d_{m,i}}{d_{m,i}} \right]^2} * 100\% \leq \text{vaadittu tarkkuus} \quad (4)$$

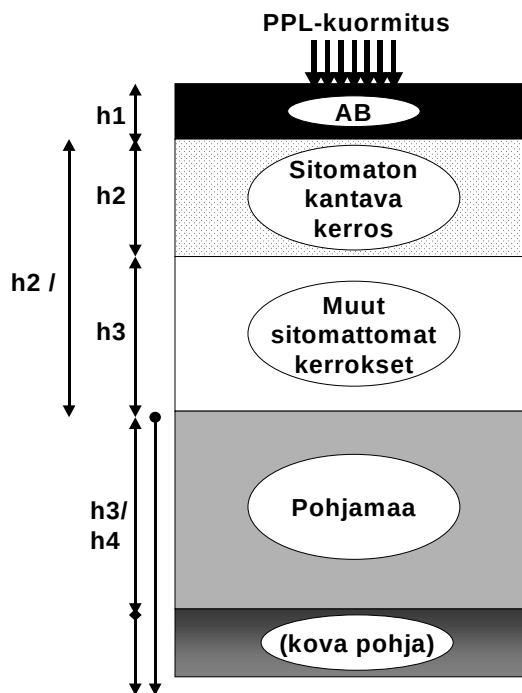
joissa $d_{l,i}$ on laskettu taipuma anturin i kohdalla
 $d_{m,i}$ mitattu taipuma anturin i kohdalla
 n anturien lukumäärä

Vaadittu tarkkuus ilmaistaan yleensä keskimääräisenä tarkkuutena / anturi (%). Vaadittu suhteellinen tarkkuus on yleensä 2 % (esim. iteroinnin lopettamiseksi ohjelmassa). Käytännössä esim. 4 % tarkkuus on usein riittävä.

3.2 Takaisinlaskennan lähtötiedot

3.2.1 Rakennekerrokset

Takaisinlaskentaa varten tierakenne jaetaan kerroksiin, jolloin käytetään hyväksi kaikki olemassaoleva tieto rakennekerrosten paksuuksista (maatutkamittaukset, suunnitelma- ja historiatiedot). Tierakenne mallinnetaan yleensä 3- tai 4-kerrosrakenteena, kuten kuvassa 6 on esitetty. Takaisinlaskennan tulosten luotettavuuden kannalta on suositeltavaa, että sitomattoman kerroksen minimipaksuus mallissa ei alita 200 mm. Erikoistapauksissa voidaan käyttää useampia kerroksia.



Kuva 6. Tierakenteen mallintaminen moduulien takaisinlaskentaa varten.

Mallintamisessa noudatetaan seuraavia periaatteita:

- Kaikki asfalttikerrokset (AB, ABK, SMA) yhdistetään yhdeksi kerrokseksi.
- Stabiloinnit ja komposiitit käsitellään omina kerroksinaan.
- Sitomaton kantava kerros käsitellään omana kerroksenaan (4-kerrosrakenne).

- Mikäli sitomattomien kerrosten ominaisuudet eivät merkittävästi poikkea toisistaan, ne voidaan yhdistää yhdeksi kerrokseksi (3-kerrosrakenne). Näin voidaan tehdä erityisesti silloin, kun nämä kerrokset ovat paksujen bitumilla sidottujen kerrosten alla.
- Mikäli bitumilla sidotun kerroksen moduuli saa laskennassa epärealistisia arvoja, sille annetaan vakioarvo. Näin tapahtuu yleensä, mikäli sidotun kerroksen paksuus on pienempi kuin puolet kuormituslevyn säteestä (75 mm). Ehjän asfaltti-päällysteeseen moduulina käytetään 3500 MN/m^2 $+20 \text{ °C}$ vertailulämpötilassa. Moduulia muutetaan tarvittaessa siten, että muiden kerrosten lasketut moduuliarvot ovat realistisia ja mitatut ja lasketut taipumat vastaavat mahdollisimman hyvin toisiinsa. Bitumilla sidotun kerroksen moduuli lämpötilakorjataan kohdassa 3.3 esitetyllä tavalla.
- Mikäli jonkin sitomattoman kerroksen moduuli saa laskennassa epärealistisia arvoja (esim. kerroksen pienen paksuuden takia), se voidaan yhdistää lähinnä samankaltaisen (sidotun tai sitomattoman) kerroksen kanssa tai sille annetaan vakioarvo, jonka suuruus riippuu mm. kerroksen jännitystilasta.
- Monissa laskentaohjelmissa voidaan määritellä ns. kova pohja halutulle syvyydelle, esim. 3..7 metriä. Arvo voi olla käyttäjän antama tai ohjelman laskema. Näin voidaan tehdä silloin kun peruskallio on lähellä maanpintaa. Samalla tavalla voidaan menetellä myös silloin, kun halutaan mallintaa sitä tilannetta, jossa pohjamaan kuormitettu yläosa on erilaisessa jännitystilassa ja sillä on erilainen moduuli kuin syvemmällä rakenteessa (pohjamaan jäykkyys kasvaa syvemmälle mentäessä). Näin mallintamalla saadaan pohjamaan ja rakennekerrosten moduuleille ja siten jännityksille ja muodonmuutoksille usein realistisempia arvoja kuin ilman kovan pohjan mukaanottoa. Kovalle pohjalle, joka siis on alimmainen kerros ja ulottuu äärettömän syväälle alaspäin, annetaan suuri moduuliarvo, esim. 5000 MN/m^2 .

3.2.2 Materiaalit

Rakennekerroksille tyypillisiä moduuliarvoja on esitetty taulukossa 1. Sitomattomien rakennekerrosten materiaalien moduuli riippuu niiden jännitystilasta, joka riippuu mm. kerroksen sijainnista rakenteessa. Mikäli rakennemateriaalien laboratoriokokeita ei ole käytettävissä, taulukon 1 avulla voidaan arvioida takaisinlaskennan tuloksena saatujen moduuliarvojen realistisuutta.

Taulukko.1. Tien rakennekerrosten tyypillisiä moduuliarvoja.

Materiaali	Moduuli [MN/m^2]
AB-päällyste	2000..7000
PAB-päällyste	500..2500
Bitumistabilointi (BEST, VBST)	300..2000
Bitumi-sementti komposiitti	2000..10000
Sementtistabilointi	1000..8000
Kantava kerros (murske)	200..700
Kantava kerros (sora)	150..400
Jakava kerros (murske)	100..300
Jakava kerros (sora)	50..200
Jakava kerros (hiekkä)	50..150
Pohjamaa (koheesioma)	5..100
Pohjamaa (kitkama)	20..200
Kallio	300..5000

3.2.3 Poissonin luku

Poissonin luku kuvaa materiaalin kokoonpuristumisominaisuutta ja vaihtelee välillä 0 – 0,5. Poissonin luku 0 tarkoittaa sitä, että materiaali painuu puristettaessa kasaan leviämättä sivuille. Poissonin luku 0,5 puolestaan tarkoittaa sitä, että materiaalin tilavuus ei puristettaessa muutu, vaan leviää sivuille kokoonpuristumista vastaavan määrän. Kaikille kerroksille käytetään Poissonin luvulle arvoa $\nu = 0,35$.

3.2.4 Kuorma

Laskennassa tarvitaan kutakin laskettavaa taipumasuppilaa vastaava maksimivoima. Mikäli taipumat on normalisoitu kuormituksen suhteen, käytetään tavoitevoimaa, johon taipumat on normalisoitu (yleensä 50 kN tai 707 kPa).

3.2.5 Mitatut taipumat

Jokaisesta laskettavasta taipumasuppilosta tarvitaan mitattujen taipumien maksimi-arvot. Ennen laskentaa taipumat on normalisoitava kuormituksen ja lämpötilan suhteen.

3.3 Päällysteen jäykkyysmoduulin lämpötilakorjaus

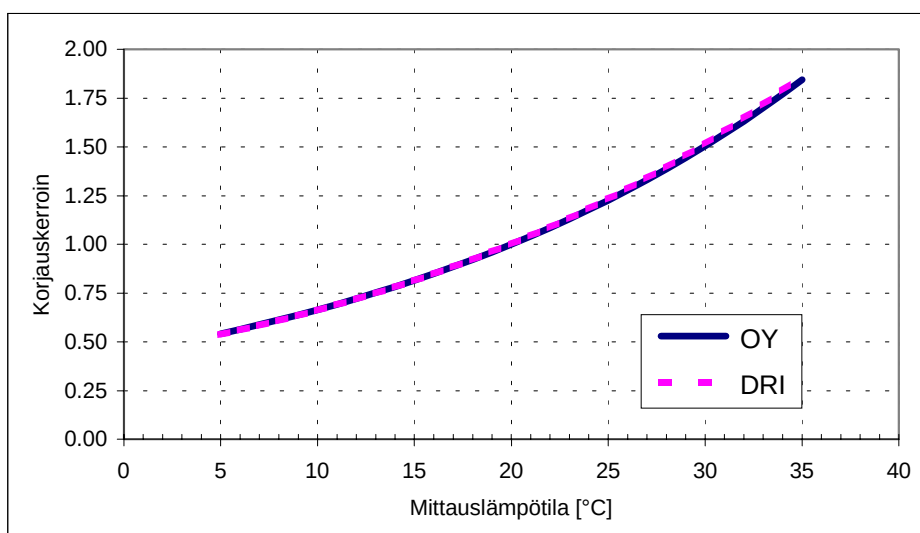
Bitumilla sidotun päällysteen jäykkyys riippuu merkittävästi lämpötilasta. Oulun yliopistossa tehtyjen tutkimusten (mm. Liimatta 1996) perusteella pudotuspainolaitteella mitatusta taipumasuppilosta takaisinlaskettu päällysteen jäykkyysmoduuli riippuu lämpötilasta kaavan (5) mukaisesti. Päällysteen jäykkyyden lämpötilakorjausmalli vastaa erittäin hyvin Tanskan tielaitoksen (DRI) käyttämää mallia (kaava 6). Mallien kuvaajat on esitetty kuvassa 7.

$$S_s = S_m * 0,96^{(T_s - T_m)} \quad (5)$$

$$S_s = S_m * 10^{-0,018 * (T_s - T_m)} \quad (6)$$

joissa S_s = päällysteen jäykkyys tarkastelulämpötilassa T_s [°C]
 S_m = päällysteen jäykkyys mittaustemperatuurissa T_m [°C]

Takaisinlaskennan tuloksena saatu päällysteen jäykkyysmoduuli korjataan kaavan (5) mukaisesti mittaustemperatuuriin + 20°C.



Kuva 7. Lämpötilan vaikutus taipumista takaisinlaskemalla saatuun päällysteen jäykkyyteen [Liimatta 1996].

Päällysteen jäykkyys vaikuttaa merkittävästi ylimmän sitomattoman kerroksen jännitystilaan ja siten myös sen muodonmuutosmoduuliin. Jännitystilan laskentaa ja sen muutoksen vaikutusta muodonmuutosmoduuliin on käsitelty kohdassa 4.

3.4 Takaisinlaskennan tulokset

Laskettujen moduuliarvojen realistisuutta voidaan verrata laboratoriokokeiden tuloksiin, mikäli kokeet on tehty. Yleisesti moduuliarvoja voidaan arvioida kokemukseen perustuen ja esim. taulukon 1 ja kuvan 9 avulla.

Jokaisessa laskentapisteessä tulostetaan vähintään seuraavat tiedot:

- paalulukema
- rakennekerrospaksuudet
- rakennekerrosten moduulit

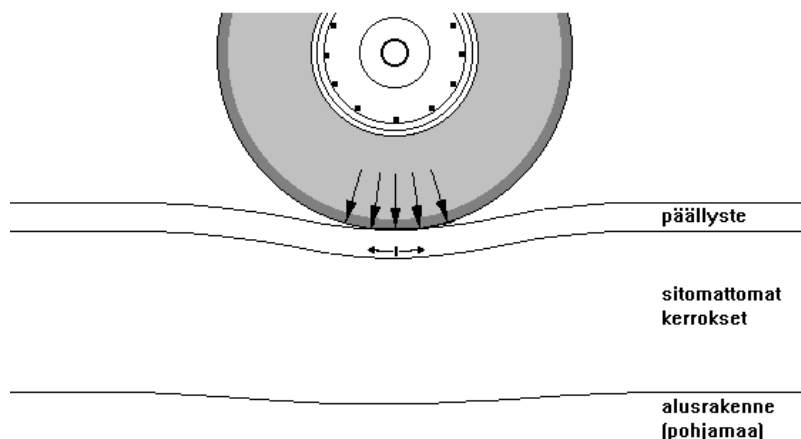
Koko osuudelta ja jokaiselta homogeeniselta osuudelta tulostetaan vähintään seuraavat tiedot:

- rakennekerrospaksuudet:
keskiarvo, mediaani, variaatiokerroin, pienin ja suurin arvo
- rakennekerrosten moduulit:
keskiarvo, mediaani, variaatiokerroin, pienin ja suurin arvo

4 JÄNNITYSTEN JA MUODONMUUTOSTEN LASKENTA

Tierakenteen jännitykset ja muodonmuutokset lasketaan samaan teoriaan perustuvalle ohjelmalla, kuin millä moduulien takaisinlaskenta on tehty. Tässä menetelmäkuvauksessa jännitykset ja muodonmuutokset lasketaan lineaarisella monikerros-ohjelmalla, jonka perusteet ja lähtöolettamukset on esitetty luvussa 3.

Rakenteen kuormituskestävyyssmitoitus perustuu päällysteen väsymisteoriaan, jossa päällysteen vaurioitumista selittää sen alapinnan vaakasuora vetomuodonmuutos (kuva 8). Yleensä lasketaan tien pituussuuntainen vetomuodonmuutos päällysteen alapinnassa. Tierakenne voi vaurioitua myös muilla tavoilla (esim. pohjamaa ja rakennekerrokset vaurioituvat ilmaston tai liikenteen ja ilmaston yhteisvaikutuksesta), mutta näitä ei ole kuvattu tässä yhteydessä. Rakenteiden jännitykset ja muodonmuutokset voidaan laskea myös rakenteen muissa kohdissa kuin päällysteen alapinnassa.



Kuva 8. Pyöräkuorman aiheuttama päällysteen alapinnan vetomuodonmuutos.

Muodonmuutosten laskennan lähtötietoina tarvitaan

- rakennekerrospaksuudet: käytetään samoja kerrospaksuuksia kuin moduulin takaisinlaskennassa, mukaanlukien mahdollinen kova pohja
- rakennekerrosten moduulit: saadaan takaisinlaskennasta, mukaanlukien mahdollinen kova pohja
- Poissonin luku (käytetään arvoa $\nu = 0,35$)
- kuormituksena käytetään pudotuspainolaitteen aiheuttamaa kuormitusta: ympyrämuotoinen kuorma 50 kN ja kuormitusalan säde 0,15 m
- laskentapisteiden (päällysteen alapinnan) koordinaatit

Laskennan tuloksena saadaan

- jännitykset, muodonmuutokset ja siirtymät laskentapisteissä (päällysteen alapinta)

Sitomattomien materiaalien jäykkyys riippuu niiden jännitystilasta ja -tasosta.

Rakennekerroksissa käytettävien karkearakeisten materiaalien moduuli on sitä suurempi, mitä suurempi niiden jännitystaso on.

Kokonaisjännitystaso rakenteen eri syvyyksissä lasketaan kaavalla (7)

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \text{kPa} \quad (7)$$

Tämän jälkeen rakennekerrosmateriaalien kimmomoduuria korjataan tarvittaessa uutta jännitystilaa vastaavaksi materiaalin jännitysriippuvuusominaisuuden mukaan (kaava 8). Korjatusta moduulista käytetään nimitystä ”jäännösmoduuli”

$$M_r = K_1 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^{K_2} \quad (8)$$

missä,

M_r on jäännösmoduuli, kPa

ϕ pääjännitysten summa, kPa ($=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$)

ϕ_0 vertailujännitys, 1 kPa

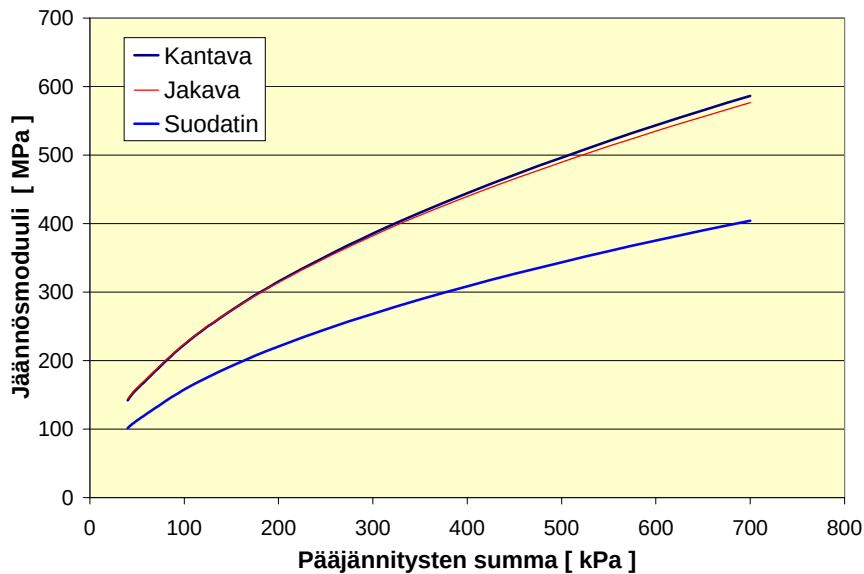
K_1, K_2 materiaaliparametrit

Kaikista rakennekerrosten mitoituksessa käytettävistä materiaaleista tulee tuntea niiden jännitysriippuvuus. Mikäli materiaalien jännitysriippuvuutta ei tunneta, voidaan materiaaliparametreille K_1 ja K_2 käyttää taulukossa 2 esitettyjä arvoja [Kolisoja 1996]:

Taulukko 2. Tierakenteen eri kerrosten materiaaliparametrit [Kolisoja 1996]

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

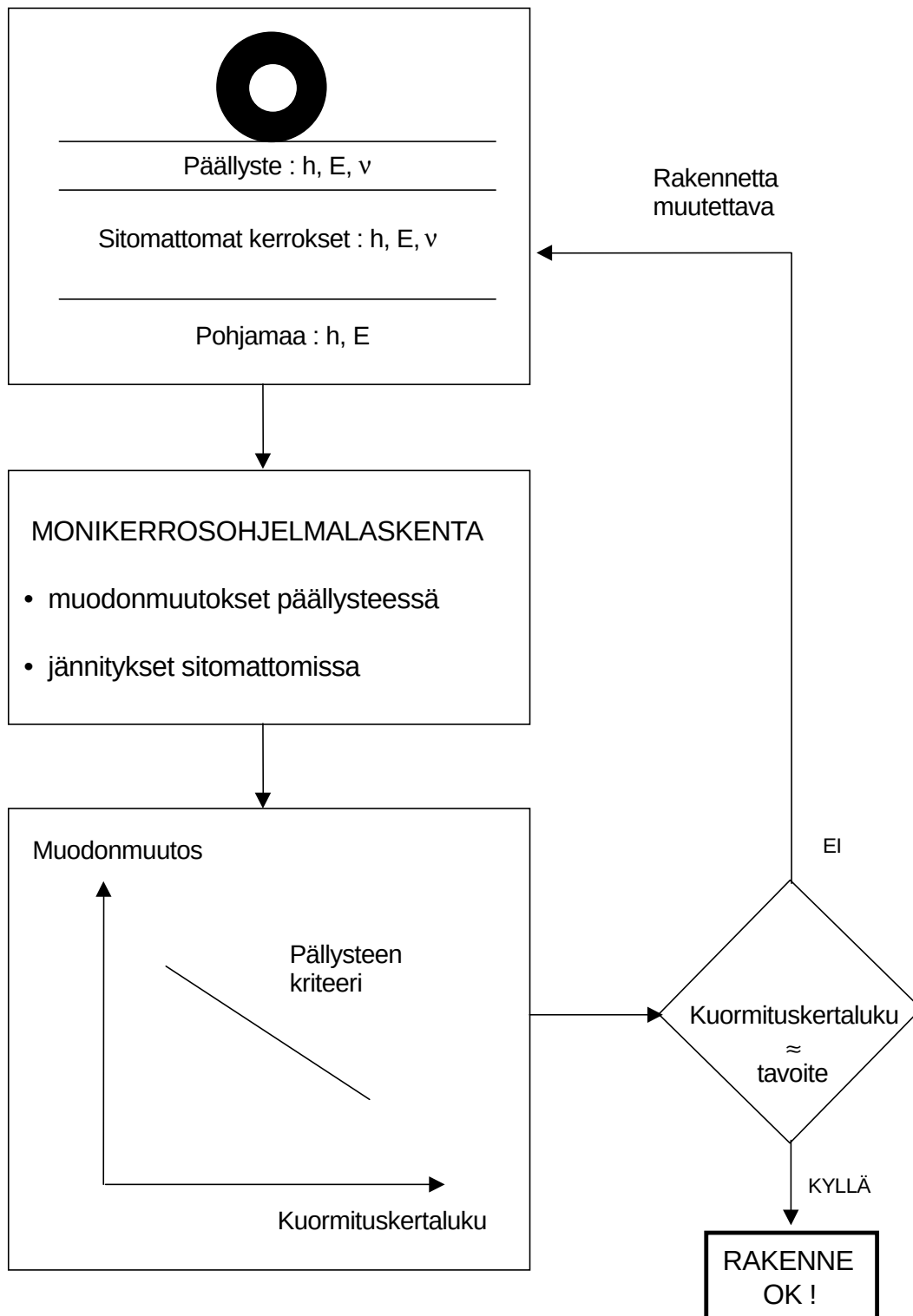
Kuvassa 9 on esitetty kuvaajana rakennekerroksessa vallitsevan kokonaisjännitystason ja jäännösmoduulin riippuvuus.



Kuva 9. Rakennekerroksessa vallitsevan kokonaisjännitystason ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) ja jäännösmoduulin riippuvuus [Belt 1997].

Mitoitettavalle rakenteelle lasketaan lineaaris-elastisella monikerrosohjelmalla standardikuormituksen aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset rakenteessa. Laskettujen muodonmuutosten ja päällysteen väsymiskriteerin perusteella määritetään sallittu kuormituskertaluku. Tätä kuormituskertalukua verrataan alussa laskettuun mitoitusjakson aikana syntyvään kuormituskertalukuun. Mikäli sallittu kuormituskertaluku alittaa mitoitusjakson arvioidun kuormituskertaluvun, tulee rakennetta vahvistaa. Vastaavasti mikäli sallittu kuormituskertaluku ylittää mitoitusjakson arvioidun kuormituskertaluvun, voi rakennekerrospaksuuksia ohentaa, edellyttäen kuitenkin ettei minimi-

paksuuksia aliteta. Tällä tavoin iteroimalla laskennalla saavutetaan lopuksi rakenne, jossa sallittu ja arvioitu kuormituskertaluku ovat yhtäsuuret. Edellä kuvatut mitoitusprosessin periaatteet on havainnollistettu kuvassa 10.



Kuva 10. Päälysteen kuormituskestävyyden mitoitusprosessi.

5 TULOSTEN RAPORTOINTI

Mittauksista ja tulosten käsittelystä (takaisinlaskennasta) laadittavan raportin tulee sisältää ainakin seuraavat asiat:

- kohteen yleiskuvaus ja sijaintitiedot: kartta
 - kuvaus laitteesta: merkki, malli, kalibrointi ok
 - mittaussuunnitelma
 - taipumien kuvaajat vs. paalulukema, vähintään d_0 , SCI300 ($d_0 - d_{300}$) ja d_n (kauimmaisen anturin mittaama taipuma)
 - taipumien keskiarvo, mediaani, variaatiokerroin, pienin ja suurin arvo koko osuudella ja kullakin homogeenisella osuudella
 - kuvaus käytetystä takaisinlaskentamenetelmästä (lineaariseen monikerrosteoriaan perustuva ohjelma)
 - takaisinlaskennassa käytetyt kerrospaksuudet kussakin laskentapisteessä
 - rakennekerrosten moduulit kussakin laskentapisteessä sekä keskiarvo, mediaani, variaatiokerroin, pienin ja suurin arvo koko osuudella ja kullakin homogeenisella osuudella
 - kuvaus jännitysten ja muodonmuutosten laskentamenettelystä
- päällysteen alapinnan vetomuodonmuutos kussakin laskentapisteessä sekä keskiarvo, mediaani, variaatiokerroin, pienin ja suurin arvo koko osuudella ja kullakin homogeenisella osuudella

6 KIRJALLISUUS

Bearbetning av deflektionsmätningdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat. Metodbeskrivning 114:2000. Vägverket publikation 2000:29. ISSN 1401-9612. 32 s.

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

Harmonisation of the use of the falling weight deflectometer on pavements, Part 1: Harmonisation of FWD measurements and data processing for flexible road pavement evaluation. Forum of European Highway Research Laboratories, FEHRL 1996.

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

Liimatta, L. Taipumamittausten käyttö tien rakenteellisen kunnon arvioimisessa. Licensiaattityö, 1996.

Projektin COST 336 Use of falling weight deflectometers in pavement evaluation loppuraportti (ei vielä julkaistu).

Ruotoistenmäki, A. Determination of layer moduli from falling weight deflectometer measurements, VTT tiedotteita 1552. Espoo, 1994. 65 s.

Spoof, H., Petäjä, S., Ruotoistenmäki, A. Tien rakenteellinen kunto. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Tutkimusraportti 524. Espoo, helmikuu 2000. 44 s. + liitt. 6 s.

Tielaitos, Konsultointi: Tienpinnan taipuman mittaus pudotuspainolaitteella, Pori 1999. Käyttöohjekirjat.

TPPT Menetelmäkuvaus R08 Ilmastorasitus. VTT Yhdyskuntatekniikka, 2000.

TPPT Menetelmäkuvaus Y12 Tien rakennekerrospaksuuksien määrittäminen ja rakennekerros-tutkimukset. VTT Yhdyskuntatekniikka. Julkaistaan vuonna 2001.

Ullditz, P. Modelling flexible pavement response and performance. Polyteknisk Forlag, 1998.

TPPT Menetelmäkuvaukset

Tämä luettelo on alustava (6.11.2000) ja siihen saattaa tulla vielä muutoksia.

Päällysrakenteen kuormituskestävyysmitoitus

Tierakenteen routamitoitus

Tien painumalaskenta

Tien vauriokartoitus ja vaurioiden kuvaus

Tien rakennekerrospaksuuksien määrittäminen ja rakennekerrostutkimukset
PTM-mittausten suoritus ja tulosten hyödyntäminen TPPT-suunnittelu-järjestelmässä

Routanousun ja painuman mittaus

Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus)



Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta

Liikennesuunnitelman laskeminen

Ilmastorasitus. Pakkasmäärän ja sulamiskauden pituuden määrittäminen

Roudan syvyyden määrittäminen

Routanousukoe. Routimiskertoimen (SP) määrittäminen laboratoriossa

Routimiskertoimen määrittäminen

Lämmönjohtavuuden määrittäminen

Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa

Radiometrinen mittaus

Puristinkairaus CPTU