

PUDOTUSPAINOLAITEMITTAUS (PPL-mittaus)



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 tierakenne voidaan kohdekohtaisesti suunnitella ja mitoittaa. Ohjelman tuloksena laaditaan myös yhteenveto ohjelmaan sisältyneistä koerakenteista sekä yhteenveto materiaaliteknisestä 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

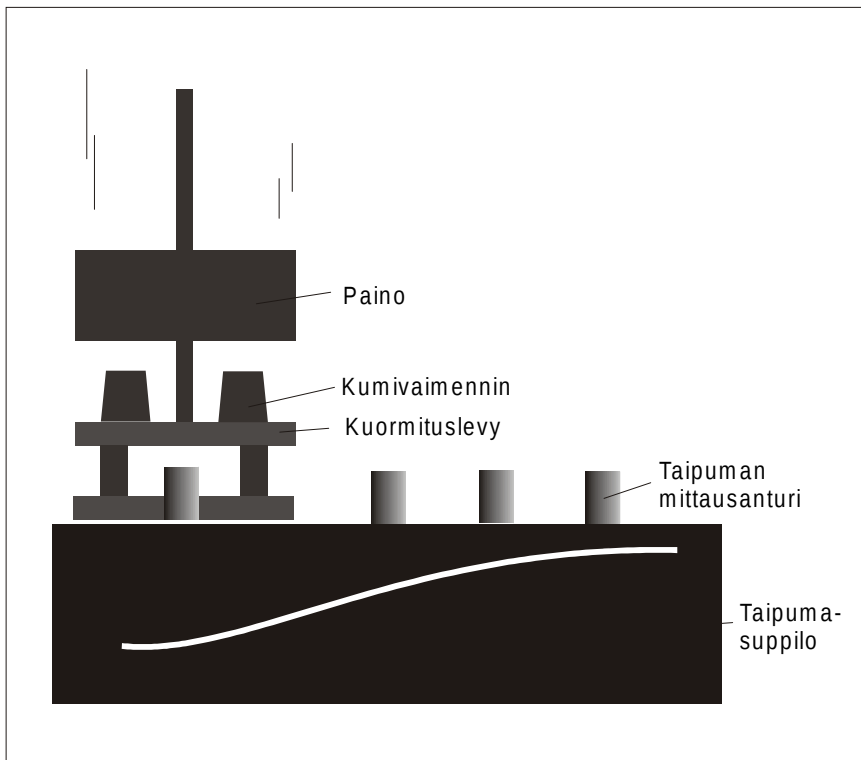
1	JOHDANTO	4
1.1	Pudotuspainolaitemittaus	Error! Bookmark not defined.
1.2	Pudotuspainolaitemittauksen käyttötarkoitus.....	5
2	PUDOTUSPAINOLAITE.....	5
2.1	Voimapulssi ja voiman mittaus	5
2.2	Kuormituslevy.....	Error! Bookmark not defined.
2.3	Taipumanmittausanturit.....	6
2.4	Mittauslaitteiden huolto ja kalibrointi	6
3	MITTAUSTEN SUUNNITTELU JA SUORITTAMINEN	7
3.1	Mittausten tarkoitus ja mittauksen suunnittelun lähtötiedot.....	7
3.2	Taipumien mittaus.....	7
3.3	Päällysteen lämpötilan mittaus	9
3.4	Mittauksista talletettavat tiedot	9
3.5	Rakennekerrospaksuuksien määrittäminen ja poranäytteet	10
4	MITTAUSAINESTON ALUSTAVA KÄSITTELY MITTAUSPISTEITTÄIN	10
4.1	Päällysteen lämpötilan määrittäminen	10
4.2	Taipumasuppilon valinta.....	11
4.3	Taipumien normalisointi kuormituksen suhteen.....	11
4.4	Taipumien normalisointi lämpötilan suhteen	11
4.5	Taipumasuppiloindeksien määrittäminen.....	12
4.6	Pintamoduulikuvaajan määrittäminen	13
4.7	Takaisinlaskentaa varten tallennettavat tiedot	15
5	KIRJALLISUUS	15

1 JOHDANTO

1.1 Pudotuspainolaitemittaus

Tien rakenteen ja sen eri kerrosten materiaalien käyttäytymistä liikennekuormituksen alaisena kuvaa tien pinnan pystysuora siirtymä (taipuma). Liikennekuormitusta simuloidaan pudotuspainolaitteella (PPL), jolla mitataan koetilanteessa tiehen kohdistuva voima ja sen aiheuttama pinnan taipuma. Taipuma mitataan yleensä kuormituslevyn alla sekä usealla eri etäisyydellä kuormituslevystä, jolloin saadaan mitattua ns. taipumasuppilo. Anturien etäisyyksiä voidaan yleensä portaattomasti vaihdella välillä noin 0,2 - 2,5 metriä. Pudotuspainolaitteella mitattu taipumasuppilo kuvaa tien kuormituskestävyyttä, ts. tierakenteen kykyä kestää toistuvia liikennekuormituksia.

Taipumasuppilon muodon perusteella voidaan arvioida tien rakennekerrosten ominaisuuksia. Ns. takaisinlaskentaohjelmilla voidaan laskea pudotuspainolaitteella mitatusta taipumasuppilosta tien rakennekerrosten muodonmuutosmoduulit. Pudotuspainolaitteekokeessa nopea, luonteeltaan dynaaminen kuormitus saadaan aikaan pudottamalla paino kuormituslevylle. Kokeen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Pudotuspainolaitteen toimintaperiaate.

Paino pudotetaan halkaisijaltaan yleensä 300 mm:n suuruiselle pyöreälle levylle vaimentimen välityksellä. Pudotuskorkeus ja painon suuruus on säädettävissä, jolloin tiehen kohdistuvan kuorman suuruutta voidaan vaihdella. Yleisimmin käytetään 50 kN:n suuruista voimaa, joka vastaa levyn alla kuorma-auton 10 tonnin akselipainoa. Kuormitus aika on laitteesta riippuen noin 20 - 60 ms. Pudotuspainolaite simuloi kuorma-auton tienpintaan kohdistamaa rasisusta varsin hyvin. Kuorma-auton syvemmälle tierakenteeseen ja pohjamaahan kohdistaman voiman kuormitus aika sen sijaan on pidempi kuin PPL-mittauksessa, n. 220 ms.

1.2 Pudotuspainolaitemittauksen käyttötarkoitus

TPPT-suunnittelujärjestelmässä pudotuspainolaitetta käytetään rakenteen parantamisen suunnittelun yhteydessä vanhan rakenteen tilan määrittämiseksi kuormituskestävyyden mitoitusta varten. Erityisesti mittaustuloksista lasketaan rakennekerrosten moduulit, jotka tarvitaan analyttisessä mitoitusmenetelmässä. Lisäksi pudotuspainolaitetta käytetään rakentamisen laadunvalvonnassa.

Pudotuspainolaitteen tuloksia voidaan käyttää

- eri rakennekerrosten ominaisuuksien määrittämiseen mm. taipumien ja taipumaerojen perusteella. Taipuma sinänsä ei vielä kuvaa rakenteen kuntoa, vaan kuormituksen aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset rakenteessa ratkaisevat sen kestoiän.
- rakennekerrosten moduulien määrittämiseen takaisinlaskennalla.
- muodonmuutosten määrittämiseen suoraan mitatusta taipumasuppilosta.

Parannettavan tierakenteen mitoituksen lähtötietoina tarvitaan olemassa olevien rakennekerrosten moduulit ja paksuudet. Paksuudet tarvitaan lähtötietoina moduulien takaisinlaskennassa. Niiden määrittämistä käsitellään menetelmäkuvauksessa "Tien rakennekerrospaksuuksien määrittäminen ja rakennekerrostutkimukset". Lisäksi lähtötietona tarvitaan tieto tiehen viimeisen rakenteellisen toimenpiteen jälkeen kohdistuneesta liikennekuormituksesta sekä nykyisestä ja tulevasta liikennekuormituksesta.

2 PUDOTUSPAINOLAITE

Maailmassa on kolme pudotuspainolaitteiden kaupallista valmistajaa. Kaksi näistä on Tanskassa, Dynatest ja Phoenix sekä yksi Ruotsissa, Kuab. Tielaitoksella on käytössä (v 2000) 12 kpl Kuabia, Oulun yliopistolla Phoenix ja VTT:llä Dynatest eli kaikki nykyisin valmistettavat laitteet löytyvät Suomesta.

Dynatest ja Phoenix ovat toimintaperiaatteiltaan samanlaisia, taipumanmittausanturitkin (geofonit) ovat samanlaisia (nopeusantureita) ja jopa samalta valmistajalta. Kuormituslevy ja -systeemi ovat myös samanlaisia siten, että kuormitusaika molemmissa on sama, noin 27 ms:n puolisiniaalto.

Kuabin taipumanmittausanturit ovat toimintaperiaatteeltaan seismometrejä. Kuormituslevy ja -systeemi on sellainen, että kuormituspulssin kesto on noin 50 ms.

Laitteiden erot, ennen kaikkea kuormitusaika, vaikuttavat siten, että viskoelastisten materiaalien (asfaltit) ja savien vaste kuormitettaessa on erilainen. Tietyissä tapauksissa Kuabilla saadaan suurempia taipumia kuin muilla laitteilla.

2.1 Voimapulssi ja voiman mittaus

- Kuormituspulssin keston tulee olla 20 - 60 millisekuntia.
- Voima-anturin lukemataarkkuuden tulee olla 0,1 kN tai parempi.
- Voima-anturin tarkkuus: systemaattinen virhe $\leq 0,5 \%$ koko mittausalueella tai $\leq 2 \%$ mitatusta arvosta (ehdoista tiukempi pätee) (mitattu keskiarvo vs. todellinen arvo).
- Voima-anturin toistettavuus: satunnaisvirhe $\leq 0,1 \text{ kN}$ (hajonta mittauksen keskiarvon ympärillä).

2.2 Kuormituslevy

- Asfalttipäälysteellä käytetään halkaisijaltaan 300 mm osiin jaettua kuormituslevyä.
- Jotta kontakti kuormituslevyn ja tien pinnan välillä on mahdollisimman tiivis ja tasainen, kuormituslevyn alla käytetään vähintään 5 mm paksuista kumimattoa. Kumimaton tulee olla esim. uritettu.

2.3 Taipumanmittausanturit

Mittauksissa käytettävien anturien määrä ja etäisyys kuormituslevystä riippuu mitattavan rakenteen jäykyydestä. Mitä jäykempi päälysrakenne on, sitä kauemmaksi kuormituslevystä antureita tulee sijoittaa, jotta saadaan mitattua myös pohjamaan ominaisuuksia. Vähintään yhden (mieluiten kahden) anturin tulee sijaita kauempana kuormituslevystä, kuin mikä on rakennekerrosten (arvioitu) kokonaispaksuus. Yleensä kannattaa käyttää samoja anturien etäisyyksiä, mikä helpottaa mittauksia ja vähentää virheiden mahdollisuutta.

- Mittauksissa käytetään vähintään 6 taipumanmittausanturia.
- Taipumanmittausanturien etäisyydet tulee valita seuraavasta luettelosta:
0 - 200 - 300 - 450 - 600 - 900 - 1200 - 1500 - 1800 - 2100 - 2400 mm.
- Seuraavia anturien etäisyyksiä on aina käytettävä:
0 - 300 - 600 - 900 mm.
- Anturin lukemataarkkuus: 1 μm tai tarkempi.
- Anturin tarkkuus: systemaattinen virhe $\leq 2\%$ + 1 μm mitatusta arvosta (mitattu keskiarvo vs. todellinen arvo).
- Anturin toistettavuus: satunnaisvirhe $\leq 2\%$ + 1 μm mitatusta arvosta (hajonta mitauksen keskiarvon ympärillä).

2.4 Mittauslaitteiden huolto ja kalibrointi

Pudotuspainolaite tulee huoltaa ja kalibroida valmistajan ohjeiden mukaan. Levyn alla oleva kumimatto ja ns. joustopuskurit on vaihdettava valmistajan ohjeiden mukaan. Voiman, taipumanmittausanturien ja lämpötila-anturin absoluuttinen kalibrointi tulee tehdä vuosittain.

Pudotuspainolaitteelle tulee tehdä valmistajan ohjeiden mukainen suhteellinen kalibrointi (toistettavuuden varmistaminen).

Pudotuspainolaitteen tulee osallistua vuosittain mittauskauden alussa pudotuspainolaitteiden vertailumittauspäiville ja saada asianomainen hyväksyntä.

Pudotuspainolaitteen kalibrointimenetelmiä on eurooppalaisella tasolla harmonisoitu COST-projektissa 336 Pudotuspainolaite.

3 MITTAUSTEN SUUNNITTELU JA SUORITTAMINEN

3.1 Mittausten tarkoitus ja mittausten suunnittelun lähtötiedot

Pudotuspainolaitteella mitataan tien rakenteen ominaisuuksia kuvaava taipumasuppilo, josta voidaan selvittää esimerkiksi rakennekerrosten ja pohjamaan kimmomoduulit. Mittauskohteesta tarvitaan seuraavat perustiedot:

- osoitetieto (tienro, tosa, suunta, kaista)
- tieluokka
- kohteen pituus, jotta voidaan määrittää tarvittavien mittauspisteiden määrä ja sijainti
- tien leveys ja reunan tyyppi, jotta mittauslinjan etäisyys tien reunasta voidaan määrittää
- tien kunto, erityisesti vaurioiden määrä

Jokaista mittaustoimeksiantoa varten on laadittava suunnitelma. Suunnitelmassa on erityisesti tuotava ilmi poikkeamat seuraavassa esitettävistä yleisistä ohjeita.

Mittausajankohta

Mittaustulosten tulee olla kesämittausarvoja. Mittauksia ei saa tehdä olosuhteissa, jotka poikkeavat merkittävästi kesäolosuhteista, esim. syksyllä usean viikon sadekauden jälkeen. Mittauksia ei saa tehdä osittainkaan jäätyneestä rakenteesta. Roudan sulamiskauden pituuden laskeminen on esitetty menetelmäkuvauksessa ”Ilmastorasitus”. Erikoistapauksissa voidaan selvittää rakennekerrosten ominaisuuksia roudan sulamisaikana, mutta tätä tapausta ei ole käsitelty tässä menetelmäkuvauksessa. Kohdassa 3.3 on esitetty raja-arvot päällysteen lämpötilalle, jolloin mittauksia voidaan suorittaa.

3.2 Taipumien mittaus

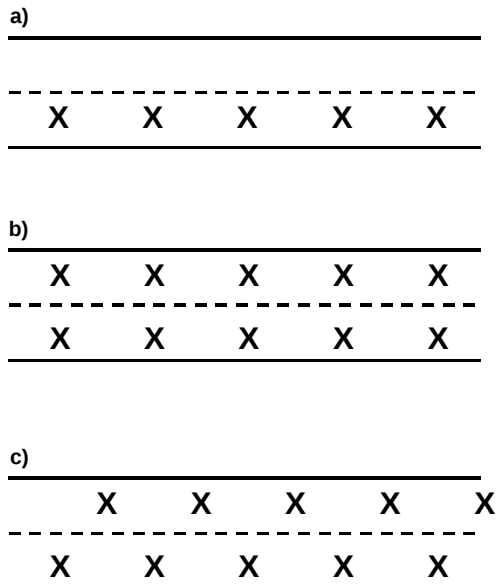
Mittausten tekijälle on annettava seuraavat tiedot mittausten toteuttamiseksi:

- tien kaista, jolla mittaukset tehdään, ks. kohta 3.2.1
- pituussuuntainen mittauslinja (ajoura ja / tai ajourien välistä), ks. kohta 3.2.2
- mittauspisteiden etäisyys (enintään 50 metriä), ks. kohta 3.2.3
- mittauspisteiden määrä (vähintään 12 pistettä), ks. kohta 3.2.3
- käytettävä voima (yleensä 50 kN), ks. kohta 3.2.4
- taipumanmittausanturien etäisyydet kuormituslevystä, ks. kohta 2.3
- mittausohjelman lähtötiedot (pudotusten lukumäärä) kussakin mittauspisteessä, ks. kohta 3.2.5
- muut erityisehdot.

3.2.1 Kaista

Yleensä mittaukset tehdään raskaimmin kuormitetulla ajokaistalla, mikäli kaistoja samaan suuntaan on useita. Yksiajorataisella tiellä, missä on yksi ajokaista kumpaankin suuntaan, mittaukset voidaan tehdä joko yhteen suuntaan (kuva 2a) tai molempiin suuntiin. Jälkimmäisessä tapauksessa, mikäli halutaan verrata eri kaistojen ominai-

suuksia keskenään (kuva 2b), mittaukset tehdään samassa poikkileikkauksessa kummallakin kaistalla. Muuten voidaan mitata sik-sak periaatteella (kuva 2c).



Kuva 2 Mittauspisteiden sijoittelu ajokaistoille yksiajorataisilla teillä.

3.2.2 Pituussuuntainen mittauslinja

- Rakenteen parantamisen mitoittamista varten mittaukset tehdään sekä ajourista etä ajourien välistä. Mittaus on kuitenkin tehtävä aina vähintään oikeanpuoleisessa ajourassa.
- Mittauslinjan etäisyyden tien reunasta on oltava vähintään 1 m.

3.2.3 Pisteväli ja mittauspisteiden määrä

- Mittauspisteiden väliksi pituussuunnassa suositellaan olevan enintään 50 metriä. Koko kohteessa on mitattava vähintään 20 pistettä. Mikäli kohde halutaan jakaa lyhyempiin osuuksiin, mittauspisteitä tulee olla vähintään 12 pistettä / osuus.
- Mikäli halutaan verrata eri kaistojen kestävyyttä keskenään, molemmilla kaistoilla tulee mitata vähintään 12 pistettä (/ osuus). Sama sääntö pätee ajouran ja urien välisen alueen vertailuun.
- Mittausauton matkamittarin lukematarkkuuden on oltava 1,0 m tai parempi. Matkamittarin tarkkuuden on oltava $\leq 0,5 \%$ koko mittausosuudella tai ≤ 1 m (ehdoista tiukempi pätee).

3.2.4 Voima

- Yleensä käytetään 50 kN (+/- 10%) tavoitekuormaa, joka 300 mm halkaisijaltaan olevalla kuormituslevyllä vastaa 707 kPa kosketuspainetta tien pinnalla.
- Mikäli taipuma kuormituslevyn keskellä ylittää 5000 μm , tavoitevoimaa alennetaan 10 kN kerrallaan, kunnes taipumat ovat alle 5000 μm .
- Yhdessä kohteessa käytetään samaa tavoitevoiman arvoa.

3.2.5 Mittausohjelma kussakin mittauspisteessä

- Jokaisella käytettävällä pudotuskorkeudella tehdään 2 pudotusta / mittauspiste, joista viimeinen tallennetaan tulosten käsittelyä varten.
- Kuormituslevyn alla tien pinnalla ei saa olla vettä.
- Kontakti kuormituslevyn ja tien pinnan välillä on oltava hyvä.
- Halkeaman kohdalta ei saa mitata. Pienin suositeltava mittausetäisyys yksittäisestä halkeamasta tai verkkohalkeamasta on 2 m.

3.3 Päällysteen lämpötilan mittaus

Päällysteen lämpötila mitataan päällysteeseen poratusta reiästä:

- Mittaussyvyytensä on päällystekerroksen puoliväli. Reijän porauksen jälkeen on lämpötilan annettava tasaantua, kunnes lämpötilalukeman muutos on pienempi kuin $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$.
- Mikäli päällysteen paksuutta ei tunneta, se joko selvitetään poraamalla ensin reikä päällysteen läpi tai mitataan lämpötila 40 mm syvyyteen ulotetusta poratusta reiästä.
- Joka pisteessä on mitattava vähintään päällysteen pintalämpötila. Mikäli halutaan tarkempi tieto päällysteen lämpötilasta, se voidaan mitata kolmesta syvyydestä: 25 mm pinnasta, päällystekerroksen puolivälistä, 25 mm päällysteen alapinnasta.
- Mikäli mittausosuudella on lämpötilaoloiltaan selvästi vaihtelevia kohtia (aurinkoinen / varjo), lämpötila tulee mitata erikseen niistä kaikista kohdista sekä merkitä muistiin, mitä mittauspistettä kukin lämpötilamittaus vastaa.
- Lämpötilamittaus tulee tehdä vähintään mittauksen alussa ja lopussa sekä mittauksen aikana lisäksi noin tunnin välein.
- Mikäli päällysteen lämpötila laskee alle $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$:een tai nousee yli $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$:een, mittaukset tulee keskeyttää. Samoin mittaukset tulee keskeyttää, mikäli päällysteen pintalämpötila laskee alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:een tai nousee yli $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$:een.

Päällysteen lämpötila määritetään mitatuista arvoista tulosten analysointia varten luvussa 4 esitetyllä tavalla.

Lämpötilan mittaamisessa käytettävän lämpömittarin tulee täyttää seuraavat vaatimukset:

- lämpömittarin lukemataarkkuus: $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai tarkempi
- tarkkuus: $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ alueella $-10\text{ }^{\circ}\text{C}..+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4 Mittauksista talletettavat tiedot

Mittaustiedostoon on talletettava seuraavat yleistiedot:

- tien nro, tosa
- mittaajan nimi
- mittauspäivämäärä
- käytetyn mittauslaitteen laitekoodi
- kuormituslevyn halkaisija
- mitattava ajokaista

- sivusijainti; kapealla tiellä lisäksi etäisyys tien reunasta
- taipumanmittausanturien etäisyydet kuormituslevystä
- mittausohjelman lähtötiedot (pudotusten määrä / tallennetut pudotukset)
- päällysteen lämpötila; voidaan kirjata erilliselle lomakkeelle
- kuvaus sääoloista (aurinkoinen, puolipilvinen, pilvinen)

Jokaisesta mittauspisteestä tallennetaan:

- paalu
- ajokaista
- sivusijainti; kapealla tiellä lisäksi etäisyys tien reunasta
- pudotuksen nro
- mittauksen suoritus aika (tunnit, minuutit)
- pintalämpötila
- päällysteen lämpötila, mikäli se voidaan tallentaa jokaisessa pisteessä erikseen
- mitattu voima (todellinen, muuntamaton)
- voimalla normalisoidut maksimitaipumat (vastaamaan 50 kN voimaa).

Liitteessä 1 on esimerkki Kuab pudotuspainolaitteen tulostiedostosta.

3.5 Rakennekerrospaksuuksien määrittäminen ja poranäytteet

Suositeltavin menettelytapa on, että päällysteen ja kantavan kerroksen paksuus mitataan PPL-mittauslinjalle tehdyistä poranäytepisteistä. Samassa yhteydessä tehdään yleensä näytteenotto päällysteestä, rakennekerroksista ja pohjamaasta. Näytteitä tutkimalla voidaan arvioida laskettujen moduuliarvojen realistisuutta.

Maatutkauksella saadaan jatkuva kuva rakennekerrospaksuuksista. Maatutkatulokset tulkitaan yleensä kalibrointipisteiden avulla, joissa määritetään tarkat rakennekerrospaksuudet esim. koekuopasta tai autokairareistä.

Yleensä moduulien takaisinlaskennassa tarvitaan sidotun päällystekerroksen paksuus ja sitomattomien kerrosten kokonaispaksuus, sekä (sitomattoman) kantavan kerroksen paksuus, mikäli se on erotettavissa muista kerroksista. Maatutkamittaukset ja näytteenotto on esitetty TPPT Menetelmäkuvauksessa "Tien rakennekerrospaksuuksien määrittäminen ja rakennekerrostutkimukset".

4 MITTAUSAINEISTON ALUSTAVA KÄSITTELY MITTAUSPISTEITTÄIN

4.1 Päällysteen lämpötilan määrittäminen

Luvussa 3.3 esitetyllä tavalla päällysteestä mitatuista lämpötiloista määritetään kullekin mittauspisteelle päällysteen keskimääräinen lämpötila jollakin seuraavista tavoista:

- Mikäli päällysteeseen on porattu yksi reikä joko päällystekerroksen puoliväliin tai 40 mm syvyyteen, käytetään tätä arvoa sellaisenaan päällysteen lämpötilana.
- Mikäli päällysteen lämpötila on mitattu kolmesta syvyydestä (25 mm päällystekerroksen pinnasta, päällystekerroksen puolivälistä ja 25 mm päällystekerroksen alapinnasta), käytetään päällysteen lämpötilana näiden mittauksen keskiarvoa sellaisenaan.
- Mikäli ainoastaan päällysteen pintalämpötila on mitattu, päällysteen lämpötila lasketaan yhtälöstä (1):

$$AB_T = 7.07 + 0.564 * PINTA_T - 0.0017 * AB_pak, \quad (1)$$

jossa

AB_T on	päällysteen lämpötila, °C
PINTA_T	päällysteen pintalämpötila, °C
AB_pak	päällysteen paksuus, mm

- Mikäli ainoastaan päällysteen pintalämpötila on mitattu, mutta päällysteen paksuutta ei tunneta, käytetään yhtälöä (2):

$$AB_T = 6.78 + 0.564 * PINTA_T, \quad (2)$$

4.2 Taipumasuppilon valinta

Jatkoanalyysiin valitaan kustakin mittauspisteestä viimeinen pudotus / pudotuskorkeus (todellinen mitattu suppilo).

Mikäli taipumaa 300 mm etäisyydellä kuormituslevystä (d300) ei ole mitattu, se lasketaan yhtälöstä (3)

$$d300 = 2.426 + 0.384*d200 + 0.864*d450 - 0.229*d600 \quad (3)$$

Vastaavasti mikäli taipumaa 450 mm etäisyydellä kuormituslevystä (d450) ei ole mitattu, se voidaan laskea yhtälöstä (4)

$$d450 = -0.999 - 0.262*d200 + 0.813*d300 + 0.451*d600 \quad (4)$$

4.3 Taipumien normalisointi kuormituksen suhteen

Mitatut taipumat normalisoidaan jokaisen anturin kohdalla tavoitevoimaan (yleensä 50 kN, jota vastaa 707 kPa kontaktipaine) suoraviivaisella interpoloinnilla. Jos esimerkiksi mitattu kosketuspaine on ollut 740 kPa ja mitattu taipuma on ollut 453 µm, normalisoitu taipuma on $(707 \text{ kPa} / 740 \text{ kPa}) * 453 \text{ µm} = 433 \text{ µm}$.

Rakennekerrosten moduulit voidaan laskea suoraan mitatuista taipumista käyttämällä takaisinlaskennassa mitattua voimaa / pudotus (TPPT Menetelmäkuvaus "Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta").

4.4 Taipumien normalisointi lämpötilan suhteen

Mikäli pudotuspainolaitetuloksia käytetään muodonmuutosmoduulien takaisinlaskentaan, tulee laskenta suorittaa alkuperäisestä lämpötilakorjaamattomasta mitatusta taipumasuppilosta TPPT Menetelmäkuvaus "Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta" esitetyllä tavalla. **Seuraavassa esitetty taipumien lämpötilakorjaus tehdään ainoastaan taipumasuppiloindeksien määrittämistä varten.**

Aina 600 mm etäisyydelle saakka kuormituslevystä mitatut taipumat lämpötilakorjataan +20 °C vertailulämpötilaan ennen tulosten jatkokäsittelyä. Lämpötilakorjattu taipuma saadaan kertomalla mitattu taipuma kunkin anturin kohdalla kertoimella k (Ruotoistenmäki & Spoof 1998):

$$d_{x20} = k \cdot d_T \quad (5)$$

jossa

d_{x20} on taipuma etäisyydellä x kuormituslevystä +20 °C lämpötilassa
 k taipuman lämpötilakorjauskerroin
 d_T taipuma mittauslämpötilassa

Eri taipumamittausanturien korjauskertoimet saadaan kaavoilla (6) - (10):

$$k_{d0} = 1 - (AB_T - 20) \cdot (0.0000975 \cdot AB_{pak}) \quad (6)$$

$$k_{d20} = 1 - (AB_T - 20) \cdot (0.0000598 \cdot AB_{pak}) \quad (7)$$

$$k_{d30} = 1 - (AB_T - 20) \cdot (0.0000517 \cdot AB_{pak}) \quad (8)$$

$$k_{d45} = 1 - (AB_T - 20) \cdot (0.0000476 \cdot AB_{pak}) \quad (9)$$

$$k_{d60} = 1 - (AB_T - 20) \cdot (0.0000408 \cdot AB_{pak}) \quad (10)$$

joissa

k_{dx} on korjauskerroin taipumalle d etäisyydellä x
 AB_T päällysteen lämpötila, °C
 AB_{pak} päällysteen paksuus, mm

4.5 Taipumasuppiloindeksien määrittäminen

Kun mitattu taipumasuppilo on normalisoitu kuormituksen ja mittauslämpötilan suhteen, siitä voidaan laskea erilaisia taipumasuppiloparametreja. Niitä voidaan käyttää kuvaamaan tien eri rakennekerrosten kuntoa, kuten taulukossa 1 on esitetty.

Taulukko.1. Yhteenvedo pudotuspainolaitteella mitatusta taipumasuppilosta laskettavista parametreista.

Nimi	Merkintä	Yksikkö	Käyttötarkoitus
Keskitaipuma	d_0	μm	Kuvaa koko rakenteen ja pohjamaan jäykkyyttä
Taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä	d_r	μm	Kuvaa ekvivalenttisyvyydellä r olevan kerroksen jäykkyyttä
Surface Curvature Index, SCI	$d_0 - d_r$	μm	Kuvaa päällysrakenteen yläosan kuntoa
Base Curvature Index, BCI	$d_{n-1} - d_n$	μm	Kuvaa päällysrakenteen alaosan kerrosten / pohjamaan kuntoa
Base Damage Index, BDI	$d_1 - d_r$	μm	Kuvaa päällysrakenteen kuntoa

Taulukossa 1 on käytetty seuraavia symboleja:

d_0 taipuma kuormituslevyn alla
 d_r taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä
 d_n taipuma mitattuna kauimpana kuormituslevystä olevalla anturilla
 d_{n-1} taipuma mitattuna toiseksi kauimpana kuormituslevystä olevalla anturilla
 d_1 taipuma mitattuna lähimpänä kuormituslevyä olevalla anturilla

Taipumasuppiloindeksejä voidaan käyttää hyväksi mm. kohteen jakamisessa homogeenisiin osuuksiin kuormituskestävyyden mitoittamista varten.

Tien pinnan taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä kuvaa rakenteen taipumaa vastaavasta syvyydestä alaspäin, tarkemmin ottaen ekvivalenttisyvyydestä alaspäin. Kun Poissonin luku ν oletetaan vakioksi, ekvivalenttisyvyys h_e lasketaan kaavasta (11):

$$h_e = \sum_i n_i * h_i * \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_m}}, \quad (11)$$

jossa

h_e on	ekvivalenttisyvyys, mm
n_i	kerroin, $n=0.8 - 1.0$
h_i	rakennekerroksen i paksuus, mm
E_i	rakennekerroksen i moduuli, MN/m^2
E_m	alemmman kerroksen moduuli, MN/m^2

Taipuma kuormituslevyn keskellä kuvaa koko rakenteen kantavuutta. Pinnan taipuma etäisyydellä 300 mm kuvaa rakenteen taipumaa noin 300 mm syvyydellä, ja pinnan taipuma etäisyydellä 1200 mm kuvaa rakenteen taipumaa noin 1200 mm syvyydellä. Tällöin taipumaerotus $d_{300}-d_{1200}$ kuvaa taipumaa syvyydellä 300 - 1200 mm, ts. sitomattomien rakennekerrosten taipumaa. Taipumaerotus $d_0 - d_{300}$ kuvaa vastaavasti päällysrakenteen yläosan taipumaa ja taipumaerotus $d_{900} - d_{1200}$ kuvaa sitomattomien kerrosten alaosassa / pohjamaan yläpinnassa tapahtuvaa taipumaa.

4.6 Pintamoduulikuvaajan määrittäminen

Mitatusta taipumasuppilosta voidaan määrittää pintamoduulikuvaaja, jonka perusteella voidaan arvioida eri rakennekerrosten jäykkyyttä. Pintamoduulit lasketaan kaavasta (12):

$$E_r = \left[\frac{(1-\nu^2) * \sigma_0 * a^2}{r * d_r} \right], \quad (12)$$

jossa

E_r on	pintamoduuli, MN/m^2
ν	Poissonin luku, tässä $\nu = 0.35$
σ_0	kosketuspaine, MN/m^2
a	kuormituslevyn säde, m
r	taipuma-anturin etäisyys kuormituslevystä, m
d_r	taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä, m

Pintamoduuli kuvaa rakenteen muodonmuutosmoduulia anturin etäisyyttä r vastaavalta syvyydeltä (ekvivalenttisyvyydeltä) alaspäin. Kuormituslevyn alla tapahtuvan taipuman d_0 perusteella määritettyä pintamoduulin arvoa kutsutaan yleisesti kantavuudeksi.

Kantavuus kuormituslevyn alla ($r=0$) lasketaan kaavalla (13) :

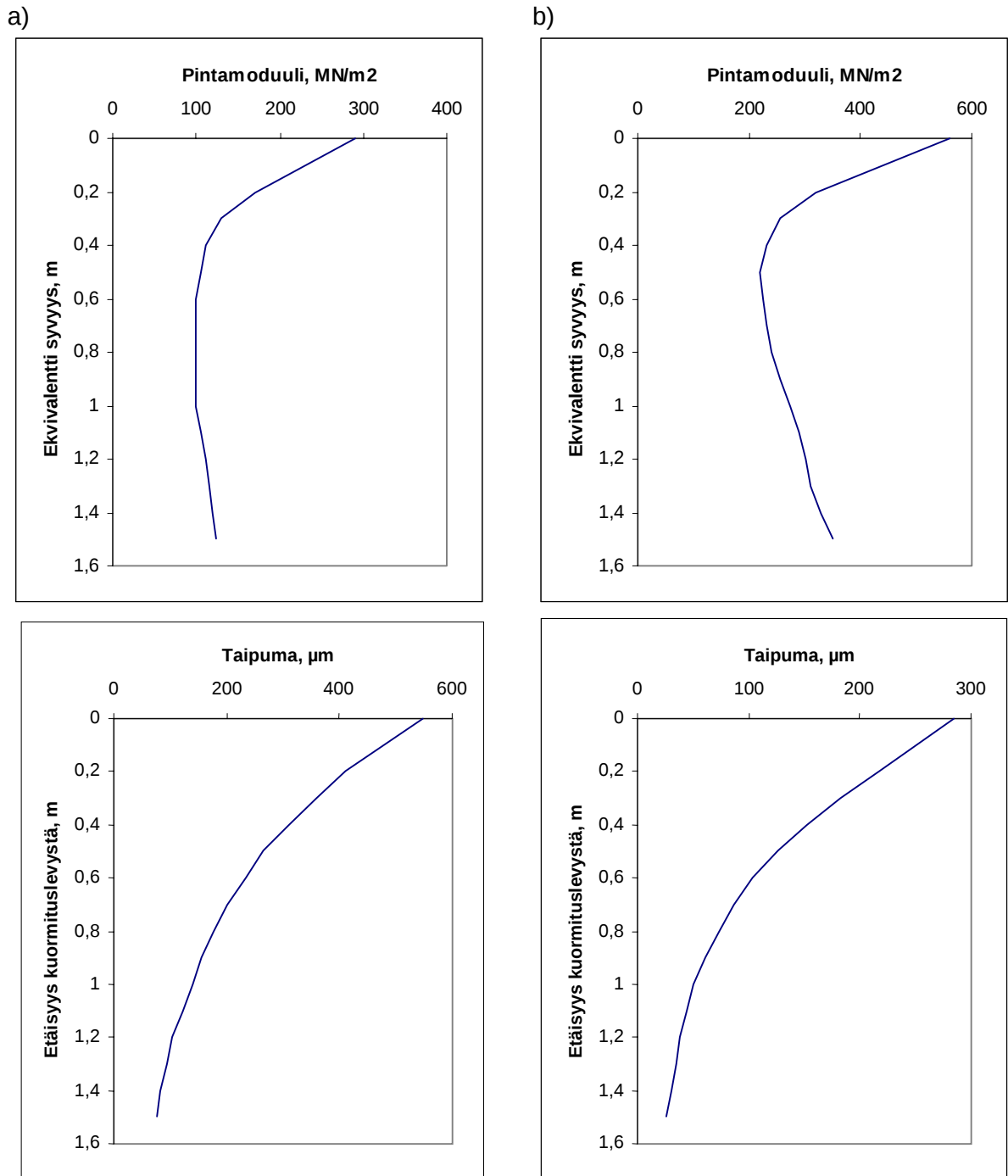
$$E_0 = \left[\frac{2 * (1-\nu^2) * \sigma_0 * a}{d_0} \right], \quad (13)$$

jossa

E_0 on	kantavuusarvo, MN/m^2
----------	--------------------------------

A	kuormituslevyn säde, m
σ	kosketuspaine, MN/m ²
d_0	taipuma kuormituslevyn alla, mm
ν	Poissonin luku

Kuvassa 3 on kaksi esimerkkiä kaavalla (13) lasketuista pintamoduulikuvaajista. Kuvassa 3a) pintamoduuli pienenee syvemmälle mentäessä 400 mm asti ja sitä syvemmälle moduuli on likimain vakio. Pohjamaan jäykkyys on noin 150 MPa. Kuvassa 3 b) päällysrakenteen alaosa on pehmeämpi (noin 200 MPa) kuin pohjamaa, jonka jäykkyys on noin 300 MPa.



Kuva 3. Kaksi esimerkkiä pintamoduulikuvaajasta ja taipumasuppilosta.

4.7 Takaisinlaskentaa varten tallennettavat tiedot

Jokaisessa mittauspisteessä tallennetaan seuraavat tiedot:

- sijaintitiedot (paalulukema, kaista, pituussuuntainen mittalinja)
- kellonaika ja päiväys
- päällysteen lämpötila, kuten edellä kohdassa 4.1 on määritetty
- mitattu maksimivoima
- kuormituksen suhteen normalisoidut taipumat kunkin anturin kohdalla

Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta pudotuspainolaitemittauksista on esitetty TPPT Menetelmäkuvauksessa "Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta".

5 KIRJALLISUUS

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

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.

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

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

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

TPPT Menetelmäkuvaus. Tien rakennekerrospaksuuksien määrittäminen ja rakennekerrostutkimukset. VTT Yhdyskuntatekniikka. Julkaistaan vuonna 2001.

TPPT Menetelmäkuvaus. Ilmastorasitus. VTT Yhdyskuntatekniikka, 2000.

TPPT Menetelmäkuvaus. Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta. VTT Yhdyskuntatekniikka 2000

Esimerkki Kuab pudotuspainolaitteen tulostiedostosta.

IKUAB FWD FILE : 121731.tr
 HTIEPIIRIN NO : 02
 HPÄIVÄ (PPKKVV) : 210700
 HLAITEKOODI & NIMI: 031 OS
 HTIEN NO : 12173
 HAJORATA O TAI V : 0
 HALKUP. TIEOSAN NO: 001
 HET.TIEOS ALUSTA : 0
 HLOPPUP.TIEOSAN NO: 001
 HET.TIEOS ALUSTA : 590
 HENS.MITTAUSPISTE : 100
 HPOISSON (0.5) : 0.5
 HHANKE/PMS :
 HTIEN NIMI :
 HTIEMESTARIPIIRI :
 HHANK. ALKUPAALU :
 HHANK. LOPPUPAALU :
 HET.TIEN REUNASTA : 1.2
 HKANTAVA KRS PAKS :
 HJAKAVA KRS PAKS :
 HSUODATINKRS PAKS :

IPäiväys : 21.7.2000
 IKuormitustapa : 1 (2+2 buffers)
 ILevyn säde : 15 (cm)
 ITallennepohja : TIELAITOS 1992
 IPudotuskorkeus : 44
 IMitataanko isku : 11
 ITallennetaanko? : NY
 IPudotuskorkeus : 1 2 3 4
 IKuormitus : 1250 2750 4000 5000 kgf
 ISeismometrin nro : 0 1 2 3 4 5 6
 I " etäisyys : 0.0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0 (cm)
 I " sijainti : Takana Keskellä Keskellä Keskellä Keskellä Keskellä Keskellä

IAlkupiste : 0 m
 IPisteväli : 100 m

J	Paalu	Isk	Kuorm	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Ilma	Pint	E2	Pis	Klo
J	m	Num	kgf	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	°C	°C	MPa	te	tt:mm:ss
D	100	2	5000	246	202	180	150	126	91	70	16	18	647	1	07:17:18
D	175	2	5000	264	214	187	155	130	103	86	16	18	603	2	07:18:26
D	290	2	5000	290	234	202	162	133	93	66	16	18	549	3	07:19:39
D	400	2	5000	410	348	313	264	222	162	123	16	17	388	4	07:20:47
D	500	2	5000	395	337	302	255	216	160	125	17	18	403	5	07:22:06

BK2 80,70,60,50,40: 80
 BPÄÄLLYSTE (NIMI) : AB
 BPÄÄLL. PAKSUUS cm: 18
 BASF.KRS LKM O,1,2: 2
 BASFALT. IKÄ 0,1,2: 2
 BAURIN/PILVIN A/P : P

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

Liikennesuorituksen laskeminen

Ilmastorasitus. Pakkasmäärän ja sulamiskauden pituuden määrittäminen

Routanousun syvyyden määrittäminen

Routanousukoe. Routimiskertoimen (SP) määrittäminen laboratoriossa

Routimiskertoimen määrittäminen

Lämmönjohtavuuden määrittäminen

Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa

Radiometrinen mittaus

Puristinkäyttö CPTU