

Helsingin kaupungin
Ympäristötuotanto
Katulaboratorio



KATURAKENTEIDEN STAATTINEN JA DYNAAMINEN KANTAVUUS

2006:4 / HKR-Ympäristötuotanto

Teemu Siika

**Katurakenteiden staattinen ja dynaaminen
kantavuus**

Insinööritö 9.3.2006

Työn ohjaaja: projektipäällikkö Veli-Matti Uotinen
Työn valvoja: yliopettaja Kari Vierinen

Tekijä Otsikko	Teemu Siika Katurakenteiden staattinen ja dynaaminen kantavuus
Sivumäärä Aika	98 sivua 9.3.2006
Koulutusohjelma	kemianteekniikan koulutusohjelma
Ohjaaja Valvoja	projektipäällikkö Veli-Matti Uotinen yliopettaja Kari Vierinen
<p>Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää levykuormituslaitteella sekä KUAB- ja Heavy Loadman -pudotuspainolaitteilla tehtyjen mittausten keskinäistä riippuvuutta aikaisempien mittausten ja tutkimusten sekä tätä työtä varten tehtyjen mittausten avulla.</p> <p>Tarkoituksena oli saada aikaan Helsingin kaupungille suositus eri laitteiden käyttökohteista ja käytettävistä kantavuusvaatimuksista eri mittausmenetelmillä. Erityisesti tarkoituksena oli ottaa huomioon kantavuusvaatimukset raskaiden ajoneuvojen pysäköinti- ja lastausalueilla, hitailla katuosuuksilla sekä muilla vastaavilla alueilla, joissa liikenteen katurakenteeseen kohdistama rasitus on luonteeltaan staattista tai taajuudeltaan hidasta.</p> <p>Tutkimuksen alussa oletettiin, että levykuormituslaitteella päällysteen päältä saatavat mittaustulokset eivät ole virheellisiä, vaan laitteella mitatut arvot edustavat katurakenteen kimmomoduulia staattisen kuormituksen alaisena. Tutkimuskohteille määritettiin laskennalliset kantavuusarvot niin sanotulla Odemarkin menetelmällä. Levykuormituskokeella mitattujen ja laskennallisten kantavuusarvojen perusteella voitiin päätellä, että Kunnallisteknisten töiden yleisen työselostuksen 2002 tavoitekantavuusarvot on aikoinaan määritetty juuri levykuormituslaitteen tavoitekantavuuksiksi.</p> <p>Levykuormituslaitteen ja työssä käytettyjen pudotuspainolaitteiden välisille tuloksille havaittiin selkeä riippuvuus. Tulosten avulla tehtiin yhtälöt, joilla levykuormituskokeen tavoitekantavuusarvot voidaan muuntaa jäljempänä osoitettujen pudotuspainolaitteiden tavoitekantavuusarvoiksi.</p> <p>Tulosten perusteella levykuormituskokeen tavoitekantavuusarvoina on käytettävä Kunnallisteknisten töiden yleisen työselostuksen 2002 mukaan laskettuja tavoitekantavuuksia. Heavy Loadman- ja KUAB-pudotuspainolaitteiden tavoitekantavuusvaatimukset lasketaan luvussa 7 osoitetulla tavalla.</p>	
Hakusanat	levykuormituslaite, pudotuspainolaite, kantavuusvaatimus, asfalttipäällyste

Author Title	Teemu Siika The Static and Dynamic Bearing Capacity of Street Structures
Number of Pages Date	98 9.3.2006
Degree Programme	Chemical Engineering
Instructor Supervisor	Veli-Matti Uotinen, Project Manager Kari Vierinen, Principal Lecturer
<p>The goal of this study was to find out mutual dependency between the measurement results of a plate loading test device, a KUAB falling weight deflectometer and a Heavy Loadman falling weight deflectometer. Research was implemented by measurements that was carried out and by utilising the results of earlier researches.</p> <p>The purpose was to achieve a recommendation where to use these different methods and usable maximum load demands in street areas for each deflectometer. Recommendations were intended to be used by the City of Helsinki. One particular purpose was to pay attention to maximum load requirements in heavy vehicle parking areas, truck weigh-stations, slow-speed areas and other similar areas where slow moving or standing loads occur.</p> <p>At the beginning of the research it was hypothesised that the plate loading measurement results from the top of the asphalt surface would not be faulty. These measurement results would just represent a street structure modulus under a static load. A theoretical modulus for the streets that were studied in this research was determined with the Odemark's method. It was concluded that the maximum load requirements in Kunnallisteknisten töiden yleinen työselostus (General Work Description for Public Utility Construction) were originally meant for a plate loading device. The conclusion was drawn on the basis of the measurements made with a plate loading device and the theoretical modules determined with the Odemark's method.</p> <p>This research found an obvious correlation between the measurement results of the plate loading device and the falling weight deflectometers that were used in this study. These results were used to create equations that are meant for transforming the plate loading deflectometers maximum load requirements to maximum load requirements for falling weight deflectometers.</p> <p>On the basis of this study the maximum load requirements for a plate loading device are the same as those in Kunnallisteknisten töiden yleinen työselostus 2002. The maximum load requirements for Heavy Loadman and KUAB can be calculated with equations showed in chapter 7.</p>	
Keywords	plate loading device, falling weight deflectometer, maximum load requirement, asphalt pavement, bearing capacity

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Lyhenteet ja käsitteet

1 Johdanto.....	10
2 Teoria	12
2.1 Kantavuuskäsite.....	12
2.2 Katurakenteen ja päällysteen deformaatio	13
2.3 Kantavuusmittauslaitteet	15
2.3.1 Levykuormituslaite	16
2.3.2 Heavy Loadman -pudotuspainolaite	19
2.3.3 KUAB 50 -pudotuspainolaite.....	20
2.4 Kantavuuteen vaikuttavia tekijöitä	22
2.4.1 Lämpötilan vaikutus päällysteen jäykkyyteen	22
2.4.2 Kuormituksen aikatekijä	24
2.4.3 Roudan, routiintumisen ja roudan sulamisen vaikutus	26
2.4.4 Tien poikkileikkausmuoto.....	27
3 Aiempia tutkimuksia.....	28
3.1 Sitomattomat kerrokset	28
3.1.1 Taustatietoa sitomattomien kerroksien tutkimuksista.....	28
3.1.2 Yhteenveto sitomattomien kerroksien tutkimuksista	29
3.2 Sidotut kerrokset	30
3.2.1 Taustatietoa sidottujen kerrosten tutkimuksista	31
3.2.2 Yhteenveto sidottujen kerrosten tutkimuksista.....	31
3.3 Nykyisin käytössä olevat kantavuuden erillisohjeavot sitomattomien kerrosten päältä tehtäville levykuormitus- ja pudotuspainokokeille	33
3.4 Tiehallinnolla käytössä olevat kantavuusarvojen muuntokaavat päällysteen päältä tehtävissä kantavuusmittauksissa	35
4 Teoreettinen tarkastelu.....	37
4.1 Yleistä	37
4.2 Asfalttibetonin jäykkyyshmoduulin vaikutus päällysteen päältä saavutettavaan laskennalliseen kantavuusarvoon	37
4.3 Tulosten tarkastelu	40

4.3.1 Laskennallisten staattisten ja dynaamisten kantavuusarvojen väliset erot.....	40
4.3.2 Vertailu käytössä oleviin levykuormitus- ja pudotuspainokokeiden välisiin kaavoihin	41
4.3.3 Kantavuusarvojen lämpötilakorjausmenetelmät.....	42
5 Tutkimukset kesinä 2004 ja 2005	44
5.1 Yleistä	44
5.2 Tutkimuskohteiden rakenteet	44
5.3 Teoreettiset kantavuudet.....	46
5.4 Mittaustulokset	48
5.5 Tulosten analysointi.....	49
5.5.1 Vertailu teoreettisiin kantavuuksiin.....	49
5.5.2 Laittevertailu	52
5.5.3 Korrelaatiot	56
5.5.4 Vertailu tiehallinnon pudotuspaino- ja levykuormituslaitteen väliseen kaavaan	57
5.6 Tutkimuksessa määritetyt yhtälöt pudotuspainolaitteiden ja levykuormituslaitteen välille	59
5.7 Takaisinlasketut päällysteen jäykkyysmoduulit.....	62
5.8 Levykuormituslaitteen mittajalan pituuden vaikutus päällysteen päältä saavutettuihin kantavuuksiin.....	64
5.9 Yhteenveto kesän 2004 ja 2005 tutkimuskohteista	65
6 Asfalttibetonin jäykkyysmoduulin käyttäytyminen staattisessa kuormituksessa	67
6.1 Yleistä jäykkyysmoduuleista.....	67
6.2 Dynaamisia jäykkyysmoduulin mittausmenetelmiä.....	67
6.3 Staattisen jäykkyysmoduulin määrittäminen.....	68
6.3.1 Koemenetelmä.....	68
6.3.2 Koekappaleet.....	70
6.3.3 Mittaustulokset.....	70
6.4 Tulosten analysointi.....	71
7 Yhteenveto.....	73
7.1 Tutkimuksessa havaittua	73
7.1.1 Eri mittausvälineiden tulosten keskinäiset riippuvuudet	73
7.1.2 Lämpötilakorjaus.....	74
7.2 Uudet tavoitekantavuusvaatimukset eri mittalaitteille	74
Lähteet	78
Liitteet.....	81
Liite 1: Levykuormituslaitteen kantavuusarvojen lämpötilakorjauskäyrästä ..	81
Liite 2: HKR:n lämpötilakorjauskäyrästä pudotuspainolaitteille.....	82
Liite 3: Tiehallinnon lämpötilakorjauskaava pudotuspainolaitteille.....	83

Liite 4: VTT:n lämpötilakorjauskäyrästäjä pudotuspainolaitteille.....	84
Liite 5: HKR:n asfalttipäällysteen lämpötilakorjauskäyrästä 85	85
Liite 6: Kuvaajia teoreettisista "PPL-" ja "LKL-kantavuuksista".....	86
Liite 7: Mittalaitteiden pistekohtaiset kantavuusmittaustulokset.....	89
Liite 8: Levykuormituslaitteen kantavan kerroksen mittaustulokset	92
Liite 9: Levykuormituslaitteen mittajalan painuminen taipumasuppiloon	93
Liite 10: Poranäytteiden materiaaliominaisuuksia.....	95
Liite 11: Poranäytteiden suhteelliset painumat ja jäykkyysmoduulit	96

Alkusanat

Työ on tehty Helsingin kaupungin katulaboratoriolle. Haluan kiittää laboratorion henkilökuntaa laboratoriopäällikkö Riitta Alvea, laboratoriomestari Tuula Niskasta sekä laboratorioinsinööri Jukka Naukkarista kannustavasta ilmapiiristä. Lisäksi haluan kiittää laboratorion mittamiehiä Timo Uotilaa ja Simo Laurilaa huolellisesti ja tarkoin tehdyistä levykuormituslaitemittauksista.

Kiitän lisäksi Juhani Sulosta tieliikelaitokselta onnistuneista KUAB-mittauksista.

Haluan kiittää myös työn ohjaajaa Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen palvelun projektipäällikkö Veli-Matti Uotista hyvästä tutkimusrungosta ja neuvoista työtä tehtäessä.

Erityinen kiitos kuuluu tutkimuksen henkiselle isälle tekniikan tohtori Anssi Lampiselle uusista ajatuksista ja ideoista sekä omien havaintojeni tukemisesta työtä tehdessä.

Lyhenteet ja käsitteet

Dynaaminen kantavuus	Pudotuspainolaitteella asfalttipäällysteen päältä mitattu kantavuusarvo
Staattinen kantavuus	Levykuormituslaitteella asfalttipäällysteen päältä mitattu kantavuusarvo
AB	Asfalttibetoni
AB 8, 16, 32	Asfalttibetoni, jossa käytetyn kiviaineksen suurin raekoko on lyhenteen perässä oleva lukuarvo millimetreinä
AB 16/RC40	Asfalttilaatu, johon on käytetty 40 % kierrätysmassaa
ABK 32	Asfalttibetoni kantavana kerroksena. Asfaltissa käytetyn kiviaineksen suurin raekoko on 32 mm
BeM	Betonimurske
Benkelman-palkki	Kantavuudenmittausmenetelmä, jossa mitataan kuorma-auton kaksoispyörän väliin jäävän palkin kärjen painumaa
Bitumilaji B-120	Bitumilaatu, jonka tunkeuma 25 °C:ssa on 105 – 135 1/10 mm
Creep-moduuli	Päällysteen jäykkyys staattisen, kappaleen akselin suuntaisen kuormituksen alaisena
Dynatest FWD	Tanskassa 1976 kehitetty pudotuspainolaite, jonka taipumanmittaus perustuu useaan geofoniin
$E_{2, LKL}$	Levykuormituslaitteella mitattu kantavuusarvo
$E_{2, PPL}$	Pudotuspainolaitteella mitattu kantavuusarvo
E-moduuli	Tierakenteen tai pohjamaan näennäinen kimmokerroin
h_{AB}	Asfalttipäällysteen paksuus
Heavy Loadman	Suomalaisen AL-Engineering Oy:n kehittämä pudotuspainolaite
HL	Heavy Loadman -pudotuspainolaite
Hk	Hiekka
HKR	Helsingin kaupungin rakennusvirasto
Ka	Kallio
KaM	Kalliomurske
Ks	Kevytsora
KT-02	Kunnallisteknisten töiden yleinen työselostus 2002
KUAB FWD	Ruotsissa 1976 kehitetty pudotuspainolaite

LKL	Levykuormituslaite
Mr	Moreeni
Phønix FWD	Tanskalainen, nykyisin Carl Bro -yhtymän nimellä PRI2100 FWD valmistama, pudotuspainolaite
PPL	Pudotuspainolaite
Odemarkin menetelmä	Päällekkäisten rakennekerrosten kimmomoduuleihin ja pyöräpainon aiheuttamaan tienpinnan taipumaan perustuva likimääräisten kantavuuksien laskelmamenetelmä
SMA	Kivimastiksiasfaltti
Sr	Sora
SrM	Soramurske
T_{mit}	Mittauslämpötila
T_{ref}	Referenssilämpötila
TPPT	Tien pohja- ja päällysrakenteiden tutkimusohjelma. Tiehallinnon vuosina 1994 – 2001 järjestämä tutkimushanke.
TVH	Tie- ja vesirakennushallitus
TVL	Tie- ja vesirakennuslaitos
TYLT	Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Tiehallinnon urakoissa käytössä olevat ohjeistukset ja vaatimukset.
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

1 Johdanto

Tutkimus käynnistettiin paikkaamaan yleistä epätietoisuutta, joka on vallinnut eri kantavuusmittauslaitteiden tuloksia vertailtaessa. Lähtölaukauksena toimi Helsingin kaupungin katulaboratorion ja kaupungin alueella toimineen kadunrakennusalan yrityksen välinen mielipiteenvaihto. Yrityksen rakentaman kadun kantavuudet mitattiin katulaboratorion toimesta levykuormituslaitteella, mutta tavoitekantavuusvaatimukset päällysteen päältä eivät toteutuneet. Tämän jälkeen kadun rakentajana toiminut yritys mittasi kantavuudet uudelleen KUAB-pudotuspainolaitteella, jolloin kantavuusvaatimus ylittyi selkeästi. Lisäksi yrityksellä ja katulaboratoriolla oli eriävät mielipiteet siitä, soveltuuko levykuormituslaite ollenkaan päällysteen päältä tehtäviin kantavuusmittauksiin.

Tutkimus aloitettiin Helsingin kaupungin katulaboratorion toimesta. Tarkoituksena oli selkiinnyttää kaupungin alueella käytettävien kantavuusmittauslaitteiden tavoitekantavuusvaatimuksia. Vallitsevana käytäntönä on ollut, että tavoitekantavuuksina on käytetty mittalaitteesta riippumatta samoja tavoitekantavuusvaatimuksia. Kuitenkin erilaisilla pudotuspainolaitteilla saatetaan saavuttaa päällysteen päältä jopa kaksinkertaisia E-moduulin arvoja kuin levykuormituslaitteella.

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös asfalttipäällysteen jäykkyysmoduulien käyttäytymistä staattisen kuormituksen alaisena. Tarkoituksena oli lähinnä osoittaa, että dynaamisilla ja staattisilla menetelmillä määritetyt päällysteen jäykkyysmoduulit eroavat toisistaan merkittävästi.

Suomessa aiemmin tehdyissä kantavuusmittaustutkimuksissa on yleisesti laitevertailuja tehtäessä tultu johtopäätökseen, ettei levykuormituslaite sovellu päällysteen päältä suoritettaviin mittauksiin. Toisaalta päällysteen jäykkyyden ja liikennekuormituksen aikariippuvuuden on jo aiemmin todettu olevan hyvin voimakasta. Lisäksi alueilla, joilla liikenne ajoittain pysähtyy tai on pääosan ajasta pysähdyksissä, on kadunpintaan kohdistuva painekuormitus luonteeltaan staattista ja kuormitusajat vaihtelevat useista sekunneista useisiin tunteihin. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi ruuhkaiset tie- ja kaatuosuudet, valo-ohjatut risteysalueet, raskaan liikenteen taukopaikat, lastaus- ja pysäköintialueet sekä terminaalit.

Tässä tutkimuksessa staattisella kantavuudella tarkoitetaan levykuormituslaitteen kantavuusmittaustuloksia ja dynaamisella kantavuudella pudotuspainolaitteiden mittaustuloksia.

Kantavuusmittaustutkimusraportin Katurakenteiden staattinen ja dynaaminen kantavuus kirjoittaja on työtä tehdessään osallistunut kentällä tapahtuviin kantavuusmittauksiin ja tulosten analysointiin ja tulkintaan. Tämän opinnäytetyön tekijä on suorittanut laboratoriossa tehdyt mittaukset. Raportti on kirjoitettu Veli-Matti Uotiselta saadun alustavan tutkimusrungon perusteella.

Tutkimuksen edetessä pidettiin palavereja, joissa osallistujina olivat Veli-Matti Uotinen, Anssi Lampinen sekä katulaboratorion henkilökuntaa. Tapaamisissa käytiin läpi työn edistymistä ja arvioitiin tehtyjä tulkintoja ja johtopäätöksiä. Tutkimuksen kirjoittamisessa on käytetty hyväksi näissä tapaamisissa saatuja neuvoja sekä ilmi tulleita havaintoja ja johtopäätöksiä.

2 Teoria

2.1 Kantavuuskäsite

Tarkasteltaessa kantavuuden käsitettä on syytä erottaa toisistaan geotekninen sekä tien- ja kadunrakennustekninen kantavuus. Vaikka samaa termiä käytetään kummasakin yhteydessä, tarkoitetaan sillä eri asiaa puhuttaessa tie- ja maarakenteista. /1, s. 6; 2, s. 2./

Alun perin sana kantavuus on ollut käytössä geotekniikassa, missä termillä käsitetään maapohjan kykyä kestää tietty staattinen kuorma ilman murtumista. Toisin sanoen se on pohjapaine, jolla saavutetaan riittävässä määrin varmuus, ettei maapohja murru, ja jolla painumat pysyvät niille annettujen rajojen sisällä. Geotekninen kantavuus on siis lujuusarvo, joka on käytössä erilaisten rakenteiden mitoituksessa. /1, s. 6; 2, s. 2; 3, s. 165./

Tienrakennustekniikan sanastoon kantavuuden käsite on siirtynyt soratiekaudella. Tällöin, erityisesti keväällä roudan sulamisen aikana oli kyse siitä, kantaako tie ylimenevän kuorman sortumatta. Nykyisin kantavuus käsitetään koko tierakenteen kykyä vastustaa muodonmuutosta rakennetta kuormitettaessa. Kantavuuden ilmaisemiseen käytetään yleisesti taipumaa, jonka tietyn suuruinen kuorma aiheuttaa, sekä koko tierakenteen näennäistä kimmokerrointa eli E-moduulia. /1, s. 6; 2, s. 2./

Nykyisin on kuitenkin osoitettu, että varsinkin vapaissa liikenneolosuhteissa tierakenteen kestävyys vaikuttaa lähinnä kuormitusten lukumäärä eikä niinkään siihen kohdistuva maksimikuorma. Kantavuuskäsitteestä onkin siirrytty yllä olevaan tierakenteen kestävyys käsitteeseen, josta käytetään myös nimitystä kestoikä. /1, s. 6; 2, s. 2./

Käsitteeseen tierakenteen kestävyys kuuluu olennaisesti analyttinen mitoitusmenetelmä. Perinteisessä Odemarkin menetelmään perustuvassa mitoitusmenetelmässä, jossa ovat käytössä kokemukseräiset tavoitekantavuudet, käytetään routa- ja kantavuusmitoitusta. Tällöin päällysrakenteen kokonaispaksuuden määräävänä tekijänä on routamitoitus ja eri rakennekerrosten paksuuksien kantavuusmitoitus Odemarkin kaavalla. Routamitoituksen pakkasmääränä käytetään paikkakunnalla kerran kymmenessä

vuodessa ylittyvää arvoa. Yleisesti lähtökohtana kantavuusmitoituksessa on tavoitekantavuus. Tämän määrää kuormituskertaluku, joka määritetään mitoitusaajanjakson, raskaan liikenteen määrän ja laadun sekä tien leveyden perusteella. /4, s. 18./

Perinteisen menetelmän heikkoutena pidetään sitä, ettei se huomioi liikennekuormituksen aiheuttamia jännityksiä ja muodonmuutoksia rakenteen eri osissa. Lisäksi menetelmä jättää osin huomioimatta erilaisten materiaalien väsymiskestävyyden erot ja ominaisuuksien olosuhteiden mukaiset vaihtelut. /4, s. 18./

Analyttinen mitoitusmenetelmä huomioi kantavuuden lisäksi myös pyöräkuormituksen rakenteeseen aiheuttaman taipumasuppilon muodon, jolloin rakenteen eri osissa aiheutuvat jännitykset ja muodonmuutokset tulevat huomioiduksi. Rakenteen suunnitteluvaiheessa mitoitus toteutetaan siten, että rasitukset, jotka ovat kuormituskestävyyden kannalta kriittisimpiä, jäävät riittävän alhaiselle tasolle. Kyseisinä rasituksina pidetään yleensä sidottujen kerrosten alapinnan vetomuodonmuutoksia ja pohjamaan pinnan puristusjännityksiä. /4, s. 19./

2.2 Katurakenteen ja päällysteen deformaatio

Viime vuosina on tie- ja katurakenteita tutkittaessa havaittu, että urautumisilmiössä päällystepinnan varsinaisen kulumisen vaikutus on käynyt entistä pienemmäksi. Ilmiö johtuu asfalttipäällysteiden kehityksestä entistä kestävämmiksi ja nastarenkaiden vähemmän kuluttaviksi. Tällöin tie- ja katurakenteen deformaatio on noussut entistä merkittävämpään osaan rakenteen muodonmuutoksissa. /5./

Deformaation käsitettä käytetään seuraavassa kuvaamaan kaikkia muita koko katurakenteessa ilmeneviä pysyviä muodonmuutoksia kuin päällysteen kulumisesta johtuvia. Lisäksi on vielä syytä erottaa erilleen asfalttipäällysteen plastinen deformaatio. Taulukossa 1 on kuvattu deformaation aiheuttavia mekanismeja katurakenteen eri osissa.

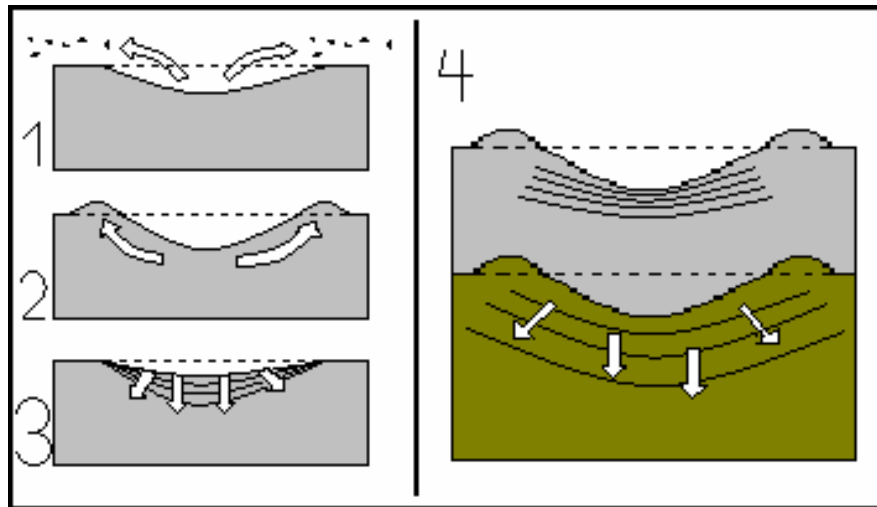
Taulukko 1. Deformaation syntymekanismit ja niihin vaikuttavat tekijät katurakenteen eri osissa. /5./

Rakennekerros	Deformaation aiheuttava mekanismi (vaikuttavat tekijät, pois lukien nastarengaskuluminen)
Kulutuskerros	Tiivistyminen ja plastinen deformaatio (kiviaines, bitumi, tiivistys, kuormitus ja sen luonne, lämpötila, vesi)
Sidekerros	Tiivistyminen ja plastinen deformaatio (kiviaines, bitumi, tiivistys, kuormitus ja sen luonne, lämpötila, vesi)
Sidottu kantava	Tiivistyminen, leikkautuminen, murtuminen (kiviaines, sideaine, tiivistys, kuormitus, pysyvyys, lämpötila, vesi)
Sitomaton kantava	Tiivistyminen, leikkautuminen (kiviaines, tiivistys, kuormitus, rapautuminen, jäätyminen ja sulaminen, vesi)
Sitomaton jakava	Tiivistyminen, leikkautuminen (kiviaines, tiivistys, kuormitus, jäätyminen ja sulaminen, vesi)
Sitomaton suodatin	Tiivistyminen, leikkautuminen (kiviaines, tiivistys, kuormitus, jäätyminen ja sulaminen, vesi)
Penger	Tiivistyminen, leikkautuminen (kiviaines, tiivistys, kuormitus, jäätyminen ja sulaminen, vesi)
Pohjamaa	Tiivistyminen, leikkautuminen – routiminen ja konsolidaatio (pohjamaan tyyppi, olosuhteet: tiiviys, kosteus, lämpötila ja kuormitus)

Deformaatioilmiöitä ovat päällystekerroksen plastinen deformoituminen, sitomattoman rakenteen deformaatio sekä päällystekerrosten tiivistyminen (kuva 1).

Päällystekerrosten plastisessa deformaatiossa asfalttimassa siirtyy sivuille ja pursuaa osittain ylöspäin. Sitomattomien rakenteiden deformoituminen tarkoittaa kaikkien päällystekerrosten alapuolella olevien katurakenteiden tiivistymistä, leikkautumista, murtumista tai näiden kaikkien yhteisvaikutusta. Päällystekerrosten tiivistyessä siihen jäänyt tyhjätila pienenee.

Päällysteen deformaatio on lähinnä massan rakenteen funktio, johon vaikuttavat käytetty kiviaines, tyhjätila sekä bitumin laatu ja määrä. Vaikuttavia tekijöitä ovat myös lämpötila sekä kuormitusten määrä ja kesto. Sitomattomien kerrosten deformaation on katsotaan johtuvan kuormituksesta sekä materiaali- ja tilaominaisuuksista, joihin kuuluvat aksiaalinen ja deviatorinen jännitys, tiiviys, kosteus ja kuormituskertaluku. /5./



Kuva 1. Kuluminen (1), deformaatio (2), tiivistyminen (3) sekä näiden yhteisvaikutus (4). /5./

Stabiloiduissa kerroksissa deformaation syyt ovat vastaavat kuin sidotuilla ja sitomattomilla kerroksilla. Kuormitus, tyhjätila tai tiiviys, kosteus ja stabiloinnin pysyvyys ovat deformaatioon vaikuttavia tekijöitä. /5./

Deformaation kannalta ongelmallisia kohteita esiintyy vapaissa maantieolosuhteissa etenkin raskaasti liikennöidyillä teillä. Kaupunkialueilla ongelmallisiksi kohteiksi on todettu valo-ohjatut risteykset, linja-autokaistat ja -pysäkit sekä terminaalit. Erityisen suuria ongelmia aiheutuu satama-alueiden varikkoalueilla, koska kuormitukset ovat suuria, staattisia ja pistemäisiä. Lisäksi liikenne satama-alueilla on raskasta ja kulkuväylät kaapeita. /5./

2.3 Kantavuusmittauslaitteet

Kantavuusarvojen mittaamiseen on kehitetty useita eri menetelmiä. Seuraavassa on rajoitettu käsittelemään tässä tutkimuksessa käytettyjä mittalaitteita. Näistä levykuormituslaite on staattinen ja sekä KUAB-pudotuspainolaite että Heavy Loadman -pudotuspainolaite dynaamisia kantavuuden mittalaitteita.

2.3.1 Levykuormituslaite

Levykuormituslaite on luultavasti ensimmäinen teiden ja katujen kantavuuksien mittaamiseen käytetty mittalaite. Suomessakin sen käyttö on aloitettu 1950-luvun lopulla.

Levykuormituslaitteella suoritetuissa mittauksissa mitataan kadun pintarakenteen painumaa halkaisijaltaan tavallisesti 300 mm kuormituslevyn alla. Mitattavan kohdan tulisi olla vaakasuora ja tasainen. Jos näin ei ole, tulee kuormitettava kohta tasata tasaushiekalla. Epätasaiset kohdat peitetään siten, että tasaushiekan pinta tulee kourumien yläpinnan tasalle. Tasaushiekan tiivistämiseksi tulee levyä esikuormittaa 3,5 kPa:n kuormalla /2, s. 7/.

Tarvittava kuormitus toteutetaan hydraulisella tunkilla, jonka vastapainona toimii kuorma-auto. Painuman mittaus tapahtuu tavallisesti kuormituslevyn kehälle 120°:n välein sijoitetuilla mittakelloilla, jolloin painumat luetaan ja kirjataan käsin. Mittaus voidaan toteuttaa myös yhdellä mitta-anturilla, kuten tässä tutkimuksessa (kuva 2). Mittattaessa yhdellä anturilla tulee mittavälineen pään tukeutua tunnetun säteen omaalle pallopinnalle. Kyseisellä menettelyllä saadaan eliminoitua kuormituslevyn taipumisen vaikutus tulokseen.

Tutkittavaa kohtaa kuormitetaan välillä 0...60 kN ja askelvälinä käytetään 10 kN:a. Syntyneet painumat mitataan ylläsoitetuin välein, kun rakenteen painumisnopeus on hidastunut alle $0,01 \text{ mm}/_{\text{min}}$. Painumien arvot otetaan ylös jokaisen askeleen kohdalla. Maksimikuormituksen jälkeen paine alennetaan nolnaan ja vastaava painuma otetaan muistiin. Seuraavaksi koe toistetaan kuten edellä. Levykuormituslaitteelle on olemassa myös mittausmenettely, jossa kuormitus nostetaan ilman väliportaita suoraan 60 kN:iin. Tällöin eri menetelmillä mitatut tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään.



Kuva 2. Vertailututkimuksessa käytetty levykuormituslaite ja vastapainona toimiva kuorma-auto. Kuvasta on nähtävissä laitteen ohjaus- ja tallennusyksikkö, hydraulinen tunkki, kuormituslevy ja mittausanturin tukikehikko sekä oikolauta, jota käytettiin taipumasuppilon muodon määrittämiseen.

Ympyrän muotoista levyä kuormitettaessa voidaan sen keskipisteen painuma laskea Boussines' n teorian mukaan kaavalla (1). Tällöin oletetaan maan olevan homogeenista ja täysin kimmoisaa ja Hooken lain olevan voimassa. /2, s. 8./

$$s = k_1(1 - \mu^2) \frac{p \cdot a}{E} \quad (1)$$

Kaavassa s = painuma (mm)

k_1 = kerroin, jonka arvo on $\pi/2$, oletettaessa levyn olevan jäykkä tai 2 oletettaessa levyn olevan taipuisa

μ = Poissonin luku

p = puristusaine (kPa)

a = kuormituslevyn säde (m)

E = kimmomoduuli (MPa)

Ratkaistaessa kimmomoduuli E yhtälöstä (1) saadaan yhtälön (2) mukainen levykuormituskokeessa käytetty kantavuusarvon laskentakaava /2, s. 9/. Kaavassa Poissonin luku on sisällytetty kertoimeen k .

$$E = \frac{k \cdot p \cdot a}{s} \quad (2)$$

Kertoimen k arvo on riippuvainen sekä Poissonin luvun arvosta että oletuksesta levyn jäykkyydestä tai taipuisuudesta. k :n arvo vaihtelee välillä 1,18...2,00, ja yleisimmin sen arvona käytetään 1,5:tä, kuten myös tässä tutkimuksessa. Käytettäessä yhden mittalaitteen systeemiä oletetaan kuormituslevyn olevan jäykempi kuin kolmen mittalaitteen systeemissä /2, s. 9/.

Kantavuusarvo eli E -moduuli lasketaan yleensä sijoittamalla yhtälöön (2) kuormitus-paineeksi suurin käytetty eli useimmiten 60 kN:n aiheuttama ja painuman s arvoksi vastaava painuma. Kyseisellä tavalla saatu kimmomoduulin arvo saattaa kuitenkin poiketa kuormitus-painumakäyrän suoraviivaisen osan perusteella lasketusta E :n arvosta. Tämä johtuu siitä, että kuormituskokeen alkuvaiheessa mittaustapahtuma voi olla altis erilaisille häiriöille ja loppuvaiheessa saattaa maaperän kimmoisuus ylittyä. /2, s. 10./

Kantavuuskokeen ensimmäisestä vaiheesta saatua tulosta merkitään alaindeksillä 1 (E_1) ja toisesta vaiheesta saatua alaindeksillä 2 (E_2). Lopputuloksena käytetään sitä E_2 :n arvoa, joka saadaan suurimmalla käytetyllä kuormituksella. Lisäksi sitomattomien rakenteiden tiivyyden tarkkailua varten käytetään suhdetta E_2/E_1 . Jos edellä mainittu suhde on suurempi kuin annettu raja-arvo, kertoo se, että levykuormituskoe on tiivistänyt tutkittua kohtaa siinä määrin, että voidaan arvioida tiivistämisen olleen puutteellista. Raja-arvona käytetään yleisimmin lukua 2,2. Levykuormituskokeella määritetty kantavuusarvo on siis aina E_2 -arvo.

Levykuormituskoe on luonteeltaan staattinen kuormitustapahtuman keston ollessa tavallisesti keskimäärin 2 min. Kuormituksen kesto saattaa kuitenkin vaihdella suuresti riippuen rakenteen painumisnopeudesta. Tämä johtuu siitä, että kokeessa ei ole vakiointua aikaväliä vaan laite nostaa kuormitusta vasta, kun painumisnopeus on hidastunut alle $0,01 \text{ mm}/_{\text{min}}$.

Tässä tutkimuksessa käytetty levykuormituslaite oli täysin automatisoitu, jolloin sekä kuormituksen nostaminen että tulosten tallennus, analysointi ja luokittelu tapahtuivat laitteen prosessorissa. Laitteeseen syötettiin ainoastaan lähtötietoja mittapisteestä, kuten lämpötila, paalun nro jne.

Suoritettaessa levykuormituslaitteella mittauksia päällysteen päältä tulisi mitta-anturin telineen olla riittävän pitkä. Liian lyhyt teline saattaa olla kuormituslevyn aiheuttaman taipumasuppilon sisällä. Tällöin tuloksena on pienempiä taipuman arvoja, eli havaitut kantavuusarvot kasvavat suuremmiksi kuin todelliset kantavuudet.

Tutkimuksen kahdeksassa viimeisessä kohteessa mitattiin kolmen metrin oikolautaan kiinnitettyjen mittakellojen avulla, paljonko anturin tukijalat painuvat taipumasuppilon mukana (kuva 2). Tulokset on esitetty jäljempänä kohdassa 5.6.

2.3.2 Heavy Loadman -pudotuspainolaite

Heavy Loadman on henkilöauton perävaunuun tai pakettiauton sisätiloihin asennettavissa oleva pudotuspainolaite (kuva 3). Laitteen operointi tapahtuu kannettavan tietokoneen avulla. Laite sisältää omat akut ja pudotuspainon nostaminen tapahtuu paineilmasylinterin avulla. Kadulla mitattaessa mittauspaikan sijainti voidaan määrittää auton matkamittarin tai erikseen asennettavissa olevan pulssianturin avulla.

Heavy Loadman -pudotuspainolaitteen mittausperiaatteena on vapaasti putoavan painon aiheuttama kuormituslevyn liike. Pudotuspainon osuessa kuormituslevyyn rekisteröi anturi aiheutuneen kiihtyvyyden. Kuormituslevyn aiheuttama painuma mitataan joko kuormituslevyn keskellä sijaitsevan kiihtyvyydianturin tai geofonin eli seismisen anturin avulla. Anturin mittaustulos integroidaan taipumaksi, jonka avulla lasketaan kimmomoduulin arvo E . Moduulin laskemiseen laite käyttää kaavaa (2). Tehtäessä useampi mitaus samasta pisteestä voidaan laskea tiivysarvo eli suhde E_2/E_1 .

Työssä käytetyn laitteen kiihtyvyydianturina oli VTI Technologiesin SCA105-anturi. Anturin mittausalueena on ± 5 g ja taajuusvasteena keskimäärin 350 Hz.



Kuva 3. Heavy Loadman -pudotuspainolaite ja sen kuljettamiseen käytettävä peräkärri. Kuvasta on nähtävissä kompressori, kuormituslevy sekä pudotuspainon nostin, joka on paineilmatoiminen.

Laitteen kokonaispaino on noin 100 kg, josta pudotuspainon osuus 50 kg. Kuormituslevynä käytetään halkaisijaltaan 300 mm:n teräslevyä ja pudotuspainon pudotuskorkeutena on 700 mm. Mittapisteeseen kohdistuva kuormitusvoima on noin 50 kN ja kuormitusimpulssin kesto noin 25–30 ms.

2.3.3 KUAB 50 -pudotuspainolaite

KUAB 50 on 1970-luvulla kehitetty perävaunuun tai traileriin asennettava pudotuspainolaite (kuvat 4 ja 5). Laitteen keskusyksikkö ja käyttöjärjestelmä asennetaan kiinteästi vetoautoon.

KUAB-pudotuspainolaitteessa pudotuspainon aiheuttaman taipuman mittaus tapahtuu seitsemän geofonin avulla. Geofonit sijaitsevat 0, 200, 300, 450, 600, 900 ja 1200 mm:n etäisyydellä kuormituslevyn keskipisteestä. Kuormituslevynä on halkaisijaltaan 300 mm:n teräslevy, jonka alaosassa on 20 mm:n kumivaimennin.



Kuva 4. KUAB 50 -pudotuspainolaite traileriin asennettuna.

Laitteen kokonaispaino on trailereineen noin 1300 kg. Pudotuspainon pudotuskorkeus on säädettävissä neliportaisesti ja mittapisteeseen kohdistuva kuormitusvoimaa voidaan vaihdella 12 kN:sta 50 kN:iin. Kuormitusimpulssin kesto on noin 24 ms. Mittausalueena on 5 mm ja mittatarkkuutena 1 μm .



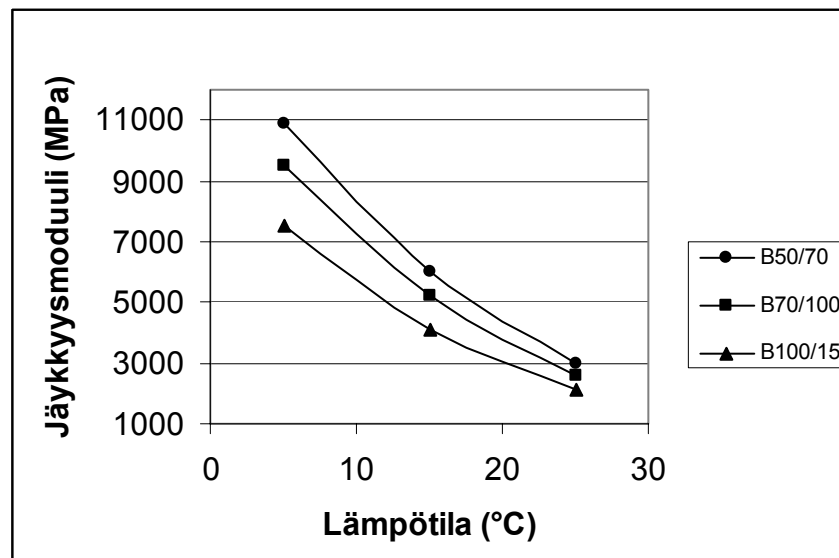
Kuva 5. KUAB-pudotuspainolaite suojakansi avattuna. Kuvasta on nähtävissä pudotuspainon nosto- ja ohjauslaitteisto sekä laitteen kytkentärasia.

Tutkimuksessa käytetyssä laitteessa oli lisävarusteena lämpömittarit ilman ja kadun pinnan lämpötilan mittaukseen. Lisäksi vetoauto oli varustettu GPS-paikannusjärjestelmällä mittapisteiden sijaintitietojen keruuta varten.

2.4 Kantavuuteen vaikuttavia tekijöitä

2.4.1 Lämpötilan vaikutus päällysteen jäykkyyteen

Asfaltoiduilla kaduilla päällysteen jäykkyyden vaikutus kantavuusarvoihin on merkittävä. Asfalttipäällysteen jäykkyyshmoduuli kasvaa kuormitusajan lyhentyessä ja lämpötilan alentuessa (kuva 6). Päällystepaksuuden kasvaessa jäykkyyden merkitys korostuu koko katurakenteen kantavuuteen.



Kuva 6. SMA16:n jäykkyyshmoduuleja eri lämpötiloissa ja eri bitumilaaduilla. Moduulit on määritetty dynaamisella menetelmällä. /6./

Jotta voitaisiin verrata toisiinsa eri ajankohtina ja eri lämpötiloissa mitattuja asfalttipäällysteisten teiden tai katujen kantavuuksia, on tulokset muutettava vertailukelpoiksi, sillä tietyssä mittauslämpötilassa mitattu kantavuuden arvo edustaa ainoastaan ko. lämpötilassa olevaa päällysteen ja päällysrakenteen kantavuutta. Muun muassa päällysteen lämpötila ja lämpötilan jakautuminen syvyysuunnassa, sidottujen kerrosten ominaisuudet, päällystepaksuus sekä sidottujen kerrosten alla olevien kerrosten

kantavuus ovat tekijöitä, jotka vaikuttavat vaadittavan lämpötilakorjauksen suuruuteen. Lisäksi mittausten menetelmä, lähinnä kuormitusajan suhteen, on merkittävä tekijä edellä mainitussa korjauskertoimessa. /2, s. 30./

Sekä levykuormituslaitteen että pudotuspainolaitteen lämpötilakorjauskertoimet perustuvat sidottujen kerrosten paksuuden ja keskimääräisen tai pintalämpötilan mittaamiseen. Levykuormituslaitteelle on yleisesti käytössä TVH:n laatima korjauskäyrästä (liite 1), jonka perustana on edellä mainittujen muuttujien lisäksi bitumilaji B-120. Pudotuspainolaitteelle ovat laatineet lämpötilakorjausdiagrammin Helsingin kaupungin rakennusvirasto, Tiehallinto ja VTT (liitteet 2, 3 ja 4). Rakennusviraston käyrästä muuttujina ovat päällysteen pintalämpötila ja paksuus. VTT:n diagrammeissa merkitseviä tekijöitä ovat sidotun kerroksen paksuus ja keskilämpötila, joka lasketaan pintalämpötilan perusteella /2, s. 31/. Tiehallinnon menetelmässä muuttujia ovat sidotun kerroksen paksuus ja päällysteen keskimääräinen lämpötila.

Suomessa käytetty lämpötilakorjauksen vertailulämpötila on +20 °C. Mittaustulokset siis muunnetaan kantavuuksiksi ko. lämpötilassa. Asfalttipäällysteen kohtalaisen suuren lämpötilaherkkyden takia myös kantavuusmittauksien lämpötila-alueita tulisi rajoittaa tietyille alueille, esim. 10–30 °C:seen /7, s. 3/.

Kantavuusmittauslaitteiden erilaisen kuormitustavan takia tulee lämpötilan mittaustavan olla kaikilla samanlainen /2, s. 32/. Kyseisessä työssä päällysteen pintalämpötilat mitattiin laser-anturilla. Pintalämpötilat muunnettiin keskimääräisiksi lämpötiloiksi HKR:n tielaboratorion Kyläsaaren koekentällä laatiman korjauskäyrästä avulla (liite 5). Päällysteenä koekentällä oli AB 16, jonka bitumipitoisuus oli 5,83 % /7, s. 39/.

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi myös erilaiset kuormitustavat, päällysteen ikä ja tien kantavuustaso tulisi ottaa huomioon lämpötilakorjauksen suuruudessa. /2, s. 32./

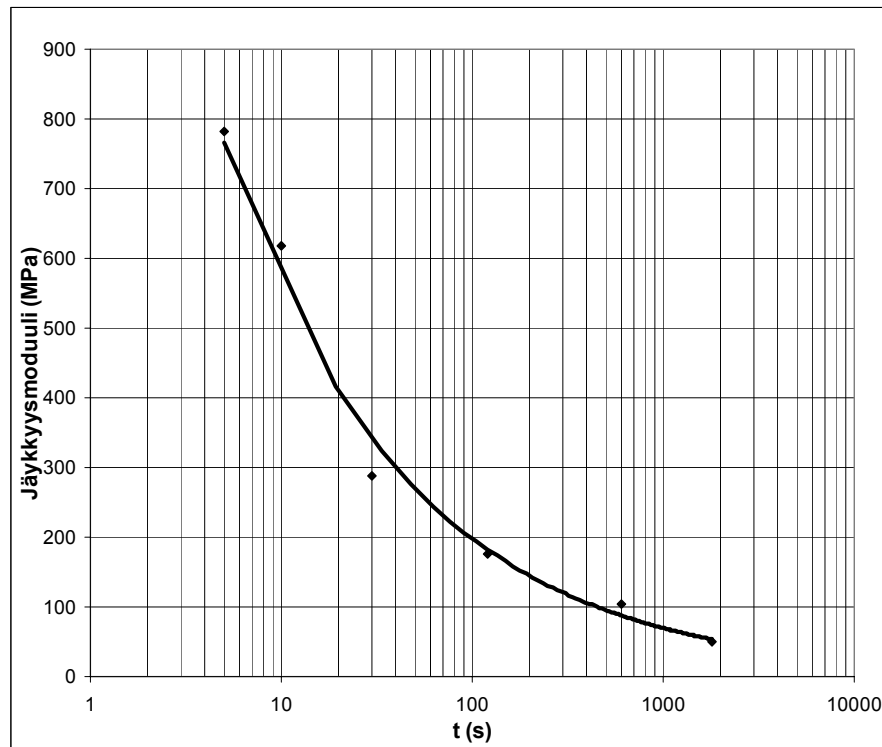
Toisaalta lämpötilakorjauksen jälkeenkin on pidettävä kyseenalaisena staattisten ja dynaamisten kantavuudenmittauslaitteiden kantavuustulosten yhteensovittamista, johon juuri erityyppisistä kuormitustavoista. Yhtenä vaihtoehtona on esitetty, että staattisten ja dynaamisten laitteiden mittaustuloksille tulisi määrittää erilliset tavoitekantavuusvaatimukset. /2, s. 32./

2.4.2 Kuormituksen aikatekijä

Suoritettaessa kantavuusmittauksia asfalttipäällysteen päältä tulee kuormitusajan vaikutus esille päällysteen jäykkyysmoduulin muuttumisen perusteella. Kuvista 7 ja 8 on hyvin nähtävissä kuormitusajan radikaali vaikutus päällysteen jäykkyyteen. Joissain tutkimuksissa on havaittu jäykkyysmoduulin arvon pienentyneen kymmenkertaisesti, kun kuormitusaikaa on pidennetty 0,1 sekunnista 100 sekuntiin /8/. Muun muassa bitumin jäykkyysmoduuli, tyhjätila, sideainepitoisuus, kiviaineksen määrä sekä kuormitusaika ovat ko. arvoon vaikuttavia tekijöitä /7, s. 5/.

Asfaltin käyttäytymisen kuvaamiseen käytetään yleisesti viskoelastista materiaalimallia siksi, että bitumin ominaisuuksia voidaan kuvata viskoosisiksi ja kiviaineksen kimmoisiksi. Viskoelastinen malli sopii hyvin kuvaamaan päällysteen lämpötilasta ja ajasta riippuvaa käyttäytymistä. Kuormitusajan ollessa pitkä ja lämpötilan ollessa korkea syntyy päällysteeseen pysyviä muodonmuutoksia. Kuormitusajan ollessa lyhyt ja lämpötilan matalampi vaikuttaa materiaali jäykemmältä kuin hitaassa kuormituksessa.

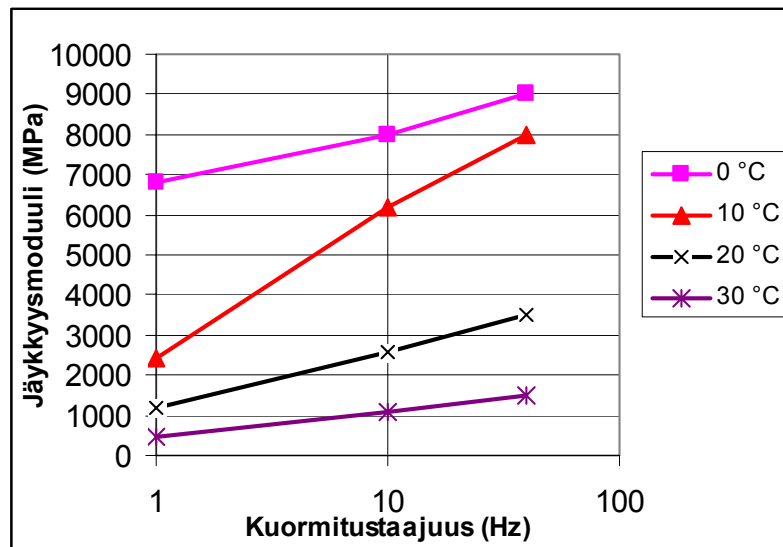
Pudotuspainolaitteen katurakenteeseen aiheuttaman kuormituksen kesto on noin 20–30 ms ja vastaa hyvin maantienopeudella (80 km/h) kulkevan raskaan liikenteen ajoneuvon kuormitusvaikutusta /9, s. 8/. Levykuormituskokeessa kuormitus nousee vaiheittain ja koe kestää keskimäärin noin kaksi minuuttia. Kuormitusajan on todettu vastaavan tilannetta ruuhkaisessa kaupunkiliikenteessä, jossa ajoneuvot seisovat ajoittain paikoillaan /2, s. 28/. Edelleen voidaan todeta levykuormituskokeen vastaavan hyvin lastaus- ja pysäköintialueitten rasituksia /2, s. 28/.



Kuva 7. Kuormitusajan vaikutus asfalttipäällysteen (ABK 32) jäykkyyshmoduuliin. Jäykkyyshmoduulien arvot on mitattu staattisella menetelmällä.

Käytetyillä eri tien- ja kadunrakennusmateriaaleilla on huomattava vaikutus muodonmuutoksen suuruuteen kuormitusajan suhteen. Kuormituksen ollessa vakio kasvavat bitumipäällysteen muodonmuutokset hitaasti ajan funktiona. Päällysteisiin verrattuna karkeiden kiviainesten muodonmuutokset tapahtuvat suhteellisen nopeasti. Hienorakeisilla maalajeilla erityisesti huokosvedenpaine vaikuttaa oleellisesti rakenteen koonpuristuvuuteen.

Kuormitettaessa vedellä kyllästynyttä maakerrosta kestää aikansa, ennen kuin se alkaa puristua kokoon. Tämä johtuu siitä, että huokosveden puristuminen maakerroksen huokosissa vie aikaa. Pudotuspainokokeissa ei huokosvedenpaine ehdi vedellä kyllästyneissä hienojakoisissa maalajeissa tasaantua kyseessä olevien maalajien pienen vedenläpäisevyyden takia. Tämä aiheuttaa sen, että kuormitushetkellä osa paineesta jakautuu huokosveden välityksellä ympäristöön ja kuormitusjakauma syvyysuunnassa muuttuu. Levykuormituskokeessa huokosvedenpaine ehtii tasaantua ja seurauksena on enemmän pysyviä eli plastisia muodonmuutoksia kuin pudotuspainolaitteen aiheuttamassa painumassa. /2, s. 24 ja 25./



Kuva 8. Kuormitustaajuuden vaikutus asfaltin jäykkyyssmoduuliin eri lämpötiloissa. Jäykkyyssmoduulien arvot mitattu dynaamisella menetelmällä. /2, s. 30./

Erilaisilla kuormitustavoilla on todettu olevan merkitystä erityisesti sellaisissa tapauksissa, joissa tien tai kadun alusrakenne on heikko tai jos tierakenteeseen sisältyy kerros humusmaata. Pudotuspainolaitteen on todettu edellä mainituissa tapauksissa antavan selvästi pienempiä taipuma-arvoja kuin staattisilla mittalaitteilla mitatut. /2, s. 24./

2.4.3 Roudan, routiintumisen ja roudan sulamisen vaikutus

Talvisin routivassa pohjamaassa esiintyy tien rakennetta nostavia jäälinssiä. Nousunopeus eri kohdissa vaihtelee pohjamaan epähomogeenisuuden vuoksi. Tästä seuraa tienpinnan epätasaisuutta ja mahdollisesti halkeamia. Keväisin routivien rakenteiden kantavuus heikkenee johtuen sulamisvesien runsaasta määrästä. /1, s. 78./

Routivassa maassa esiintyvää jäätä voidaan pitää käyttäytymisensä puolesta viskoelastisena materiaalina. Tällöin tierakenteen ollessa jäykkä tapahtuu jäässä pidemmällä aikavälillä plastisia muodonmuutoksia, jotka tasaavat routanousuja. Toisaalta kuormitus saattaa nousta niin suureksi, että sula maa routivien kohtien alla saattaa murtua tai antaa muuten periksi. Esimerkiksi asfalttipäällystettä, jonka jäykkyyssmoduuli on matalissa lämpötiloissa suuri, voidaan pitää edellä mainittuna jäykkänä rakenteena, jolla on voimakas routanousuja tasoittava vaikutus. /1, s. 79 ja 80./

Tien alusrakenteen ollessa jäässä saattavat dynaamisilla mittalaitteilla havaitut taipumat pienentyä johtuen kuormitusaallon heijastumisista /2, s. 25/.

Kevätkantavuus on oletettu kantavuuden minimiarvo maaperän ja tie- tai katurakenteen sulamiskaudella. Kevätkaudella tien kantavuus pienenee johtuen päällysrakenteen sulamisen aiheuttamasta päällysrakennekerrosten pehmenemisestä. Hyvin rakennetuilla teillä kyseinen kantavuuden aleneminen on kuitenkin vähäistä ja kantavuusarvot ovat alimmillaan 80–90 % kesäajan vastaavista. Itse jäätyneen pohjamaan kantavuus on suuri, mutta alenee voimakkaasti sulamisen edetessä kyseiseen kerrokseen. Kantavuuden aleneminen jatkuu siihen saakka, kunnes routa on kokonaan sulanut. Sulanut pohjamaa alkaa tämän jälkeen tiivistyä ja lujittuminen kesäarvoon tapahtuu noin 2-9 viikossa. Pohjamaan kevätkantavuus on tärkeä tekijä, kun määritetään tierakenteen ja pohjamaan deformaatioita rakenteen kestävyysmitoituksen yhteydessä. /10, s. 7./

2.4.4 Tien poikkileikkausmuoto

Erityisesti kapeilla teillä ja sivuojallisilla kaduilla tien poikkileikkausmuoto vaikuttaa eri mittalaitteilla havaittuun jäykkyyssmoduulin arvoon. Samallakin mittalaitteella mitatut E-moduulit vaihtelevat, riippuen siitä missä kohdin tien poikkileikkausta mittaukset on suoritettu. Ulkourasta mitattaessa havaitut E-arvot ovat pienempiä kuin kaistan keskellä havaitut. Kuormitustavan vaikutus tuloksiin vaihtelee siten, että kaistan keskeltä mitattaessa staattisilla ja dynaamisilla mittalaitteilla havaittujen arvojen erot ovat pienemmät kuin ulkourasta mitattaessa. /2, s. 25 ja 26./

Erot johtuvat siitä, että staattisessa kuormituksessa painevaikutus jakaantuu laajemmalle alueelle kuin dynaamisessa. Tällöin sivutuen puuttuminen kapeiden teiden ja sivuojallisten katujen reuna-alueilla vaikuttaa enemmän hitaalla kuin nopealla kuormituksella.

3 Aiempia tutkimuksia

3.1 Sitomattomat kerrokset

Sitomattomista kerroksista käsiteltiin kolmea sovellettavissa olevaa aiempaa tutkimusta. Aineistona olivat seuraavat vertailututkimukset: Tielaitoksen Turun tiepiirin vertailututkimus Lavian Kivimäen murskaamon varastoalueella /11/ ja Tanskan tielaitoksen (Vejdirektoratet) vuoden 2001 vertailututkimus /12/. Edellisten lisäksi mukana oli myös Tiehallinnon tien pohja- ja päällysrakenteiden tutkimusohjelman 1994 – 2001 Jutikkalan eritasoliittymän kohderaportti TPPT 27 /13/.

3.1.1 Taustatietoa sitomattomien kerroksien tutkimuksista

Tielaitoksen Turun tiepiirin vertailututkimus on tehty varastoalueen pohjalle rakennetuilla neljällä 30 m:n pituisella koepenkereellä. Penkereistä kolme oli rakennettu 0–45 mm:n kalliomurskeesta. Näiden kantavaa kerrosta kuvaavien pohjien paksuudet olivat 20, 30 ja 40 cm. Lisäksi yksi penkereistä oli rakennettu 0–16 mm:n kalliomurskeesta ja sen kerrospaksuus oli 20 cm. /11, s. 4./ Mittaukset koealueella on tehty levykuormituslaitteella, kannettavalla Loadman-pudotuspainolaitteella ja KUAB FWD 50 -pudotuspainolaitteella. Tässä työssä tarkastellut kantavuusarvot ovat vertailututkimuksen kuvaajista luettuja likiarvoja.

Tanskan tielaitoksen tutkimuksessa on vertailtu yhteensä viiden eri kantavuusmittalaitteen tuloksia /12/. Testattavana on ollut levykuormituslaite, Dynatest-pudotuspainolaite sekä kolme erilaista kannettavaa pudotuspainolaitetta. Mittaukset on suoritettu elokuun 2001 aikana Århusin ympäristössä /14/. Tutkimusalueen pohjamaana oli moreeni. Jakavan kerroksen paksuutena oli 30 cm ja kantavan kerroksen 25 cm. Seuraavassa on käsitelty ainoastaan levykuormituslaitteen ja Dynatest-pudotuspainolaitteen tuloksia.

Jutikkalan eritasoliittymän kohderaportti ei ole suoranainen vertailututkimus, mutta myös sitä käytettiin vertailuihin. Koeosuuksien pohjamaana oli moreeni lukuun ottamatta yhtä osuutta, joka tehtiin kalliroleikkaukseen. Jakava kerros oli rakennettu kohteessa 0-65 mm:n sorasta ja sen paksuutena oli 70 cm. Jakavaa kerrosta ei ollut kal-

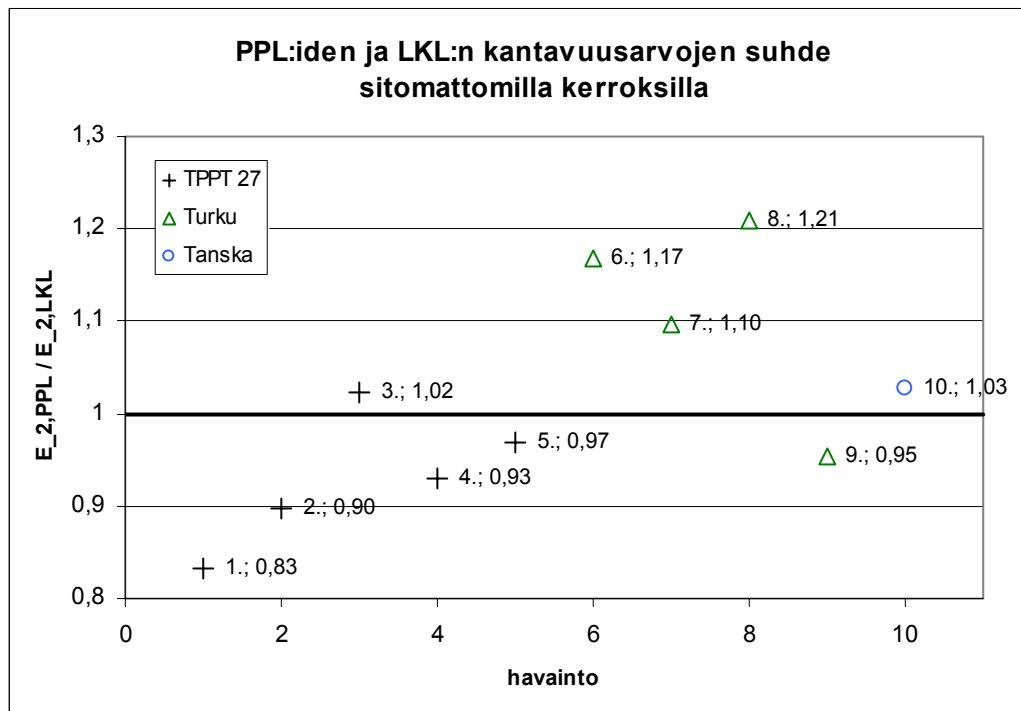
lioleikkaukseen tehdyllä osuudella. Sitomaton kantava kerros oli tehty 0-32 mm:n so-ramurskeesta ja sen paksuus on ollut 20 cm. Levykuormituskokeet sitomattoman kan-tavan kerroksen päältä on suoritettu 4.7.1996 ja pudotuspainokokeet KUABilla 8.7.1996 /13, s. 25 ja 26/.

3.1.2 Yhteenveto sitomattomien kerroksien tutkimuksista

Sitomattomilla kerroksilla pudotuspainolaitteen ja levykuormituslaitteen välisissä tulok-sissa ei ole suuriakaan eroja. Taulukkoon 2 on koottu aiempien tutkimusten mittaus-tulokset. Kuvassa 9 on esitetty pudotuspainolaitteiden tulosten suhde levykuormitus-laitteen tuloksiin sitomattomilla kerroksilla. Kuvan ja taulukon selitteissä TPPT 27 tar-koittaa Jutikkalan eritasoliittymän kohderaporttia, Turku Tielaitoksen Turun tiepiirin vertailututkimusta ja Tanska Tanskan tielaitoksen tutkimusta.

Taulukko 2. Aiempien tutkimusten mittaustuloksia. (Tulokset on poimittu lähteistä 11, 12 ja 13).

TPPT 27 (Pudotuspainolaitteena KUAB)					
nro.	Pohjamaa	Jakava	Kantava	LKL E₂ (MPa)	PPL E₂ (MPa)
1.	Mr	Sr 0-65 mm, 70 cm	SrM 0-32 mm, 20 cm	188	157
2.	Mr	Sr 0-65 mm, 70 cm	SrM 0-32 mm, 20 cm	172	154
3.	Mr	Sr 0-65 mm, 70 cm	SrM 0-32 mm, 20 cm	168	172
4.	Mr	Sr 0-65 mm, 70 cm	SrM 0-32 mm, 20 cm	173	161
5.	Ka	-	SrM 0-32 mm, 20 cm	179	173
Turku (Pudotuspainolaitteena KUAB)					
nro.	Pohjamaa	Jakava	Kantava	LKL E₂ (MPa)	PPL E₂ (MPa)
6.	-	-	KaM 0-45 mm, 20 cm	174	203
7.	-	-	KaM 0-45 mm, 30 cm	141	155
8.	-	-	KaM 0-45 mm, 40 cm	135	163
9.	-	-	KaM 0-16 mm, 20 cm	149	142
Tanska (Pudotuspainolaitteena Dynatest)					
nro.	Pohjamaa	Jakava	Kantava	LKL E₂ (MPa)	PPL E₂ (MPa)
10.	Mr	30 cm	25 cm	145	149



Kuva 9. Levykuormituslaitteen ja pudotuspainolaitteiden sitomattomien kerrosten päältä mitattujen kantavuusarvojen suhde. Pisteiden selitteenä on mittaustuloksen numero ja suhde $E_{2,PPL} / E_{2,LKL}$.

Pudotuspainolaitteilla mitatut kantavuusarvot ovat olleet pienimmillään 17 % pienemmät ja suurimmillaan 21 % suuremmat kuin levykuormituslaitteen kantavuusarvot. Keskimäärin pudotuspainolaitteiden tulokset ovat olleet vain 1,0 % suurempia. Keskimääräiset arvot tarkoittavat tässä yhteydessä aiempien tutkimusten kohdekohtaisten mittaustulosten keskiarvojen keskiarvoa. Levykuormituslaitteen mittausten menetely ei tullut kaikissa aiemmissä tutkimuksissa selville, joten tulosten hajontaan saattaa vaikuttaa myös käytetty levykuormituskokeen toteutus.

3.2 Sidotut kerrokset

Sidotuista kerroksista käsiteltiin kahta aiempaa tutkimusta. Aineiston muodostivat Oulun yliopiston julkaisu 8 /2/ ja Oulun yliopiston tie- ja maarakennustekniikan laitoksen julkaisu 33 /15/.

3.2.1 Taustatietoa sidottujen kerrosten tutkimuksista

Oulun yliopiston julkaisuun 8 on havaintoaineisto koottu useista eri tutkimuksista. Mittaukset on tehty Phønix-pudotuspainolaitteella, levykuormituslaitteella ja Benkelman-palkilla sekä yhdessä kohteessa myös KUAB-pudotuspainolaitteella. /2, s. 33./ Seuraavissa vertailuissa Benkelman-palkki on jätetty ottamatta huomioon. Mittaukset päällysteen päältä on suoritettu kevään ja kesän 1987 aikana TVL:n Lapin ja Oulun piirien alueella. Kohteiden X ja XI sekä Mt 830 päällystepaksuutena on ollut 5 cm. Vt 4:llä päällystepaksuus on ollut 12 cm.

Oulun yliopiston tie- ja maarakennustekniikan laitoksen tutkimuksessa on vuosina 1975 – 1979 tehty vertailukokeita pudotuspaino- sekä levykuormituslaitteella ja Benkelman-palkilla. Seuraavassa on vertailtu vain pudotuspaino- ja levykuormituslaitteen keskinäisiä tuloksia. Mittaukset on toistettu Kt 77:llä touko-, kesä-, elo- ja lokakuussa 1975 sekä elokuussa 1976. Pt 18709:llä mittaukset on toistettu touko-, kesä-, elo- ja lokakuussa 1975. Mittaukset Oulun kaupungin alueella Biologintiellä ja Erkintiellä on toistettu touko-, heinä-, elo- ja lokakuussa 1978 sekä touko- ja elokuussa 1979.

Sidottujen kerrosten paksuudet ovat olleet Kt 77:llä 10...12 cm, Pt 18709:llä noin 5 cm, Erkintiellä n. 15 cm ja Biologintiellä yhdessä pisteessä n. 15 cm ja muualla n. 6 cm. /15, s. 17./ Sekä pudotuspaino- että levykuormituslaitteen maksimikuormana on käytetty 50 kN:a /15, s. 19/. Tutkimuskohteet on mitattu eri aikoina neljästä kuuteen kertaan. Seuraavassa tarkastelussa on verrattu toisiinsa samoina aikoina mitattuja levykuormituslaitteen ja pudotuspainolaitteen kantavuuksia.

3.2.2 Yhteenveto sidottujen kerrosten tutkimuksista

Asfalttipäällysteen päältä levykuormitus- ja pudotuspainokokeella määritetyt E-moduulin arvot eroavat toisistaan kohtalaisen paljon. Pudotuspainolaitteella mitatut lämpötilakorjaamattomat kantavuusarvot ovat pienimmillään olleet 2 % pienemmät kuin levykuormituslaitteen arvot ja suurimmillaan jopa yli 400 % suuremmat kuin levykuormituslaitteen. Lämpötilakorjatut pudotuspainolaitteen kantavuusarvot ovat olleet pienimmillään 14 % pienemmät ja suurimmillaan 47 % suuremmat kuin levykuormituslaitteella mitatut kantavuusarvot.. Tosin suurimman eroavaisuuden omaavista kantavuusarvoista

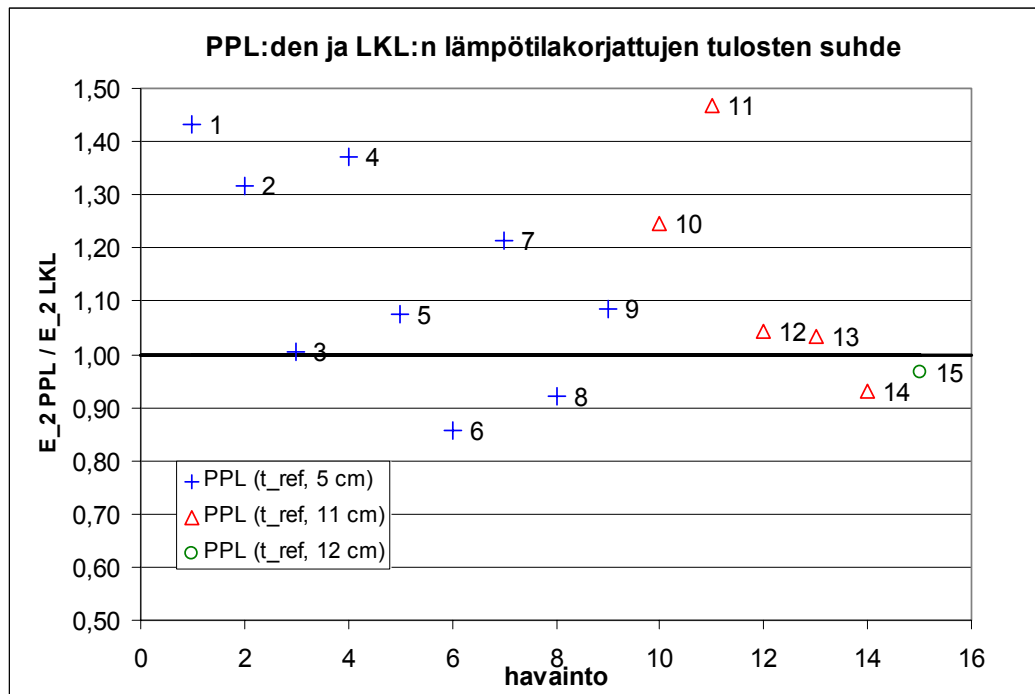
ei ole lämpötilakorjattuja lukemia. Taulukoon 3 on koottu aiempien tutkimusten sidottujen kerrosten mittaustulokset. Kuvassa 10 on esitetty pudotuspainolaitteen ja levykuormituslaitteen lämpötilakorjattujen tulosten suhde.

Taulukko 3. Aiempien tutkimusten mittaustuloksia päällysteen päältä.
(Poimittu lähteistä 2 ja 15).

nro.	Kohde	h_{AB} (cm)	PPL E_2 (t_{mit} , MPa)	PPL E_2 (t_{ref} , MPa)	LKL E_2 (t_{mit} , MPa)	LKL E_2 (t_{ref} , MPa)
Pt 18709						
1.	touko.75	5	281	285	198	199
2.	kesä.75	5	318	353	265	268
3.	elo.75	5	278	331	318	329
4.	loka.75	5	359	324	252	237
Kt 77						
5.	X kesä	5	300	290	275	270
6.	X kevät	5	302	243	309	284
7.	XI kesä	5	315	308	260	254
8.	XI kevät	5	328	263	310	285
9.	Mt 830 kevät	5	374	322	309	297
Kt 77						
10.	touko.75	11	356	396	259	318
11.	kesä.75	11	426	426	292	290
12.	elo.75	11	389	405	370	389
13.	loka.75	11	562	471	537	456
14.	elo.76	11	395	366	372	393
15.	Vt 4 kevät	12	372	238	296	246
Biologintie						
	touko.78	6	199		124	
	heinä.78	6	204		136	
	elo.78	6	216		178	
	touko.79	6	210		189	
	elo.79	6	246		215	
	15 cm:n piste	15	237		77	
Erkintie						
	touko.78	15	176		55	
	heinä.78	15	195		49	
	elo.78	15	231		62	
	touko.79	15	200		38	
	elo.79	15	233		84	

Riippuvuus päällysteen paksuudesta on havaittavissa siten, että päällystekerroksen kasvaessa myös erot eri kuormituslaitteiden tulosten välillä kasvavat. Lämpötilakorjaimattomissa kantavuusarvoissa ohuemmilla päällysteillä erot pudotuspainolaitteen ja levykuormituslaitteen välillä ovat suhteellisen pieniä. Paksummilla päällysteillä pudotuspainolaite näyttäisi antavan selkeästi suurempia kantavuusarvoja, erityisesti lämpö-

tilakorjaamattomina, kuin levykuormituslaite. Toisaalta havaintoja paksuilta päällysteiltä on vähän.



Kuva 10. Levykuormituskokeen ja pudotuspainokokeen päällysteen päältä saattujen lämpötilakorjattujen tulosten suhde. Pisteiden selitteenä on mittaustuloksen numero.

Lämpötilakorjatut alle 10 cm päällysteen päältä mitatut pudotuspainolaitteen tulokset ovat noin 14 % suuremmat kuin levykuormituslaitteen. Yli 10 cm:n päällystepaksuuk-silla ero on noin 11 %. Toisaalta paksummilta, eritoten todella paksuilta päällysteker-roksilta on vähemmän havaintoaineistoa kuin ohuemmilta.

3.3 Nykyisin käytössä olevat kantavuuden erillisohjeavrot sitomattomien kerrosten päältä tehtäville levykuormitus- ja pudotuspainokokeille

Tielaitoksen tienrakennustöiden yleisissä laatuvaatimuksissa ja työselityksissä penger ja kerrosrakenteet osassa (TYLT 4000) /16/ on määritetty erillisohjeavrot levykuormi-tus- ja pudotuspainokokeille. Sitomattomista kerroksista erillisarvot on määritelty jaka-van kerroksen kantavuudelle (taulukko 4). Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty erityyppisille kantavan kerroksen rakenteille määritetyt odotusarvot eri mittalaitteilla. KT-02:ssa ei

ole otettu kantaa, millä mittalaitteella siinä ilmoitetut tavoitekantavuusarvot tulisi saavuttaa.

Taulukko 4. Jakavan kerroksen suositeltavat kantavuusarvot. /16./

Mittalaite	Vähimmäisarvo E_{2min} (MPa)
Levykuormituslaite	90
Pudotuspainolaite	105

Jakavalle kerrokselle määritetyissä kantavuusarvoissa on kyse yksittäisen mittauspisteen vähimmäisarvoista. Pudotuspainolaitteen vähimmäisarvo on määritelty noin 17 % suuremmaksi kuin levykuormituskokeen.

Taulukko 5. Levykuormituskokeen kantavan kerroksen odotusarvot. /16./

Päällysrakenneluokka	Odotusarvot eri päällystetyypeille (MPa)							
	AB, KAB		ÖS		SOP		SR	
	E_2	E_{2min}	E_2	E_{2min}	E_2	E_{2min}	E_2	E_{2min}
1	210	160						
2	210	160						
3	195	145						
4	195	145	180	130				
5	195	145	180	130				
6	195	145	165	115	165	115	130	75

E_2 = Suositeltava odotusarvo kantavuuden keskiarvoksi
 E_{2min} = Suositeltava vähimmäisarvo pienimmälle yksittäiselle kantavuusarvolle

Eri päällysrakenneluokille osoitetut kantavan kerroksen kantavuusarvojen ohjearvot poikkeavat eri mittalaitteilla siten, että pudotuspainokokeen suositellut kantavuuden keskiarvot ovat noin 4–16 % suuremmat kuin levykuormituskokeen. Suositellut vähimmäisarvot pienimmälle yksittäiselle mittaustulokselle ovat pudotuspainolaitteella noin 13–16 % suuremmat kuin levykuormituslaitteella.

Taulukko 6. Pudotuspainolaitteen kantavan kerroksen odotusarvot. /16./

Päällysrakenneluokka	Odotusarvot eri päällystetyypeille (MPa)							
	AB, KAB		ÖS		SOP		SR	
	E ₂	E _{2min}	E ₂	E _{2min}	E ₂	E _{2min}	E ₂	E _{2min}
1	235	185						
2	235	185						
3	215	165						
4	215	165	200	150				
5	215	165	200	150				
6	215	165	180	130	180	130	135	85

E₂ = Suositeltava odotusarvo kantavuuden keskiarvoksi
E_{2min} = Suositeltava vähimmäisarvo pienimmälle yksittäiselle kantavuusarvolle

3.4 Tiehallinnolla käytössä olevat kantavuusarvojen muuntokaavat päällysteen päältä tehtävissä kantavuusmittauksissa

Tiehallinnon urakoissa on käytössä kaava, jolla voidaan laskea levykuormituslaitteen kantavuusarvot pudotuspainolaitteella määritetyn kantavuuden ja päällysteen paksuuden perusteella, yhtälö (3). Lisäksi käytössä on kaava, jolla lasketaan pudotuspainolaitteen kantavuusarvot levykuormituskokeen tulosten ja päällysteen paksuuden perusteella, yhtälö (4). Molemmat yhtälöt ovat numeerisia, kokeellisesti todennettuja, malleja.

$$E_L = 11,1521 \cdot E_p^{0,9210} \cdot h^{-0,4282} \quad (3)$$

Kaavassa E_L = kaavalla laskettava levykuormituskokeen kantavuusarvo (MPa)
 E_p = pudotuspainolaitteella päällysteen päältä mitattu kantavuusarvo (MPa)
 h = päällystepaksuus (mm)

$$E_p = 4,4349 \cdot E_L^{0,4924} \cdot h^{0,3133} \quad (4)$$

Kaavassa E_p = kaavalla laskettava pudotuspainolaitteen kantavuusarvo (MPa)
 E_L = levykuormituslaitteella päällysteen päältä mitattu kantavuusarvo (MPa)
 h = päällystepaksuus (mm)

Yhtälöt on esitetty Oulun yliopistossa vuonna 1991 julkaistussa tutkimuksessa. Pudotuspainolaitteena tutkimuksessa on ollut Phønix-pudotuspainolaite. /17./ Tutkimuksessa on todettu, että levykuormituskokeen tuloksissa esiintyi suurta hajontaa, mikä vaikuttaa tuloksen luotettavuuteen.

4 Teoreettinen tarkastelu

4.1 Yleistä

Seuraavassa on tutkittu Odemarkin yhtälön (5) avulla päällysteen jäykkyysmoduulin vaikutusta päällysteen päältä saataviin kantavuusarvoihin eri päällystepaksuuksilla ja lämpötiloilla. Tuloksia on verrattu käytössä oleviin lämpötilankorjauskertoimiin ja Tiehallinnolla käytössä oleviin pudotuspainolaitteen ja levykuormituslaitteen välisiin kaavoihin, yhtälöt (3) ja (4).

$$E = \frac{E_a}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81\left(\frac{h}{15}\right)^2}}\right) \frac{E_a}{E_y} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81\left(\frac{h}{15}\right)^2 \left(\frac{E_y}{E_a}\right)^{2/3}}} } \quad (5)$$

Kaavassa E = kantavuusarvo (MPa)

E_a = alemman rakennekerroksen kimmomoduuli (MPa)

E_y = ylemmän rakennekerroksen materiaalin kimmomoduuli (MPa)

h = ylemmän rakennekerroksen paksuus (cm)

4.2 Asfalttibetonin jäykkyysmoduulin vaikutus päällysteen päältä saavutettavaan laskennalliseen kantavuusarvoon

Tuloksia laskettaessa on kantavan kerroksen päältä saavutettuna kantavuutena käytetty 180 MPa ja asfalttikerroksen paksuutena 4, 9, 14, 16, 19 ja 22 cm. Käytetyt asfaltin jäykkyysmoduulien arvot tietyssä lämpötilassa on esitetty taulukossa 7. Asfaltin jäykkyysmoduuleina käytettiin 1 Hz:n ja 30–50 Hz:n kuormitustaajuuksilla mitattuja jäykkyysmoduuleja, joista 30–50 Hz vastaa pudotuspainolaitteen kuormitustaajuutta ja 1 Hz:n kuormitustaajuuden todettiin olevan kirjallisuudesta löydettyistä arvoista lähinnä levykuormituslaitteen kuormitustaajuutta.

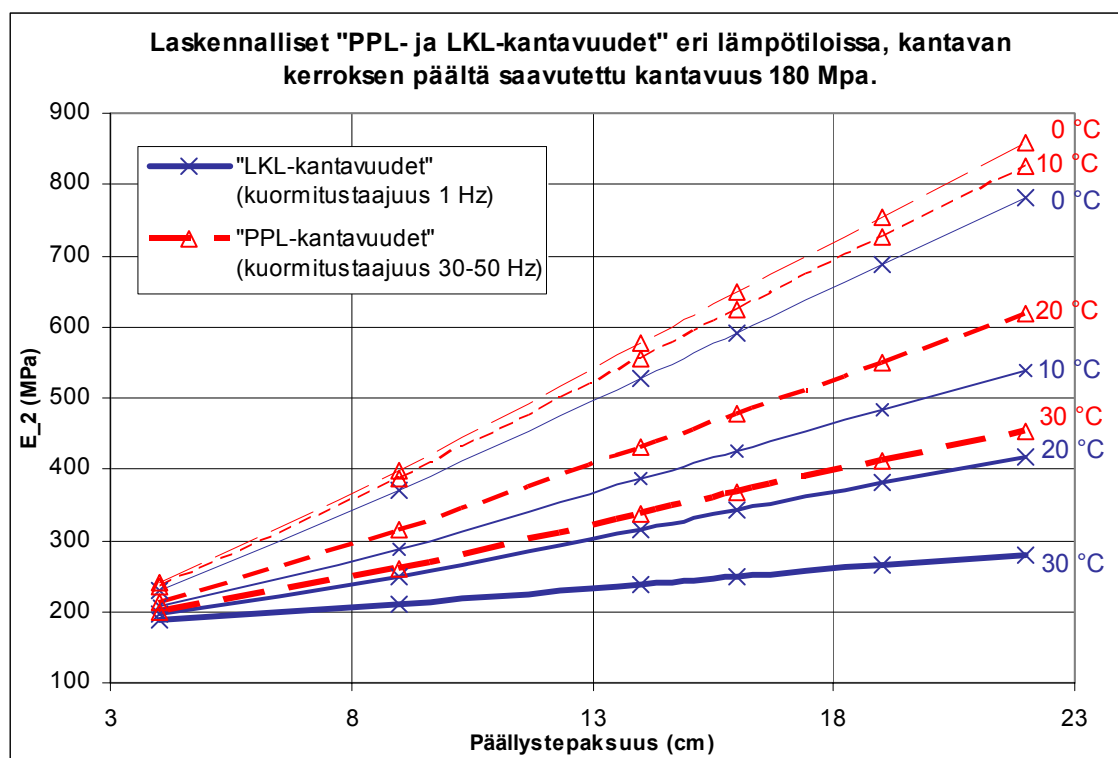
Taulukko 7. Asfalttibetonin jäykkyysmoduulin arvoja eri lämpötiloissa.

Kuormitustaajuuksina 1 ja 30–50 Hz. /2, s.30./

Kuormitustaajuus	1 Hz	30–50 Hz
Päällysteen lämpötila	Jäykkyysmoduuli (MPa)	
0 °C	6800	9000
10 °C	2400	8000
20 °C	1200	3500
30 °C	450	1500

Kuvaajissa ”LKL-kantavuus” on laskennallinen ”staattinen” kantavuus, kun asfalttibetonin jäykkyysmoduulina on käytetty vastaavassa lämpötilassa 1 Hz:n kuormitustaajuudella mitattua moduulia. ”PPL-kantavuus” on vastaava laskennallinen dynaaminen kantavuus, kun päällysteen jäykkyysmoduulina on käytetty 30–50 Hz:n kuormitustaajuudella mitattua moduulia.

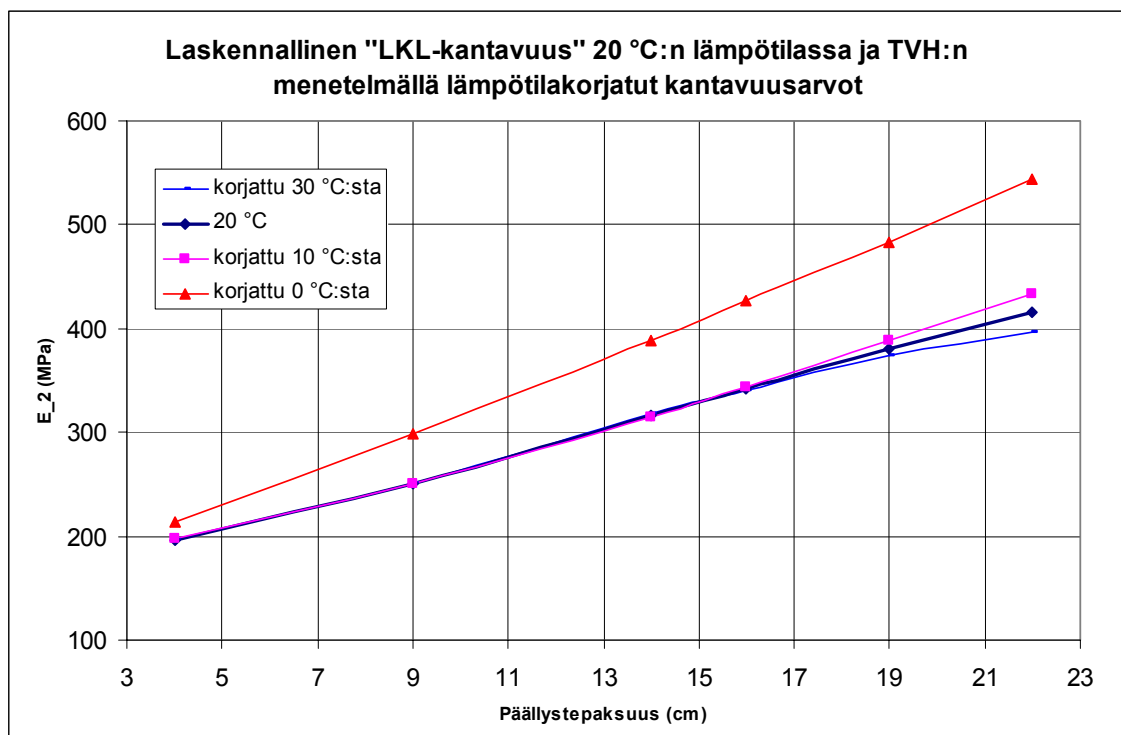
Kuvassa 11 on esitetty päällysteen päältä saatavat laskennalliset LKL- ja PPL-kantavuudet eri lämpötiloissa, kun kantavan kerroksen päältä on saavutettu kantavuus 180 MPa. Liitteen 6 kuvissa 1 ja 2 on esitetty vastaavat LKL- ja PPL-kantavuudet omissa kuvaajissaan.



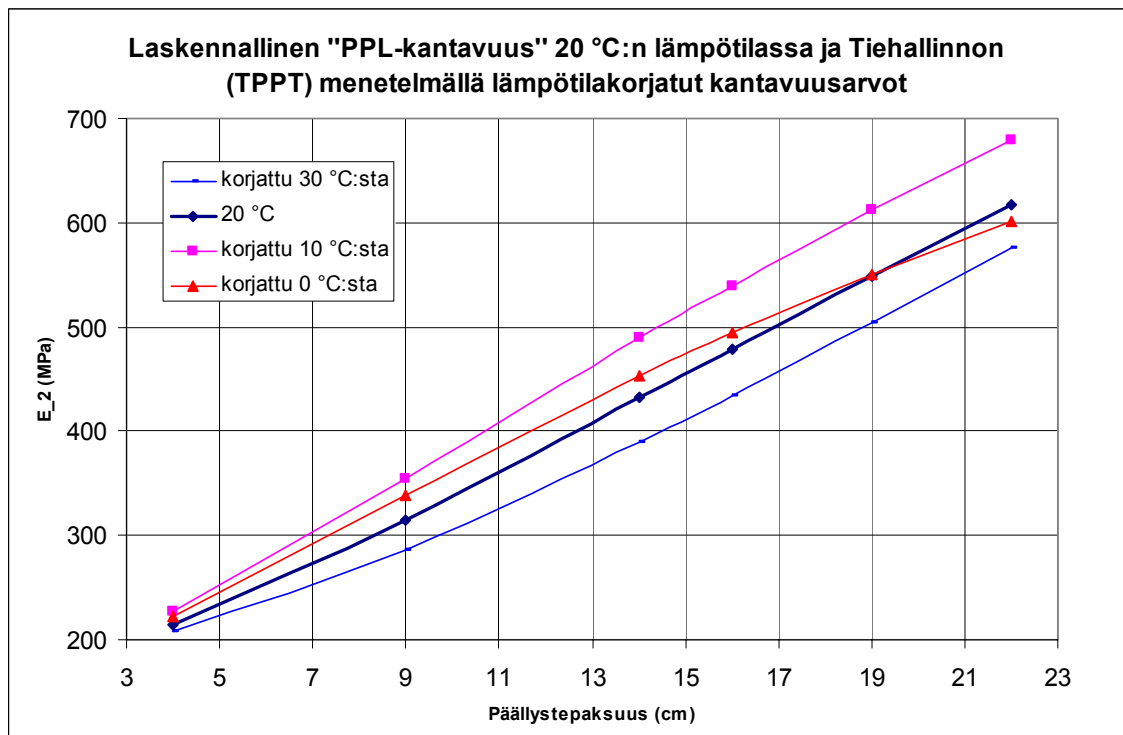
Kuva 11. Laskennalliset kantavuudet 0, 10, 20 ja 30 °C:n lämpötiloissa. Kuvasta on nähtävissä, että erot eri menetelmien kesken kasvavat päällystepaksuuden kasvaessa.

Eri menetelmillä lasketut lämpötilakorjatut kantavuusarvot kuviin 12–13 on saatu määrittämällä ensin laskennalliset ”LKL-” ja ”PPL-” kantavuudet 0, 10 ja 30 °C:n lämpötiloissa. 1 Hz:n kuormitustaajuudella mitattujen jäykkyysmoduulien perusteella lasketut kantavuusarvot on lämpötilakorjattu levykuormituskokeelle tarkoitetulla TVH:n lämpötilakorjauskäyrästä. Kuormitustaajuudella 30–50 Hz määritettyjen jäykkyysmoduulien perusteella lasketut kantavuusarvot on lämpötilakorjattu Tiehallinnon (TPPT) menetelmällä, joka on tarkoitettu pudotuspainolaitteelle.

Liitteessä 6 on esitetty muilla lämpötilakorjausmenetelmillä lasketut kantavuusarvot. 30–50 Hz:n kuormitustaajuudella mitattujen jäykkyysmoduulien perusteella lasketut kantavuusarvot on lämpötilakorjattu 0 °C:n lämpötilassa sekä HKR:n (liite 6, kuva 3) että tiehallinnon menetelmillä ja 10 ja 30 °C:n lämpötiloissa HKR:n, tiehallinnon ja VTT:n (liite 6, kuva 4) menetelmillä. Tiehallinnon menetelmä on kuvaajien selitteissä nimellä TPPT.



Kuva 12. Laskennallinen kantavuus 20 °C:n lämpötilassa ja TVH:n menetelmällä 0, 10 ja 30 °C:n laskennallisista kantavuusarvoista lämpötilakorjatut kantavuusarvot.



Kuva 13. Laskennallinen kantavuus 20 °C:n lämpötilassa ja Tiehallinnon menetelmällä 0, 10 ja 30 °C:n laskennallisista kantavuusarvoista lämpötilakorjatut kantavuusarvot.

4.3 Tulosten tarkastelu

4.3.1 Laskennallisten staattisten ja dynaamisten kantavuusarvojen väliset erot

Kuvasta 11 on nähtävissä, että suhteelliset erot "LKL-kantavuuden" ja "PPL-kantavuuden" välillä kasvavat päällystepaksuuden kasvaessa. Havaittu ilmiö on riippuvainen lämpötilasta siten, että 0 °C:n lämpötilassa suhteelliset erot olivat kaikilla päällystepaksuuksilla pienimmät (taulukko 8). Tämä johtuu siitä, että kyseisessä lämpötilassa myös käytettyjen jäykkyysmoduulien välinen suhteellinen ero oli pienin. Ohuemmissa (< 15 cm) päällystekerroksilla suhteelliset erot olivat suurimmat 10 °C:ssa. Paksummilla (> 15 cm) kerroksilla suhteelliset erot olivat sen sijaan suurimmat 30 °C:n lämpötilassa.

Taulukko 8. Levykuormituslaitteen ja pudotuspainolaitteen laskennallisten kantavuuk-
sien suhde eri päällystepaksuuksilla ja lämpötiloissa.

"PPL-kantavuus" / "LKL-kantavuus"				
H_{AB} (cm)	Päällysteen lämpötila			
	30 °C	20 °C	10 °C	0 °C
4	1,07	1,09	1,15	1,04
9	1,25	1,26	1,35	1,08
14	1,41	1,37	1,44	1,09
16	1,47	1,40	1,47	1,09
19	1,54	1,44	1,50	1,10
22	1,61	1,48	1,53	1,10

4.3.2 Vertailu käytössä oleviin levykuormitus- ja pudotuspainokokeiden välisiin kaavoihin

Tiehallinnon kaavalla (yhtälö (3)) laskennallisista "PPL-kantavuuksista" lasketut levykuormituslaitteen kantavuusarvot (E_L -kantavuudet) on esitetty kuvassa 14. Samassa kuvassa ovat myös yhtälöllä (4) laskennallisista "LKL-kantavuuksista" lasketut pudotuspainolaitteen kantavuusarvot (E_P -kantavuudet).

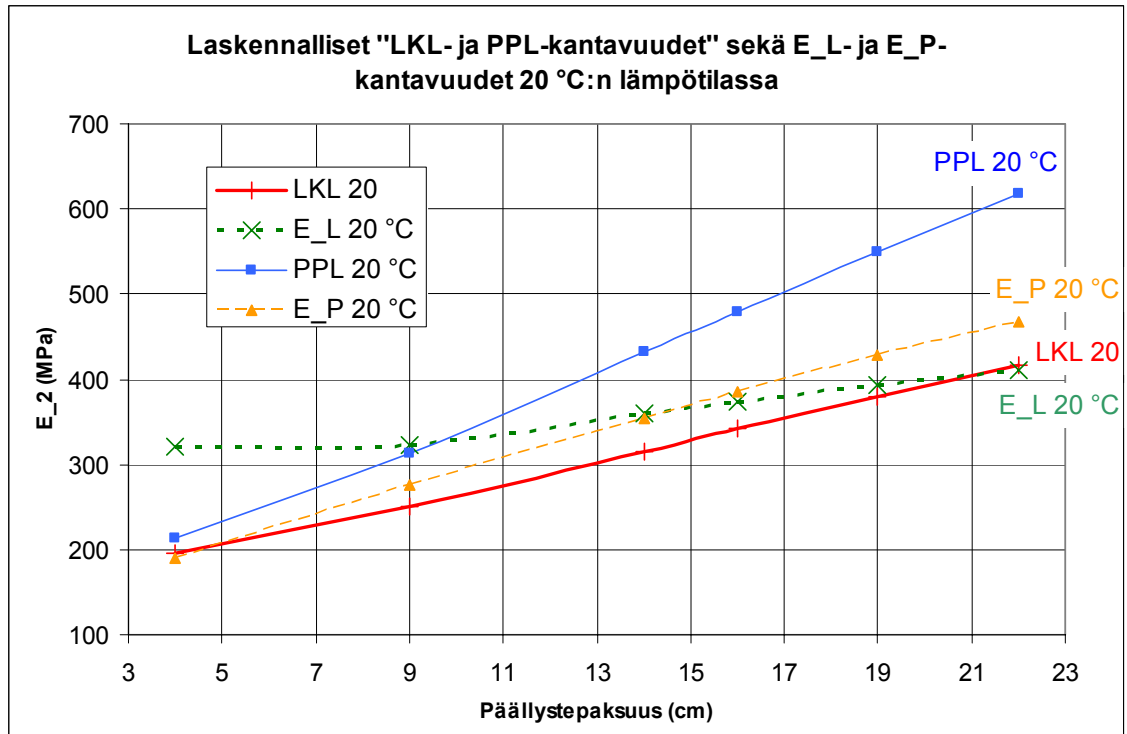
Kaavoja käytetään yleensä siten, että pudotuspainolaitteen kantavuudet halutaan muuntaa levykuormituskokeen kantavuuksiksi, koska tavoitekantavuusvaatimukset ovat usein levykuormituslaitteelle.

Tiehallinnon levykuormitus- ja pudotuspainokokeen välisillä kaavoilla lasketut "EL-" ja "EP-kantavuudet" erosivat joissain tapauksissa hyvinkin suuresti "LKL-" ja "PPL-kantavuuksista". Erityisesti ohuilla päällystekerroksilla Tiehallinnon kaavalla lasketut "EL-kantavuudet" olivat suurempia kuin laskennalliset "LKL-kantavuudet". Kaava siis suosii laskennallisesti pudotuspainolaitteita.

"EP-" ja "PPL-kantavuuksien" välillä suhteelliset erot olivat pienimmillään ohuilla päällystekerroksilla. Asfalttikerroksen paksuuden kasvaessa antoi tiehallinnon kaava sitä pienempiä tuloksia, verrattuna "PPL-kantavuuksiin", mitä suuremmaksi kerrospaksuus nousi.

Kuvassa 14 "EL-kantavuus" tarkoittaa kappaleessa 3.4 esitetyllä Tiehallinnon kaavalla (3) "PPL-kantavuuksista" laskettua levykuormituskoetta vastaavaa kantavuutta. "EP-

kantavuus” tarkoittaa kappaleessa 3.4 esitetyn mukaisesti kaavalla (4) ”LKL-kantavuuksista” laskettua pudotuspainokoetta vastaavaa kantavuutta.



Kuva 14. Laskennalliset ”LKL- ja PPL-kantavuudet” lämpötilan ollessa 20 °C sekä Tiehallinnon kaavoilla lasketut EL- ja EP-kantavuudet samassa lämpötilassa.

4.3.3 Kantavuusarvojen lämpötilakorjausmenetelmät

TVH:n käyrästöllä 10 ja 30 °C:n lämpötiloihin korjatut ”LKL-kantavuudet” eivät eroa Odemarkin menetelmällä lasketuista ”LKL-kantavuuksista” juuri lainkaan, ja merkittävää ero on ainoastaan yli 19 cm:n päällystekerroksilla (kuva 12). 0 °C:n lämpötilassa erot kasvavat kaikilla päällystepaksuuksilla merkittäviksi. Teoreettisten laskelmien perusteella voidaan sanoa, ettei levykuormituskoetta tule tehdä päällysteen päältä lähellä 0 °C:n lämpötilaa.

Pudotuspainolaitteelle tarkoitettulla lämpötilakorjausmenetelmillä ovat Tiehallinnon kaavalla korjatut kantavuudet keskimäärin lähimpänä Odemarkin menetelmällä laskettuja laskennallisia kantavuuksia (kuva 13). Toisaalta VTT:n ja HKR:n menetelmillä alle 15

cm:n päällystepaksuuksilla 10 °C:n lämpötilasta korjatut kantavuudet olivat lähempänä laskennallisia arvoja kuin Tiehallinnon vastaavat (liite 6, kuvat 3 ja 4).

5 Tutkimukset kesinä 2004 ja 2005

5.1 Yleistä

Kesällä 2004 suoritettut mittaukset on tehty Helsingin kaupungin alueella sijaitsevilla kadunrakennuskohteilla. Teoreettisia laskelmia varten kohteet tutkittiin pohjamaasta lähtien. Vuoden 2004 kohteina olivat Laivanrakentajantie, Ojatie, Koivumäentie sekä Vuotien ja Aurinkotuulenkadun risteyksessä sijaitseva linja-autojen kääntöpaikka. Loput kohteista on tutkittu kesä-, heinä- ja syyskuussa 2005.

Kesän 2005 tutkimuskohteet olivat Helsingin kaupungin alueella sijaitsevia uudisrakennus- ja parannuskohteita. Kohteiksi valittiin uudisrakennus- ja parannuskohteita, joissa kantavan kerroksen mittaaminen kuuluu muutenkin katulaboratorion tehtäviin. Kantavan kerroksen päältä suoritettut mittaukset on tehty vuosien 2003 ja 2004 aikana.

Kantavaa kerrosta ei mitattu kesän 2005 kohteissa muilla mittalaitteilla kuin levykuormituslaitteella, koska laitteiden tulokset näyttäisivät sekä aiempien tutkimusten että kesällä 2004 suoritettujen mittausten valossa olevan yhteneväisiä. Kuitenkin katsottiin olevan tarpeellista, että kantava kerros on jollakin mittalaitteella mitattu. Näin voitiin seurata, että sekä mitatut että laskennalliset tulokset ovat ainakin tähän kerrokseen asti samansuuntaisia. Kaikista kohteista myös määriteltiin laskennallisesti ”toteutuneet” asfaltin jäykkyysmoduulit eri mittalaitteilla.

Vuoden 2004 kohteissa kantavuudet kantavan kerroksen ja päällysteen päältä on mitattu samoista kohdista. Vuoden 2005 kohteista ei ollut tiedossa tarkkoja tietoja kantavan kerroksen mittauspisteiden sijainnista. Kantavuudet päällysteen päältä on mitattu samoilta katuosuuksilta kuin kantavan kerroksen päältä, mutta mittauspisteet ovat sijainneet eri kohdissa.

5.2 Tutkimuskohteiden rakenteet

Pohjamaan kantavuusarvot on niissä kesällä 2004 mitatuissa kohteissa, joissa se on ollut mahdollista, mitattu pelkästään kannettavalla Loadman-pudotuspainolaitteella.

Tämä on tehty siksi, että sitomattomilla kerroksilla ei esiinny huomattavia eroavaisuuksia eri kantavuusmittalaitteilla mitattujen kantavuusarvojen välillä. Lisäksi Loadmanin liikuteltavuus usein vaikeapääsyisiin kaivantoihin on huomattavasti parempi kuin muiden mittalaitteiden. Vuoden 2004 tutkimuskohteiden rakennekerrokset on esitetty taulukossa 9.

Kesän 2005 tutkimuskohteiden rakenteista ei ollut selvillä toteutuneita rakennekerroksia, joten niiden on oletettu toteutuneen suunniteltujen KT-02:n katuluokkien mukaisten rakenteiden mukaan. Päälysteen paksuudet selvitettiin poranäytteillä. Taulukossa 10 on esitetty vuoden 2005 kohteet ja rakennetiedot.

Taulukko 9. Kesän 2004 tutkimuskohteiden rakennekerrokset.

Kohde	Pohjamaa	Jakava kerros	Kantava kerros	Päälyste
1. Koivumäentie	Hiekka	Sr & Hk	KaM	AB 16
Kerrospaksuus	-	900 mm	200 mm	50 mm
2. Ojatie	Savi	KS & Pohjatuhka	BeM II & KaM 0-16 mm	ABK 32 & AB 16
Kerrospaksuus	-	900 mm & 600 mm	400 mm & 50 mm	100 mm
3. Laivanrakentajantie	Hiekka	KaM 0/55 mm	KaM 0-90 mm & 32 mm	ABK 32
Kerrospaksuus	-	1000 mm	100 mm & 50...100 mm	120 mm
4. Vuotie / Aurinkotuulenkatu, kääntöpaikka	HkKaM	KaM 0/75 mm	KaM 32 mm	ABK 32
Kerrospaksuus	-	100–500 mm	~100 mm	60 mm

Taulukko 10. Kesän 2005 tutkimuskohteiden katuluokat ja mitatut päälystepaksuudet.

Kohde	Katuluokka	Päälystepaksuus
5. Jokisuuntie	Vanhat rakenteet	11 cm
6. Gustav Pauligin katu	3D	26 cm
7. Maustetehtaankatu	3D	8 cm
8. Solvikinkatu	3D	12 cm
9. Aurinkotuulenkatu	3D/E	13 cm
10. Pienen Villasaaren tie	4E	9 cm
11. Pienen Villasaaren kuja	4E	5 cm
12. Maaherrantie	3E	20 cm
13. Latokartanonkaari	3A	5 cm
14. Suunnittelijankatu	3D/E	17 cm
15. Insinöörinkatu	3E	18 cm
16. Leilikuja	Vanhat rakenteet	9 cm
17. Selim Lindqvistin kuja	Vanhat rakenteet	9 cm
18. Kalkkivuorenkuja	Vanhat rakenteet	10 cm
19. Luokomiehentie jk	Vanhat rakenteet	5 cm

5.3 Teoreettiset kantavuudet

Kesän 2004 tutkimuskohteiden laskennalliset kantavuudet määritettiin Odemarkin likimääräismenetelmällä, yhtälö (5). Kohteissa, joissa pohjamaan kantavuus oli mahdollista mitata, käytettiin pohjamaan kimmomoduulina kannettavalla Loadman-pudotuspainolaitteella mitattuja kantavuusarvoja ja muiden rakennekerrosten kimmomoduuleina Kunnallisteknisten töiden yleisen työselostuksen 2002 (KT-02) pohjamaan kantavuusluokitusarvoja /18, Liite 2000/1 /. Bitumilla sidottujen kerrosten kimmomoduulina on käytetty KT-02:n kantavuusvaatimuslaskelmiin käytettyä ainevakiota 2500 MPa /18, Liite 2000 /4 /. Kesän 2005 kohteiden laskennallisina kantavuuksina on käytetty KT-02:n katuluokkien mukaisia tavoitekantavuusarvoja. Päällysteen päältä saavutettava laskennallinen kantavuus määritettiin käyttämällä kantavan kerroksen kantavuutena levykuormituslaitteella mitattuja arvoja. Laskennalliset kantavuusarvot ovat esillä taulukossa 11.

Kohteissa, joiden rakennekerrokset eivät olleet tiedossa, on kantavan kerroksen kantavuuksina käytetty levykuormituslaitteella mitattuja kantavuusarvoja. Sitomattomien kerrosten kantavuusarvot laskettiin korkeintaan 30 cm:n kerroksina ja siten, että ylemmän kerroksen kimmomoduulina käytettiin korkeintaan 6 kertaa suurempaa arvoa kuin alemman.

Seuraavassa on laskettu esimerkkinä Odemarkin menetelmän käytöstä Vuotien ja Aurinkotuulenkadun risteyksessä sijaitsevan kääntöpaikan laskennallinen kantavuus-arvo pisteessä 2. Pohjamaan kimmomoduulina 100 MPa, tuki- ja kantavan kerroksen 300 MPa ja asfalttipäällysteen 2500 MPa. Kantavuudet laskettu kaavalla (3).

Tukikerroksen kantavuus:

$$E = \frac{100}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81\left(\frac{30}{15}\right)^2}}\right) \frac{100}{300} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81\left(\frac{30}{15}\right)^2 \left(\frac{300}{100}\right)^{\frac{2}{5}}}}} \approx 188 (MPa)$$

Kantavan kerroksen kantavuus:

$$E = \frac{188}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81\left(\frac{10}{15}\right)^2}}\right) \frac{188}{300} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81\left(\frac{10}{15}\right)^2 \left(\frac{300}{188}\right)^{\frac{2}{3}}}}} \approx 207 \text{ (MPa)}$$

Kantavuus asfaltin päällä:

$$E = \frac{207}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81\left(\frac{5}{15}\right)^2}}\right) \frac{207}{2500} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81\left(\frac{5}{15}\right)^2 \left(\frac{2500}{207}\right)^{\frac{2}{3}}}}} \approx 251 \text{ (MPa)}$$

Taulukko 11. Tutkimuskohteiden laskennalliset kantavuudet sekä levykuormituskokeen kantavan kerroksen mittaustulokset. Päällysten laskennallinen kantavuus on määritetty LKL:lla kantavasta kerroksesta mitattujen kantavuuksien perusteella.

Kohde	kantava kerros E ₂ -laskenn. (MPa)	kantava kerros E ₂ -mitattu (MPa)	päällyste E ₂ -laskenn. (MPa)
1. Koivumäentie	233		
2. Ojatie	304		
3. Laivanrakentajantie	290	289	496
4. Aurinkotuulenkatu kp	216	211	271
5. Jokisuuntie		160	303
6. Gustav Pauligin katu	154	205	670
7. Maustetehtaankatu	154	192	286
8. Solvikinkatu	154	204	384
9. Aurinkotuulenkatu	154 / 137	163	345
10. Pienen Villasaarentie	148	218	338
11. Pienen Villasaaren kuja	148	173	213
12. Maaherrantie	137	168	487
13. Latokartanonkaari	300	187	229
14. Suunnittelijankatu	154 / 137	174	441
15. Insinöörinkatu	137	174	460
16. Leilikuja		147	249
17. Selim Lindqvistin kuja		147	249
18. Kalkkivuorenkuja		196	331
19. Luokomiehentie jk		145	183

5.4 Mittaustulokset

Seuraavassa esitetään kesän 2004 ja 2005 tutkimuskohteiden päällysteen päältä saavutetut mittaustulokset taulukoituna (taulukko 12). Päällysteen päältä mitatut kohteiden pistekohtaiset mittaustulokset ovat esillä liitteessä 7. Levykuormituslaitteella mitatut kantavuusarvot on lämpötilakorjattu TVH:n käyrästöllä ja pudotuspainolaitteiden arvot Tiehallinnon kaavalla. Levykuormituslaitteella mitatut kantavan kerroksen mittaustulokset ovat esillä liitteessä 8.

Laitekohtaisten lämpötilakorjattujen yksittäisten mittauspisteiden normaalisuus testattiin ja aineisto osoittautui normaalijakauman mukaiseksi. Kantavuusmittaustulokset noudattavat logNorm-jakaumaa. Tällöin mitattujen E_2 -arvojen logaritmit ovat normaalisti jakautuneita. Testattavina arvoina ovat kantavuustulosten logaritmit, koska kantavuusmittaustulokset eivät voi saada negatiivisia arvoja.

Taulukko 12. Kesän 2004 ja 2005 tutkimuskohteiden mittaustulokset kohteittain mitaus- (T_{mit}) ja referenssilämpötiloissa (T_{ref}).

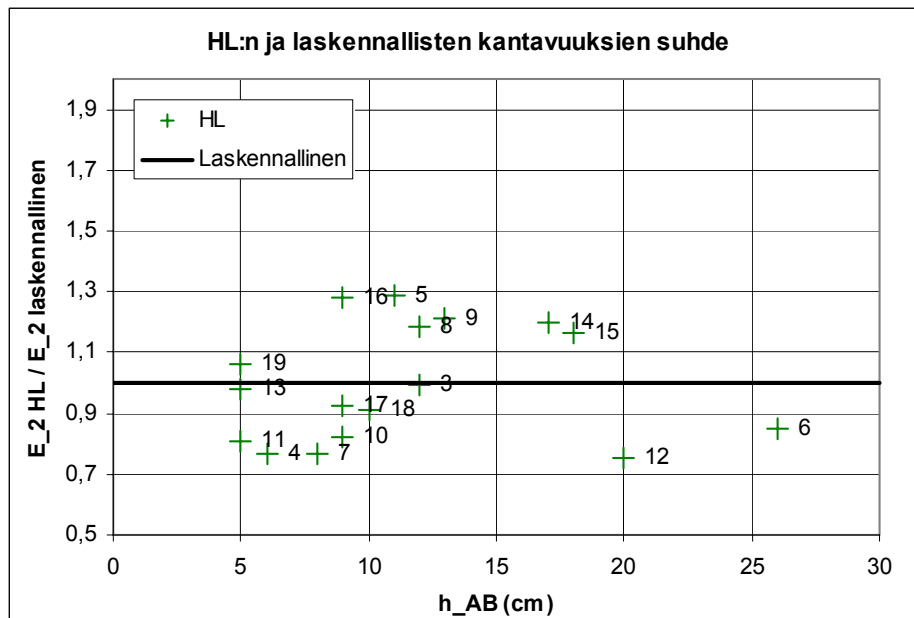
KOHDE	LAITEKOHTAISET MITTAUSTULOKSET					
	E_2 (MPa)					
	HL (T_{mit})	HL (T_{ref})	LKL (T_{mit})	LKL (T_{ref})	KUAB (T_{mit})	KUAB (T_{ref})
1. Koivumäentie	318	303	303	286		
2. Ojatie	429	417	349	324		
3. Laivanrakentajantie	580	548	289	335		
4. Aurinkotuulenkatu kp	211	209	242	237		
5. Jokisuuntie	360	389	290	339		
6. Gustav Pauligin katu	713	569	507	416	760	675
7. Maustetehtaankatu	234	220	312	281	332	329
8. Solvikinkatu	617	564	395	340	558	552
9. Aurinkotuulenkatu	456	419	374	321	532	532
10. Pienen Villasaaren tie	293	278	299	272	386	380
11. Pienen Villasaaren kuja	177	172	239	229	272	273
12. Maaherrantie	381	367	324	301	655	587
13. Latokartanonkaari	218	224	292	301	331	327
14. Suunnittelijankatu	541	597	346	407	766	741
15. Insinöörinkatu	470	536	512	425	880	836
16. Leilikuja	338	318	299	266	298	301
17. Selim Lindqvistin kuja	244	230	235	209	258	251
18. Kalkkivuorenkujja	293	301	268	290	335	335
19. Luokomiehentie jk	192	194	194	198	177	178

5.5 Tulosten analysointi

Eri mittalaitteilla mitattuja tuloksia on verrattu sekä laskennallisiin kantavuusarvoihin (kuvat 15–17) että toisiinsa (kuvat 18–23). Kaikille mittaustuloksille sekä kohdekohtaisille keskiarvoille on myös laskettu keskinäiset korrelaatiot (taulukot 14 ja 15). Lisäksi tuloksia on verrattu Tiehallinnon urakoissa käytössä olevaan levykuormituslaitteen ja pudotuspainolaitteen väliseen kaavaan. Mittaustuloksista laskettiin myös takaisin eri mittalaitteilla havaitut päällysteen jäykkyyshmoduulit.

5.5.1 Vertailu teoreettisiin kantavuuksiin

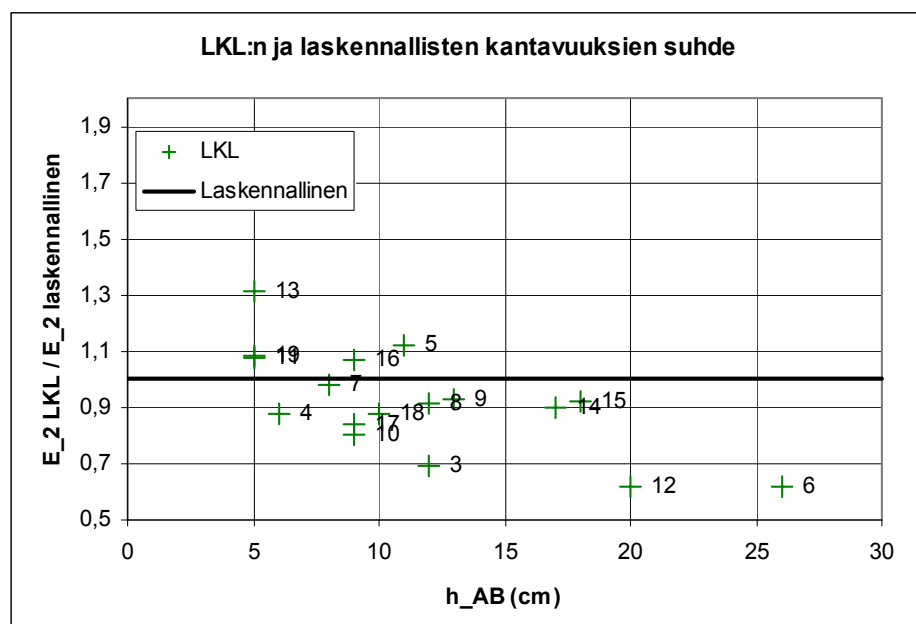
Mittalaitteilla päällysteen päältä mitattuja E_2 -arvoja ja Odemarkin menetelmällä määritettyjä laskennallisia kantavuusarvoja on verrattu toisiinsa suhteellisten erojen avulla. Suhteelliset erot on laskettu referenssilämpötilaan korjattujen mittaustulosten avulla. Teoreettisten kantavuuksien ja mittaustulosten välisistä eroavaisuuksista on piirretty kuvat, joissa suhteelliset eroavaisuudet on esitetty päällystepaksuuden funktiona (kuvat 15–17).



Kuva 15. Heavy Loadmanin mittaustulosten ja laskennallisten kantavuuksien suhde referenssilämpötilassa. Pisteiden selitteenä on kohteen numero.

Kuvasta 15 voidaan havaita, että suhteellinen ero Heavy Loadmanin ja laskennallisten kantavuuksien välillä suurenee päällystepaksuuden kasvaessa, lukuun ottamatta pisteitä 6 ja 12. Heavy Loadmanilla mitatut kantavuudet ovat keskimäärin samat kuin teoreettiset. Pienimmillään Heavy Loadmanilla mitattu kantavuus on ollut 25 % pienempi ja suurimmillaan 29 % suurempi kuin laskennallinen kantavuus.

Levykuormituslaitteen ja laskennallisten kantavuuksien välillä ei ole havaittavissa samanlaista riippuvuutta päällystepaksuudesta kuin Heavy Loadmanilla (kuva 16). Suhteelliset erot pysyvät tasaisina asfalttikerroksen paksuudesta huolimatta. Onkin ilmeistä, että Kunnallisteknisten töiden yleisessä työselostuksessa ilmoitetut tavoitekantavuusarvot on aikoinaan määritetty levykuormituslaitteelle. Työssä käytetyistä mittalaitteista levykuormituslaitteen suhteelliset eroavaisuudet myös poikkeavat vähiten laskennallisista tavoitekantavuuksista. Keskimäärin mittaustulokset ovat 8 % pienempiä kuin teoreettiset. Pienimmillään levykuormituslaitteella mitattu kantavuus on ollut 38 % pienempi ja suurimmillaan 31 % suurempi kuin laskennallinen kantavuus.



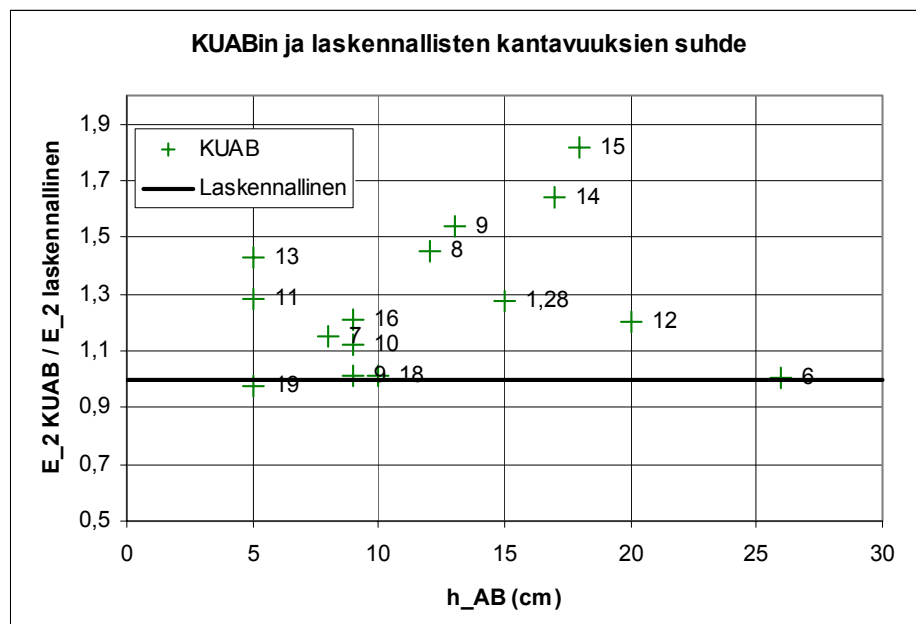
Kuva 16. Levykuormituslaitteen mittaustulosten ja laskennallisten kantavuuksien suhde referenssilämpötilassa. Pisteiden selitteenä on kohteen numero.

Kuten kuvasta 17 on nähtävissä, myös KUABin ja laskennallisten tavoitekantavuuksien välinen ero suurenee päällystepaksuuden kasvaessa. Suhteelliset eroavaisuudet olivat

KUABilla kaikkein suurimmat, keskimäärin mittaustulokset olivat 28 % teoreettisia suuremmat. Myös suhteiden vaihteluväli oli vertailujen suurin. Pienimmillään KUABilla mitattu kantavuus on ollut 3 % pienempi ja suurimmillaan 82 % suurempi kuin laskennallinen kantavuus.

Eryteisesti Heavy Loadmanilla ja KUABilla päällystepaksuuksilla 20 ja 26 cm havaitut eroavaisuudet poikkeavat muusta aineistosta. Syynä tähän on luultavasti se, että keskimääräisen lämpötilan määrittäminen näin paksuilla päällystekerroksilla on hyvin epävarmaa. Käytetty keskimääräisen lämpötilan määrittämissäyrästäkin ulottuu vain päällystepaksuuteen 20 cm asti ja 26 cm päällysteen pintalämpötila on muutettu keskimääräiseksi ekstrapoloimalla. Tällöin myös mitatun E-moduulin lämpötilakorjaus vääristyy.

Vaikka poikkeavuus ei ole yhtä selkeästi nähtävissä levykuormituslaitteella on tuloksiin suhtauduttava kriittisesti. Levykuormituslaitteen kantavuusarvojen lämpötilakorjauskäyrästäön suurin päällystepaksuus on 20 cm ja korjauskerroin 26 cm:n päällystepaksuudelle on saatu ekstrapoloimalla.

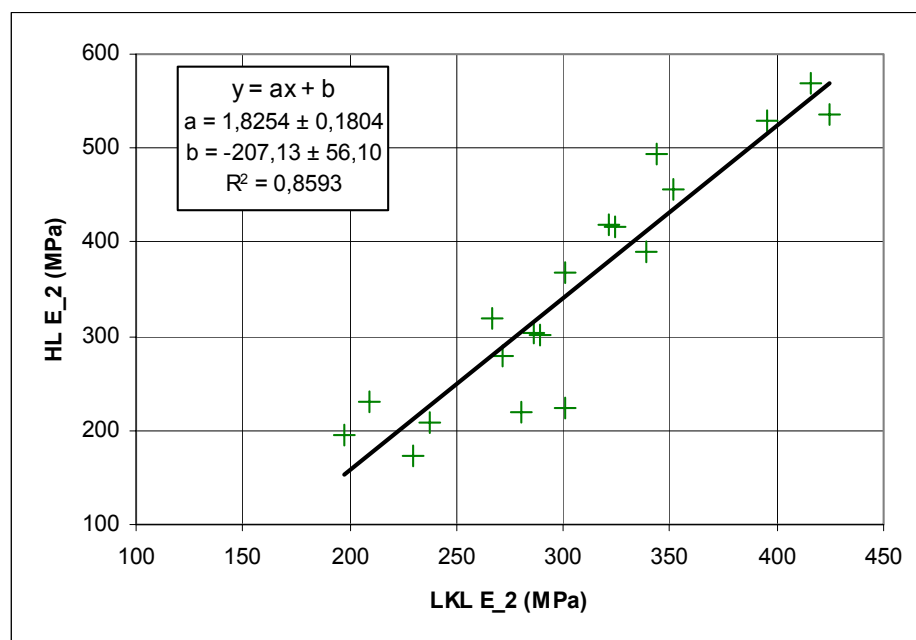


Kuva 17. KUABin mittaustulosten ja laskennallisten kantavuuksien suhde referenssilämpötilassa. Pisteiden selitteenä on kohteen numero.

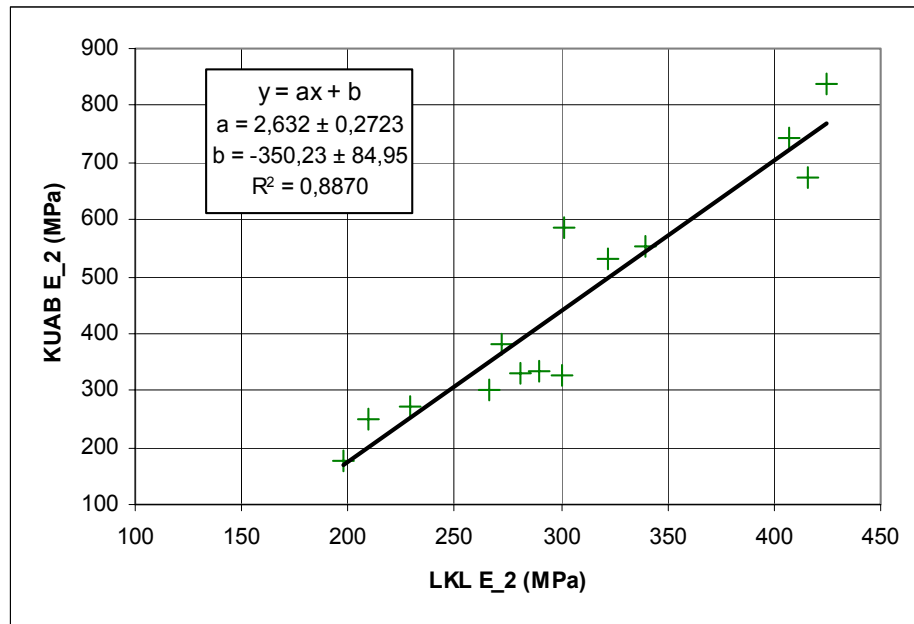
5.5.2 Laitevertailu

Seuraavassa on vertailtu työssä käytettyjen kantavuusmittalaitteiden lämpötilakorjattuja tuloksia. Ennen vertailuja mittaustulokset tutkittiin lineaarisella suoran sovituksella. Standardoitujen residuaalien perusteella havaintoaineistosta poistettiin seuraavat Heavy Loadmanin mittaustulokset: Solvikinkadun pisteet 3 ja 6, Suunnittelijankadun piste 5 sekä Laivanrakentajankadun pisteet 1 ja 6. Pisteiden poistamisen jälkeen myös kohteiden keskimääräiset kantavuudet laskettiin uudelleen. Kuvissa 18–20 on esitetty eri mittalaitteiden kohdekohtaisten keskiarvojen keskinäiset riippuvuudet.

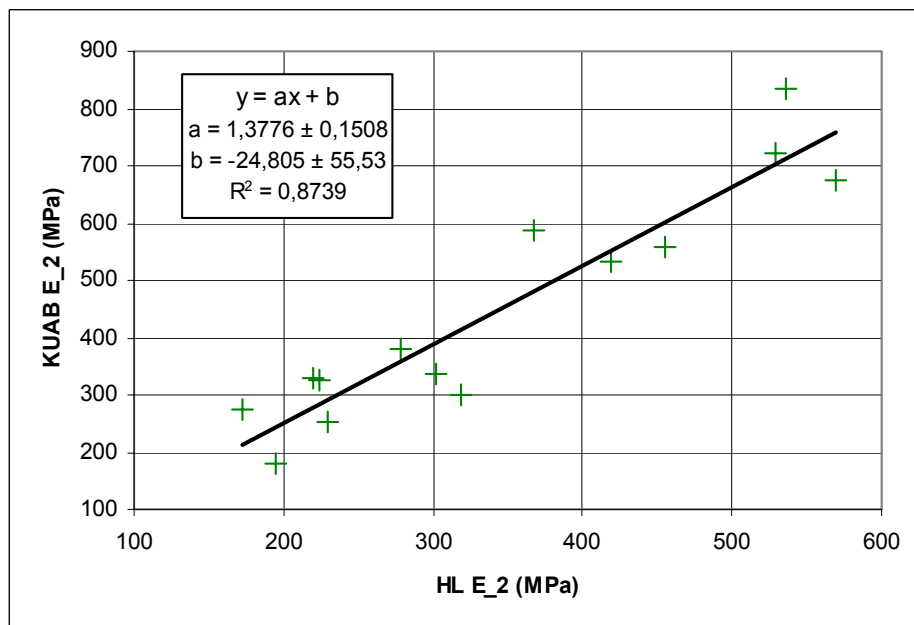
Kaikista kuvaajista on havaittavissa, että mittalaitteiden kantavuusmittaustulosten välillä on selkeä riippuvuus.



Kuva 18. Heavy Loadmanin lämpötilakorjatut mittaustulokset levykuorituslaitteen mittaustulosten funktiona, sekä pisteiden välille sovitettu trendiviiva ja sen yhtälö.



Kuva 19. KUABin lämpötilakorjatut mittaustulokset levykuormituslaitteen mittaustulosten funktiona.

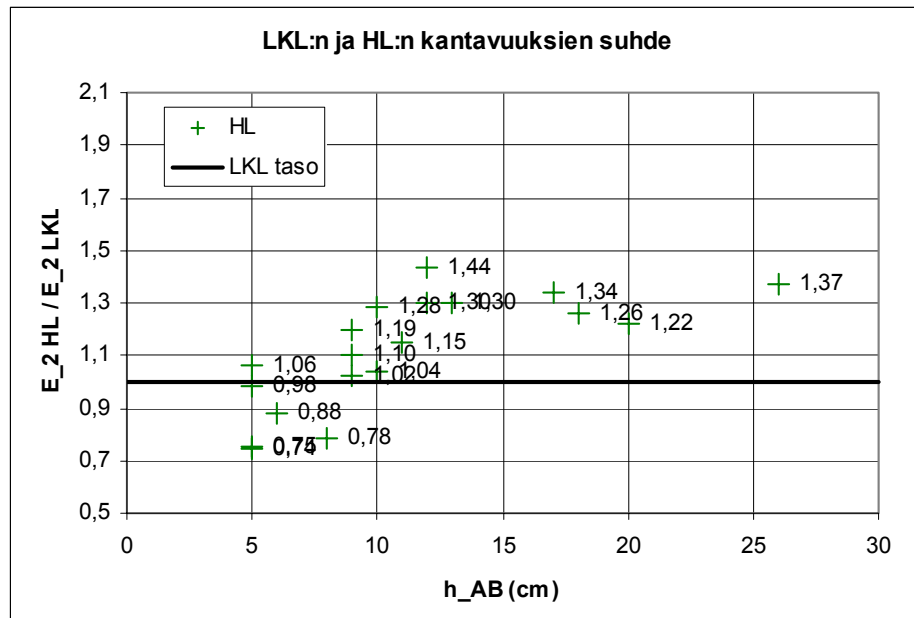


Kuva 20. KUABin lämpötilakorjatut mittaustulokset Heavy Loadmanin mittaustulosten funktiona.

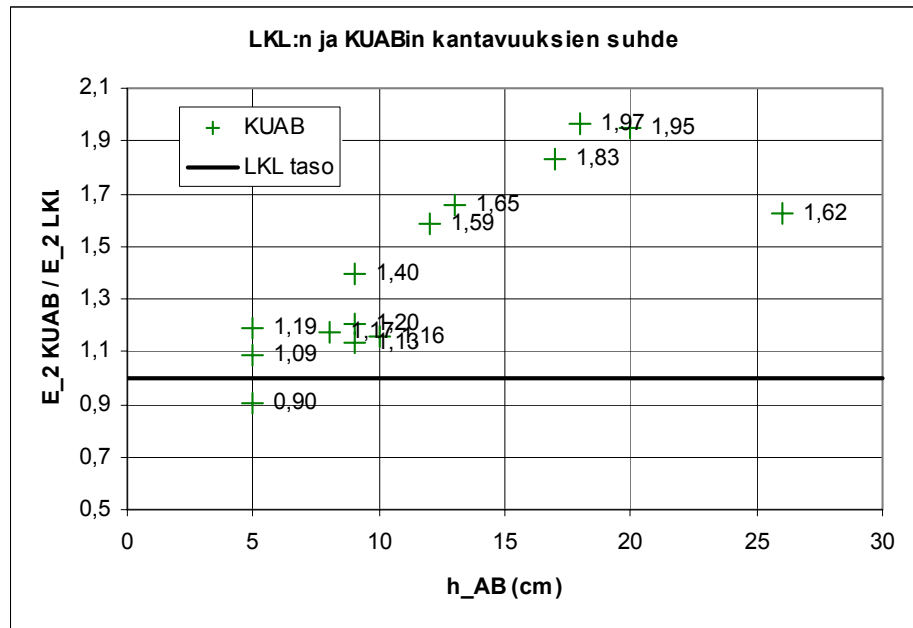
Mittalaitteiden lämpötilakorjattujen tulosten suhteellisten eroavaisuuksien perusteella (kuvat 21–23) havaittiin, että sekä Heavy Loadmanin ja LKL:n että KUABin ja LKL:n väliset suhteelliset erot suurenivat päällystepaksuuden kasvaessa. Heavy Loadmanin

ja KUABin väliset suhteelliset erot pysyivät sen sijaan samansuuruisina asfaltin paksuudesta huolimatta. Havainnot tukevat siis edellä ollutta teoreettista tarkastelua. Heavy Loadmanin ja KUABin suhteelliset eroavaisuudet levykuormituslaitteeseen verrattuna käyttäytyvät samankaltaisesti kuin verrattaessa niitä laskennallisiin kantavuuksiin.

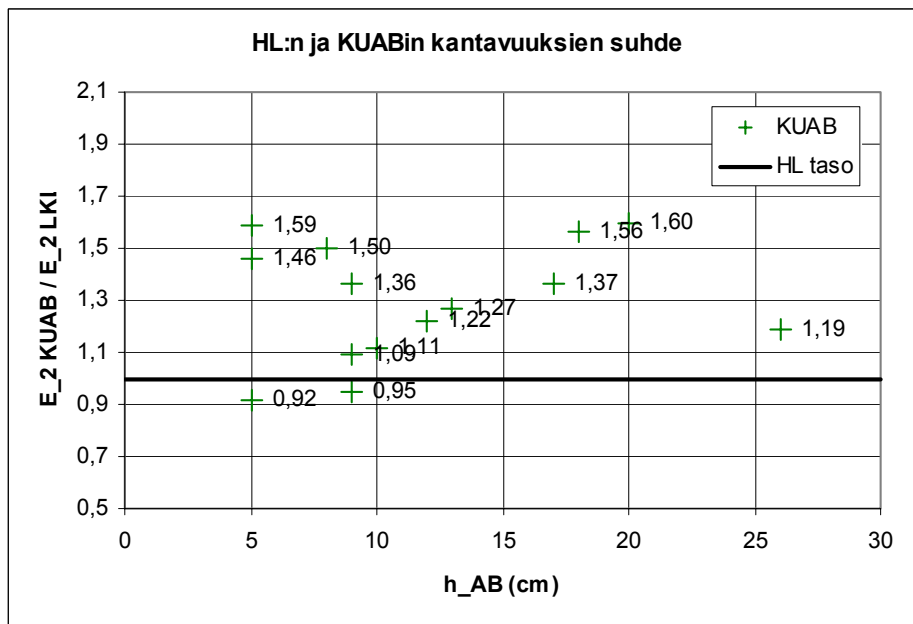
Kuvaajista on myös nähtävissä, että ohuilla päällystepaksuuksilla pudotuspainolaitteiden kantavuusmittausarvot ovat pienempiä kuin levykuormituslaitteella mitatut. Heavy Loadmanilla saavutetaan pienempiä E-moduulin arvoja noin alle 5-8 cm paksuisilla päällysteillä. KUABilla taas on odotettavissa levykuormituslaitetta pienempiä mittaus tuloksia noin alle 5 cm asfalttikerroksilla.



Kuva 21. Heavy Loadmanilla ja levykuormituslaitteella mitattujen lämpötilakorjattujen kantavuuksien suhde.



Kuva 22. KUABilla ja levykuormituslaitteella mitattujen lämpötilakorjattujen kantavuuksien suhde.



Kuva 23. Heavy Loadmanilla ja KUABilla mitattujen lämpötilakorjattujen kantavuuksien suhde.

5.5.3 Korrelaatiot

Mittaustuloksille määritettiin korrelaatiokertoimet niiden lineaarisen riippuvuuden testaamiseksi. Korrelaatiot laskettiin sekä eri mittalaitteiden tulosten välille että mittalaitteiden ja laskennallisten kantavuuksien välille. Eri laitteiden välille laskettiin korrelaatiot kaikkien mittapisteiden perusteella (taulukko 14) ja kohdekohtaisten keskiarvojen perusteella (taulukko 15). Laskennallisten ja mittalaitteilla mitattujen kantavuusarvojen väliset korrelaatiot laskettiin keskiarvokantavuuksien perusteella (taulukko 16). Laskuja varten tuloksista poistettiin kohdassa 5.4.2 osoitetut mittaustulokset.

Korrelaatiokertoimille laskettiin myös merkitsevyydet, jotka on merkitty kertoimien perään taulukon 13 mukaisesti. Kaikki korrelaatiokertoimet havaittiin tilastollisesti erittäin merkitsevästi nolasta poikkeaviksi.

Taulukko 13. Korrelaatioiden tilastollisen merkitsevyyden merkitseminen.

merkitsevyytaso	tilastollinen merkitsevyys	merkintä
0,05	melkein merkitsevä	*
0,01	merkitsevä	**
0,001	erittäin merkitsevä	***

Taulukko 14. Yksittäisten mittapisteiden keskinäiset korrelaatiot referenssilämpötilassa.

	LKL (T_{ref})	HL (T_{ref})	KUAB (T_{ref})
LKL (T_{ref})	-	0,8057***	0,8931***
HL (T_{ref})	0,8057***	-	0,8902***
KUAB (T_{ref})	0,8931***	0,8902***	-

Korrelaatiot kaikkien mittalaitteiden välillä olivat hyviä. Kaikkien mittapisteiden perusteella paras laitteiden välinen korrelaatio on levykuormituslaitteella ja KUABilla. Kuten taulukosta 15 voidaan havaita, mittalaitteiden kohdekohtaiset keskiarvotulokset korreloivat keskenään erittäin hyvin. Edelleen paras korrelaatio on levykuormituslaitteen sekä KUABin välillä. Toisaalta KUABille kertyi kohteita ainoastaan 14, kun niitä muilla mittalaitteilla oli 19. Mittapisteitä levykuormituslaitteella ja Heavy Loadmanilla oli vertailuista poistettujen pisteiden jälkeen yhteensä 104 ja KUABilla 79.

Taulukko 15. Päällysteen päältä mitattujen kohdekohtaisten

keskiarvojen keskinäiset korrelaatiot referenssilämpötilassa.

	LKL (T_{ref})	HL (T_{ref})	KUAB (T_{ref})
LKL (T_{ref})	-	0,9270***	0,9418***
HL (T_{ref})	0,9270***	-	0,9348***
KUAB (T_{ref})	0,9418***	0,9348***	-

Taulukko 16. Päälysteen päältä saatujen mittaustulosten ja laskennallisten kantavuuksien väliset korrelaatiot referenssilämpötiloissa.

Mittalaite	korrelaatio (T_{ref})
LKL	0,8062***
HL	0,8612***
KUAB	0,8404***

Mittaustulosten ja laskennallisten kantavuuksien välisillä korrelaatioilla ei ole eri menetelmien kesken merkittäviä eroja. Tämä osoittaa sen, että kaikki mittalaitteet soveltuvat samantasoisesti päälysteen päältä suoritettaviin kantavuusmittauksiin. Parhaiten laskennallisten tulosten kanssa korreloivat Heavy Loadmanin tulokset.

5.5.4 Vertailu tiehallinnon pudotuspaino- ja levykuormituslaitteen väliseen kaavaan

Seuraavassa on vertailtu yhtälöillä (3) ja (4) laskettuja kantavuusarvoja sekä kesän 2004 ja 2005 tutkimuskohteista mitattuja kantavuusarvoja (taulukot 17 ja 18).

Heavy Loadmanin ja levykuormituslaitteen tulosten perusteella lasketut mittalaitteiden kantavuusarvot poikkeavat Heavy Loadmanilla ja levykuormituslaitteella mitatuista, kuten taulukosta 17 on nähtävissä. Levykuormituslaitteelle kaavan (3) mukaan lasketut tulokset ovat keskimäärin 9,5 % suurempia ja kaavan (4) mukaan Heavy Loadmanille määritetyt 4,1 % pienempiä kuin mitatut arvot. Pienimmillään kaavalla (3) laskettu kantavuus on ollut 15 % pienempi ja suurimmillaan 41 % suurempi kuin levykuormituskokeella mitattu. Kaavalla (4) laskettu kantavuus on pienimmillään ollut 32 % pienempi ja suurimmillaan 28 % suurempi kuin Heavy Loadmanilla mitattu.

Taulukko 17. Heavy Loadmanin tulosten perusteella lasketut levykuormituskokeen kantavuusarvot ($E_{L, HL}$), LKL:n tulosten perusteella lasketut Heavy Loadmanin kantavuusarvot ($E_{p, HL}$) ja sekä LKL:n että HL:n mittaustulokset sekä laskettujen tulosten suhde mitattuihin.

Kohde	$E_{L, HL}$ (MPa)	$E_{2,LKL}$ (MPa)	$E_{L, HL} / E_{2,LKL}$	$E_{p, HL}$ (MPa)	$E_{2, HL}$ (MPa)	$E_{p, HL} / E_{2,HL}$
1. Koivumäentie	403	286	1,41	245	303	0,81
2. Ojatie	402	324	1,24	323	417	0,78
3. Laivanrakentajantie	434	335	1,27	352	548	0,71
4. Aurinkotuulenkatu kp	264	237	1,11	236	209	1,13
5. Jokisuuntie	362	339	1,07	341	389	0,88
6. Gustav Pauligin katu	356	416	0,85	493	569	0,87
7. Maustetehtaankatu	245	281	0,87	281	220	1,28
8. Solvikinkatu	403	340	1,15	356	564	0,78
9. Aurinkotuulenkatu	360	321	1,12	350	419	0,84
10. Pienen Villasaaren tie	290	272	1,07	287	278	1,03
11. Pienen Villasaaren kj	240	229	1,05	219	172	1,27
12. Maaherrantie	265	301	0,88	387	367	1,06
13. Latokartanonkaari	305	301	1,01	251	224	1,12
14. Suunnittelijankatu	399	407	1,01	421	597	0,80
15. Insinöörinkatu	394	425	0,93	444	536	0,83
16. Leilikuja	328	266	1,23	284	318	0,89
17. Selim Lindqvistin kuja	243	209	1,16	252	230	1,10
18. Kalkkivuorenkuja	298	290	1,03	306	301	1,01
19. Luokomiehentie jk	268	198	1,36	204	194	1,05

Tarkastelun perusteella voidaan todeta että tiehallinnon kaavat (yhtälöt (3) ja (4)) soveltuvat keskimäärin kohtalaisen hyvin kyseisillä mittalaitteilla ja menettelyillä mitattujen kantavuusarvojen muuntamiseen. Yksittäiset erot tosin ovat niin suuria etteivät mallin antamat yksittäiset arvot ole kovin luotettavia. Lisäksi kaavalla (3) laskettujen levykuormituslaitteen kantavuuksien perusteella yhtälö näyttää suosivan pudotuspainolaitetta varsinkin ohuilla päällystepaksuuksilla.

Levykuormituslaitteelle lasketut tulokset ovat keskimäärin 25,3 % suurempia ja KUABille lasketut keskimäärin 14,9 % pienempiä kuin mitatut kantavuudet. Pienimmillään kaavalla (3) laskettu kantavuus on ollut 46 % pienempi ja suurimmillaan 60 % suurempi kuin levykuormituskokeella mitattu. KUABilla vaihtelu on vastaavan suuruista. Laskelmien perusteella voidaan sanoa, että kyseiset muuntokaavat (yhtälöt (3) ja (4)) soveltuvat huonosti kyseisillä mittalaitteilla ja menettelyillä mitattujen kantavuusarvojen muuntamiseen.

Taulukko 18. KUABin tulosten perusteella lasketut levykuormituskokeen kantavuusarvot ($E_{L, KUAB}$) ja LKL:n tulosten perusteella lasketut KUABin kantavuusarvot ($E_{P, KUAB}$) sekä laskettujen tulosten suhteelliset erot mitattuihin.

Kohde	$E_{L, KUAB}$ (MPa)	$E_{2,LKL}$ (MPa)	$E_{L, KUAB} / E_{2,LKL}$	$E_{P, KUAB}$ (MPa)	$E_{2,KUAB}$ (MPa)	$E_{P, KUAB} / E_{2,KUAB}$
6. Gustav Pauligin katu	416	416	1,00	499	675	0,74
7. Maustetehtaankatu	356	281	1,27	284	329	0,86
8. Solvikinkatu	481	340	1,42	354	552	0,64
9. Aurinkotuulenkatu	449	321	1,40	353	532	0,66
10. Pienen Villasaaren tie	386	272	1,42	290	380	0,76
11. Pienen Villasaaren kj	366	229	1,60	222	273	0,81
12. Maaherrantie	409	301	1,36	391	587	0,67
13. Latokartanonkaari	161	301	0,54	521	327	1,60
14. Suunnittelijankatu	544	407	1,34	432	741	0,58
15. Insinöörikatu	593	425	1,40	449	836	0,54
16. Leilikuja	311	266	1,17	287	301	0,95
17. Selim Lindqvistin kj	264	209	1,26	255	251	1,01
18. Kalkkivuorenuja	329	290	1,14	309	335	0,92
19. Luokomiehentie jk	247	198	1,25	206	178	1,16

5.6 Tutkimuksessa määritetyt yhtälöt pudotuspainolaitteiden ja levykuormituslaitteen välille

Levykuormituslaitteen ja pudotuspainolaitteiden tulosten välille luotiin suoraviivaiset kahden muuttujan mallit. Y-muuttujina malleissa oli pudotuspainolaitteiden keskiarvotulokset ja x-muuttujina levykuormituskokeen keskiarvotulokset sekä päällystepaksuus senttimetreinä. Malleissa y-akselin leikkauspiste on asetettu origoon, sillä muutoin mallit olisivat antaneet tarpeeksi pienillä levykuormituslaitteen kantavuuksilla negatiivisia kantavuusarvoja pudotuspainolaitteille. Gustav Pauligin kadun tuloksia ei käytetty mallin tekemiseen, sillä 26 cm päällystepaksuuden kantavuusarvojen lämpötilakorjausta ei pidetty luotettavana.

Selitysasteeksi Heavy Loadmanin ja levykuormituskokeen väliselle mallille tuli 81,1 % sekä KUABin ja levykuormituslaitteen väliselle mallille 86,6 %. Mallien mukaan tehtiin yhtälöt, joiden avulla levykuormituskokeen tavoitekantavuuksista voidaan laskea pudotuspainokokeessa vaadittava tavoitekantavuus (yhtälöt (6) ja (7)). Kaavojen soveltamisalue päällystepaksuuden mukaan on 5 cm:stä 20 cm:iin.

Heavy Loadmanin tulokset levykuormituslaitteen tulosten ja päällystepaksuuden funktiona:

$$E_{2,HL} = 0,782071 \cdot E_{2,LKL} + 10,5892 \cdot h_{AB} \quad (6)$$

Kaavassa $E_{2,HL}$ = levykuormituskokeen perusteella laskettava Heavy Loadmanin tavoitekantavuuskantavuusarvo (MPa)
 $E_{2,LKL}$ = levykuormituskokeen tavoitekantavuusarvo (MPa)
 h_{AB} = levykuormituskokeen tavoitekantavuusarvon laskemiseen käytetty päällystepaksuus (cm)

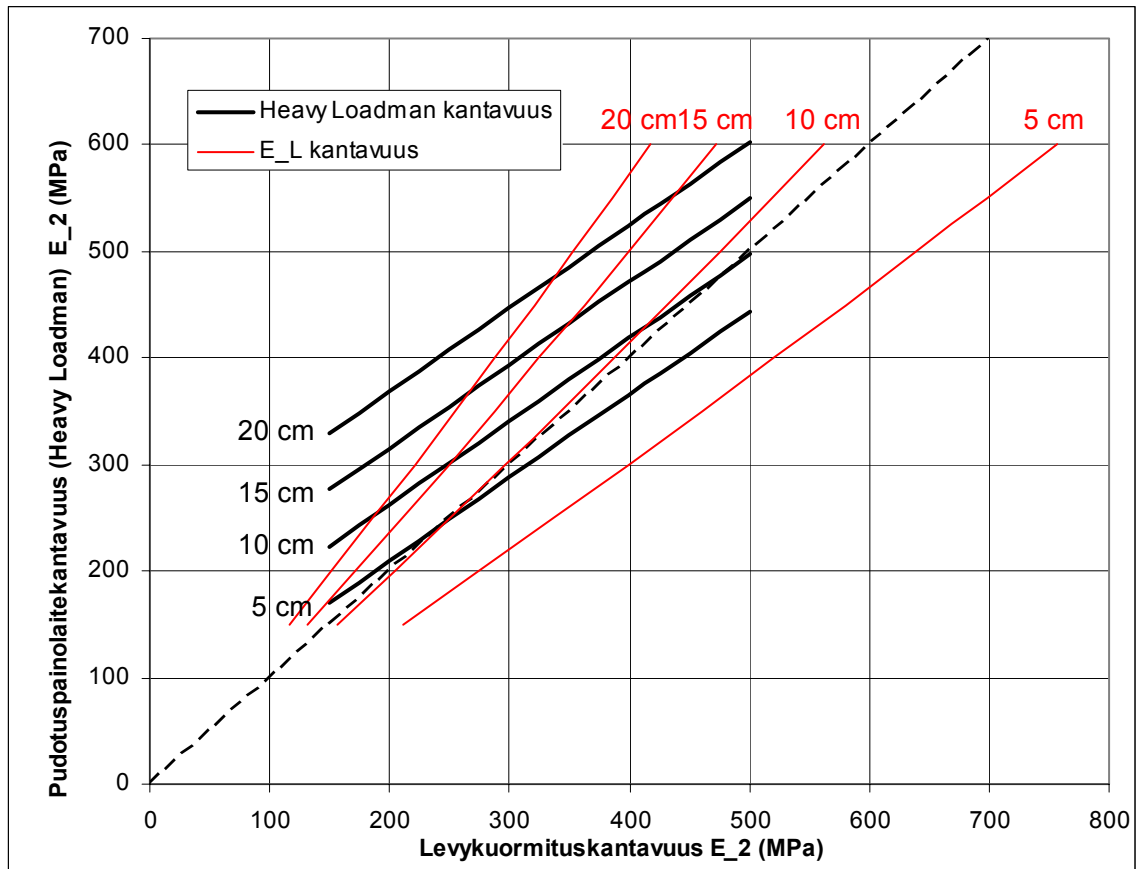
KUABin odotettavissa olevat tulokset levykuormituskokeen mittaustulosten ja päällystepaksuuden funktiona:

$$E_{2,KUAB} = 0,66726 \cdot E_{2,LKL} + 23,0034 \cdot h_{AB} \quad (7)$$

Kaavassa $E_{2,KUAB}$ = levykuormituskokeen perusteella laskettava KUABin tavoitekantavuusarvo (MPa)
 $E_{2,LKL}$ ja h_{AB} vrt. (6)

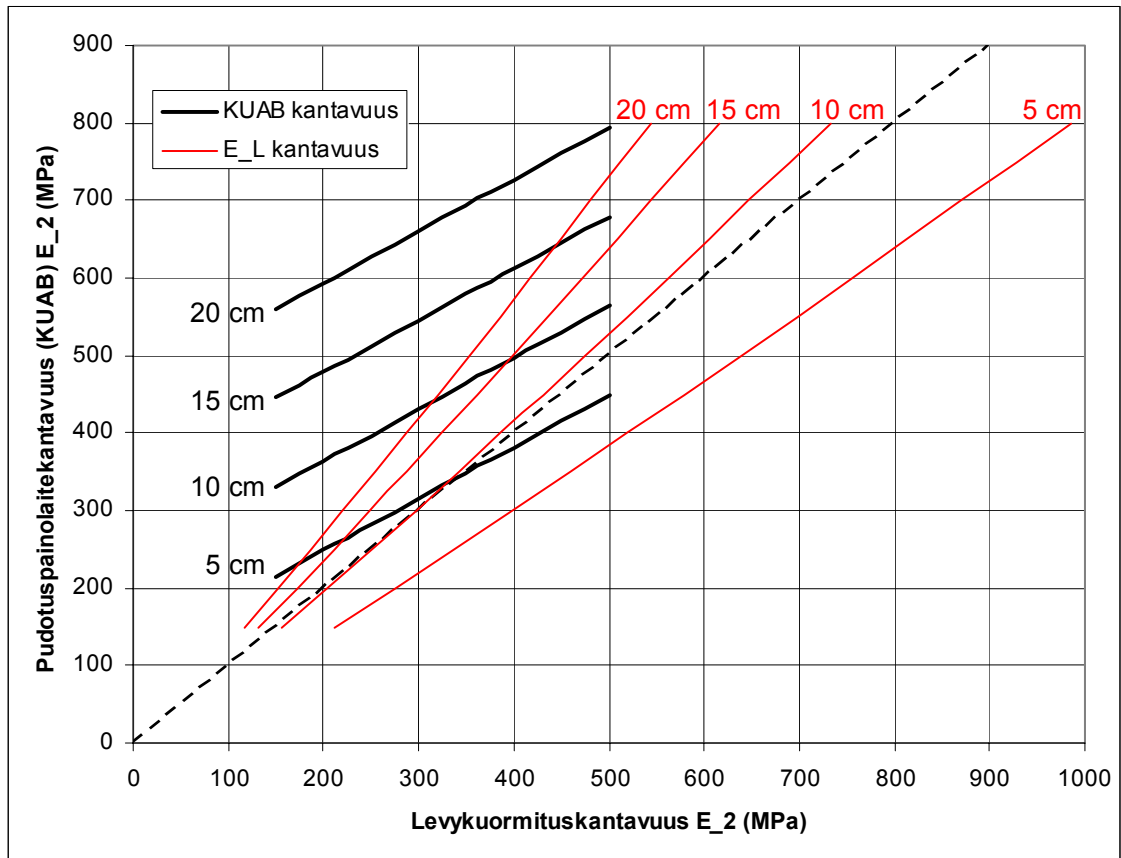
Kuviin 24 ja 25 on piirretty yhtälöillä (6) ja (7) määritetyt kuvaajat pudotuspainolaitteiden kantavuuksista levykuormituslaitteen kantavuuksien perusteella. Kuvaajat on piirretty päällystepaksuuksille 5, 10, 15 ja 20 cm. Lisäksi kuviin on piirretty vertailun vuoksi yhtälöllä (3) määritetyt E_L -kantavuudet vastaavilla päällystepaksuuksilla.

Kuviin on piirretty E_L -kantavuudet, koska kaavoista (3) ja (4) on yleensä käytössä kaava (3), jolla pudotuspainolaitteiden kantavuudet muunnetaan levykuormituskantavuuksiksi. Lisäksi Tiehallinnon muuntokaavat eivät tämän tutkimuksen perusteella näytä soveltuvan tässä tutkimuksessa käytettyjen mittalaitteiden välisten tulosten vertailuun. Eryteisesti Tiehallinnon kaavat näyttävät ”suosivan” KUAB-mittalaitetta sitä enemmän, mitä paksumpi päällyste ja mitä pienempi levykuormituskantavuus rakenteesta on. Heavy Loadmanilla tässä tutkimuksessa määritetyn kaavan ja Tiehallinnon kaavan välillä ero on pienempi, mutta myös selvä. Ohuilla päällysteillä Tiehallinnon kaava näyttää suosivan pudotuspainolaitetta, mutta paksummilla päällysteillä yli 330 – 400 MPa:n levykuormituskantavuuksilla, Tiehallinnon kaava suosii levykuormituslaitetta.



Kuva 24. Yhtälöllä (6) määritetyt levykuormituslaitteen ja Heavy Loadman -pudotuspainolaite väliset kuvaajat sekä yhtälöllä (3) määritetyt E_L-kantavuudet eri päällystepaksuuksilla.

Kuvasta 24 on nähtävissä, että kaavan mukaan ohuilla päällystepaksuuksilla ja suurilla levykuormituskantavuuksilla Heavy Loadmanin kantavuusarvot ovat pienemmät kuin levykuormituslaitteella havaitut. Lasketut E_L-kantavuudet poikkeavat selvästi yhtälön (6) mukaan määritetyistä kuvaajista.



Kuva 25. Yhtälöllä (7) määritetyt levykuormituslaitteen ja KUAB-pudotuspainolaitteen väliset kuvaajat sekä yhtälöllä (3) määritetyt E_L -kantavuudet eri päällystepaksuuksilla.

Kuvasta 25 voidaan havaita, että noin 5 cm:n päällystepaksuudella ja suurilla levykuormituskantavuuksilla KUAB-pudotuspainolaitteen kantavuusarvot ovat pienemmät kuin levykuormituslaitteella havaitut. Lasketut E_L -kantavuudet poikkeavat merkittävästi yhtälön (7) mukaan määritetyistä kuvaajista.

5.7 Takaisinlasketut päällysteen jäykkyyssmoduulit

Päällysteen jäykkyyssmoduulit on takaisinlaskettu päällysteen päältä mitatuista lämpötilakorjatuista kantavuusarvoista ratkaisemalla Odemarkin yhtälöstä ylemmän rakenekerroksen jäykkyyssmoduuli. Kantavan kerroksen kantavuutena on laskuissa käytetty levykuormituslaitteella mitattuja kantavan kerroksen kantavuuksia. Takaisinlasketut jäykkyyssmoduulit eri mittalaitteille on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. Eri mittalaitteilla havaitut takaisinlasketut jäykkyyshmoduulit (E_{AB})

Kohde	h_{AB} (cm)	HL E_{AB} (MPa)	LKL E_{AB} (MPa)	KUAB E_{AB} (MPa)
Laivanrakentajantie	12	2453	557	
Aurinkotuulenkatu k.p.	6	191	775	
Jokisuuntie	11	6286	3838	
Gustav Pauligin katu	26	1667	808	2549
Maustetehtaankatu	8	498	2268	4823
Solvikinkatu	12	4680	1568	9043
Aurinkotuulenkatu	13	4866	1934	10668
Pienen Villasaaren tie	9	905	798	4229
Pienen Villasaaren kuja	5	159	4247	11713
Maaherrantie	20	1127	661	4298
Latokartanonkaari	5	2077	13959	20506
Suunnittelijankatu	17	4415	1957	12322
Insinöörinkatu	18	3961	1972	15159
Leilikuja	9	6734	3337	5466
Selim Lindqvistin kuja	9	1761	1102	2609
Kalkkivuorenkuja	10	1644	1385	2625
Luokomiehentie jk	5	3826	4371	2004
	Keskiarvo	3127	1974	6731
	Keskihajonta	1980	1304	4463
	Vaihteluväli	6236	3814	13155

Kuten taulukon arvoista näkee, on havaittujen jäykkyyshmoduulien välillä todella suuri hajonta kaikilla mittalaitteilla. Epäilyttäviä havaintoja ovat Heavy Loadmanilla havaitut moduulit 159 ja 191 MPa, levykuormituslaitteella havaittu moduuli 13959 MPa sekä KUABilla havaittu moduuli 20506 MPa. Kyseiset moduulit on myös jätetty pois laskuista määrittäessä keskiarvoa, keskihajontaa ja vaihteluväliä Heavy Loadmanin, levykuormituslaitteen ja KUABin moduuleille. Keskimäärin lähimpänä laskennallisten tavoitekantavuuksien määrittämisessä käytettyä arvoa ovat levykuormituslaitteella havaitut moduulit.

Suuret vaihtelut laskennallisesti määritettyjen päällysteen jäykkyyshmoduulien välillä voivat johtua muun muassa seuraavista seikoista:

1) Kantavan kerroksen kantavuus on muuttunut mittaushetken jälkeen. Kantavuus on voinut heikentyä esimerkiksi kuivuudesta ja löyhtymisestä ennen päällystämistä. Kantavuus on voinut parantua esimerkiksi mittaushetken jälkeen tehtyjen lisätiivistämisten takia sekä työmaaliikenteen ja asfalttipäällysteen tekemisen jälkeen yleisen liikenteen vaikutuksesta.

2) Kantavan kerroksen kantavuusmittauksien ja kesän 2005 päällysteen päältä tehtyjen kantavuusmittausten välinen aika on pitkä. Mittauspaikat eivät myöskään ole tarkalleen samat kesän 2005 päällysteen päältä tehdyissä ja aiemmissa kantavan kerroksen kantavuusmittauksissa.

3) Ohuilla päällysteillä (noin 5 cm) eri mittalaitteiden tulosten perusteella takaisinlasketut moduulit vaihtelevat suuresti, koska päällysteen päältä mitatut kantavuusarvot poikkeavat suuresti. Tällöin Odemarkin kaavalla ohut päällystepaksuus aiheuttaa suuren eron moduuleissa.

5.8 Levykuormituslaitteen mittajalan pituuden vaikutus päällysteen päältä saavutettuihin kantavuuksiin

Tutkimuksen edetessä heräsi epäily, että levykuormituslaitteen 133 cm:n pituinen mittajalka sijaitsee päällysteen päältä mitattaessa syntyvässä taipumasuppilossa. Asiaa tutkittiin kiinnittämällä 3 m:n pituiseen oikolautaan kaksi mittakelloa noin 84 cm:n etäisyydelle päistä, siten että kellot olivat 133 cm:n päässä toisistaan. Oikolaudan toiseen päähän kiinnitettiin poikittainen tukijalka, jonka korkeus oli säädeltävissä. Mittaukset oikolaudan kanssa suoritettiin asettamalla mittakellot mittajalan anturoiden kohdalle, niin lähelle anturoita kuin mahdollista. Oikolaudan korkeus säädettiin sopivaksi ja mittakellot nollattiin juuri ennen levykuormituskokeen aloittamista. Mittakellon lukema otettiin muistiin sekä ensimmäisen että toisen kuormitusvaiheen jälkeen.

Levykuormituslaitteen ilmoittamista E_1 - ja E_2 -arvoista takaisinlaskettiin laitteen havaitsema taipuma. Taipumiin lisättiin mittakelloilla saatujen lukemien keskiarvo ja laskettiin uudelleen E-moduulien arvot. Mittaustulokset ovat taulukoituna liitteen 9 taulukoissa 1 ja 2.

Kaikkien mitattujen pisteiden perusteella mittakellojen lukemilla korjatut E_1 -arvot olivat keskimäärin 5,3 % pienempiä kuin levykuormituslaitteella havaitut. Kohteiden keskiarvot taas olivat korjattujen E_1 -arvojen mukaan keskimäärin 5,2 % pienempiä verrattuna levykuormituskokeen tuloksiin.

E_2 -arvoissa keskimääräinen ero kaikkien pisteiden perusteella kasvoi -9,7 %:iin. Kohteiden mittakellojen lukemilla korjatut keskiarvokantavuudet olivat keskimäärin 9,5 % pienempiä kuin levykuormituslaitteen ilmoittamien tulosten perusteella lasketut.

5.9 Yhteenveto kesän 2004 ja 2005 tutkimuskohteista

Sidotuilla kerroksilla kantavuusmittaustulosten erot eri mittalaitteiden välillä ovat samankaltaisia kuin aiemmissa tutkimuksissa havaitut, eli pudotuspainolaitteiden tulokset ovat useimmiten suurempia kuin levykuormituskokeen. Eron havaittiin suurenevan päällystepaksuuden kasvaessa.

Parhaiten keskenään korreloivat sekä kaikista pisteistä että keskiarvoista laskettuna levykuormituslaitteen ja KUABin tulokset. Toisaalta Heavy Loadmanin ja KUABin väliset keskiarvoista ja kaikista tuloksista lasketut korrelaatiot olivat samaa suuruusluokkaa. KUABille tosin kertyi vähemmän mittapisteitä kuin muille laitteille. Kaikkien mittalaitteiden väliset korrelaatiot osoittautuivat erittäin merkitseviksi.

Verrattaessa eri mittalaitteilla päällysteen päältä tehtyjä mittaustuloksia Odemarkin menetelmällä määritettyihin laskennallisiin kantavuusarvoihin voidaan havaita, että korrelaatioiden perusteella kaikki mittausten menetelmät näyttävät kuvaavan kadun kantavuutta päällysteen päältä yhtä luotettavasti.

Suhteellisten erojen perusteella levykuormituskokeen tulokset ovat lähinnä laskennallisia kantavuuksia. Pudotuspainolaitteilla eron laskennalliseen kantavuuteen havaittiin kasvavan päällystepaksuuden kasvaessa. Onkin luultavaa, että tavoitekantavuudet päällysteen päältä on aikoinaan määritetty levykuormituskokeelle.

KUABin ja levykuormituslaitteen mittaustuloksista Tiehallinnon levykuormitus- ja pudotuspainolaitteen välisillä kaavoilla lasketut kantavuusarvot erosivat, mitatuista arvoista huomattavasti. KUABin tulosten perusteella lasketut E_L -kantavuudet olivat keskimäärin 25,3 % suurempia kuin levykuormituskokeella mitatut. Levykuormituslaitteen tuloksista lasketut E_P -kantavuudet olivat taas keskimäärin 14,9 % pienemmät kuin pudotuspainolaitteella mitatut. Kaavat soveltuvat huonosti levykuormituskokeen ja KUABin välisiin muunnoksiin.

Levykuormituslaitteen tuloksista lasketut E_p -kantavuudet olivat keskimäärin 4,1 % pienempiä kuin Heavy Loadmanilla mitatut. Heavy Loadmanin tulosten perusteella lasketut E_L -kantavuudet olivat keskimäärin 9,5 % suurempia kuin levykuormituslaitteella mitatut. Tiehallinnon kaavat soveltuvat siis kohtalaisesti Heavy Loadmanin ja levykuormituskokeen välisiin muunnoksiin.

Kaavojen määrittämiseen on käytetty Phønix-pudotuspainolaitetta, joten niiden voi olettaa soveltuvan parhaiten levykuormituslaitteen ja kyseisen pudotuspainolaitteen välisiin muunnoksiin.

Kesän 2005 tutkimuksessa havaittiin, että levykuormituslaitteen mittausturinin tukikehikko painuu osittain taipumasuppilon mukana. Havaitulla ilmiöllä on suurempi vaikutus E_2 -arvoihin kuin E_1 -arvoihin. Levykuormituslaitteissa ei tiedetä käytettävän merkittävästi suurempia mittajalkoja kuin tässä tutkimuksessa käytetty. Oletuksena on, että KT-02:ssa olevat tavoitekantavuusarvot levykuormituslaitteelle on määritetty aikoinaan samanpituuisella mittajalalla.

6 Asfalttibetonin jäykkyysmoduulin käyttäytyminen staattisessa kuormituksessa

6.1 Yleistä jäykkyysmoduuleista

Asfalttibetonin jäykkyysmoduulin määrittämiseksi löytyy useita eri tapoja. Suurimmat lopputulosten eroihin vaikuttavat tekijät ovat testauslämpötila, bitumilaatu, käytetyn kuormituksen suuruus, taajuus ja kesto aika.

Eri menetelmillä mitatuista moduuleista on todettu, että verrattaessa eri asfalttityyppejä toisiinsa voidaan käyttää millä tahansa menetelmällä määritettyjä moduuleja, jos samaa moduulia käytetään kaikkiin vertailtaviin massoihin. Käytettäessä tiettyä moduulia johonkin kokemuseräiseen mitoitukseen on moduuli määritettävä tavalla, joka sopii käytetyn mitoitukseen menettelytapaan, materiaaleihin ja olosuhteisiin. Mitoitusmenetelmissä käytettävän moduulin määrittäminen voi olla mikä tahansa, kunhan tulosten tulkinta on johdonmukainen käytetyn teoreettisen analyysin oletusten kanssa. /19, s. 36./

6.2 Dynaamisia jäykkyysmoduulin mittausmenetelmiä

Erilaisten asfalttipäällysteiden jäykkyysmoduuleiden määrittämiseen on aiemmin käytetty dynaamisia mittalaitteita. Näissä tutkimuksissa kuormitustaajuus on useimmiten vaihdellut 1 Hz:stä 50 Hz:iin (1...0,02 s). Asfalttibetonin kimmomodiuulin arvo on usein laskettu 30 Hz:n (~0,03 s) kuormitustaajuudella aiheutuneen muodonmuutoksen perusteella. Kyseinen kuormitusaika vastaa hyvin sekä pudotuspainolaitteen että maantienopeudella liikkuvan raskaan ajoneuvon kuormitusaikaa.

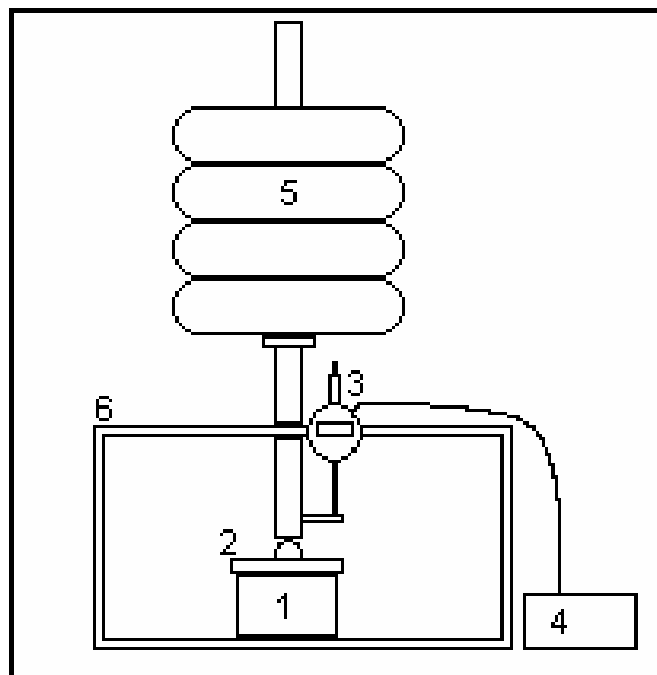
Nykyisin jäykkyysmoduuli (jäännösmoduuli, M_r) määritetään dynaamisella epäsuoralla vetokokeella (PANK 4204). Tällöin lieriömäistä koekappaletta kuormitetaan kohtisuoralle diametrille suunnalle ja mitataan kuormituksen aiheuttamat palautuvat horisontaaliset muodonmuutokset. Jäykkyysmoduuli määritelläänkin koekappaleeseen kohdistetun voiman ja siitä aiheutuneen muodonmuutoksen palautuvan osan suhteeksi. Kuormituspulsseja annetaan viisi ja niiden kesto on 0,1 s. Kuormitusten välissä

on 2,9 s:n välinen lepoaika. /20, s. 3 ja 7./ Edellä mainitulla menetelmällä on AB20:n jäykkyyshmoduuliksi saatu bitumilaadusta riippuen 25 °C:n lämpötilassa arvoja 2200 ja 3100 MPa:n väliltä /7/ sekä väliltä 213...2143 MPa /19, s. 66/.

6.3 Staattisen jäykkyyshmoduulin määrittäminen

6.3.1 Koemenetelmä

Asfalttibetonin staattisen jäykkyyshmoduulin määrittämiseen käytettiin valuasfaltin painuman mittaamiseen käytettävää laitteistoa, johon oli lisätty halkaisijaltaan 110 mm oleva kuormituslevy (kuva 26). Kuormituslevyn pinnassa oli puolipallon muotoinen syvennys, johon asetettiin sopivan kokoinen kuulalaakeri tasaamaan levyn aiheuttamaa painevaikutusta. Puristusaineena käytettiin noin 100 kPa.



Kuva 26. Asfalttibetonin staattisen jäykkyyshmoduulin määrittämiseen käytetty laitteisto, jossa 1 on asfalttinäyte, 2 kuormituslevy, 3 mittakello, 4 tiedonkeruuyksikkö, 5 kuormituspainot ja 6 laitteiston metallikehikko.

Kuormitusajat olivat 5, 10 ja 30 s sekä 2, 10 ja 30 minuuttia. Kuormituksen jälkeen koekappaleiden annettiin palautua, kunnes palautumisnopeus oli laskenut alle $1 \mu\text{m}/\text{min}$, jolloin painuman katsottiin vakiintuneen useimmiten noin 10 minuutin kuluessa puristuksen lopettamisesta. Tämän jälkeen kappaleista mitattiin pysyvä painuma. Käytetyn mittakellon lukematarkkuus oli $1 \mu\text{m}$ ja mittaustarkkuus $3 \mu\text{m}$.

Koemenettelyn katsottiin kuvaavan hyvin juuri pitkäaikaisen, staattisen kuormituksen aiheuttamia pysyviä muodonmuutoksia.

Painuman avulla laskettiin koekappaleen staattinen jäykkyyssmoduuli ($M_{r, Stat}$) yhtälöllä (6).

$$M_{r, Stat} = \frac{P}{\frac{\Delta h}{h}} \quad (8)$$

Kaavassa $M_{r, Stat}$ = staattinen jäykkyyssmoduuli (MPa)

P = puristuspaine (MPa)

Δh = pysyvä painuma (μm)

h = näytteen korkeus (μm)

Käytetyn mittaumenetelmän periaate vastaa aksiaalista creep- eli virumatestiä, jota käytetään arvioitaessa päällysteiden kykyä vastustaa plastista deformaatiota. Creep-moduuli vastaa staattista kuormitusta eikä siten ole vertailtavissa elastiseen dynaamiseen jäykkyyssmoduuliin, jossa käytetyt kuormitusajat ovat lyhyitä [21, s. 33/.

Koekappaleina käytettiin Helsingin kaupungin alueelta hankittuja poranäytteitä. Näytteiden halkaisija oli noin 100 mm ja paksuudet vaihtelivat 40 ja 60 mm:n välillä.

Poranäytteiden päät sahattiin tasaisiksi, ja niitä esikuormitettiin 100 kPa:n paineella 30 minuuttia, jotta pinnan epätasaisuudet saatiin tasoittumaan. Esikuormituksen jälkeen koekappaleet saivat levätä noin vuorokauden ennen varsinaisia mittauksia. Lisäksi ennen jokaista mittausta oli lyhyt esikuormitus ja palautumisjakso, jotta kuormituslevyn ja poranäytteen välinen kosketuspinta saatiin tiiviiksi. Mittauslämpötila oli $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$). Mittaukset suoritettiin Helsingin kaupungin katulaboratoriossa.

6.3.2 Koekappaleet

Jäykkyysmoduulien mittaamiseen käytettiin asfalttilaatuja AB8, AB16/RC40 ja ABK32. Koekappaleiden materiaaliominaisuudet, kuten tyhjätila, tiheys ja bitumipitoisuus on esitetty liitteessä 10.

6.3.3 Mittaustulokset

Taulukossa 20 on esillä koekappaleiden suhteellisten painumien keskiarvot ja keskiarvon keskihajonta. Taulukossa 21 on yhtälöllä (8) lasketut jäykkyysmoduulit ja jäykkyysmoduulien keskihajonnat. Yksittäisten koekappaleiden suhteelliset muodonmuutokset ja jäykkyysmoduulit ovat esillä liitteessä 11. Kuvassa 27 on kuvaajien avulla havainnollistettu mitattujen jäykkyysmoduulien riippuvuutta kuormitusajasta. Liitteen 11 kuvissa 1, 2 ja 3 on graafiset kuvaajat asfalttilajeittain.

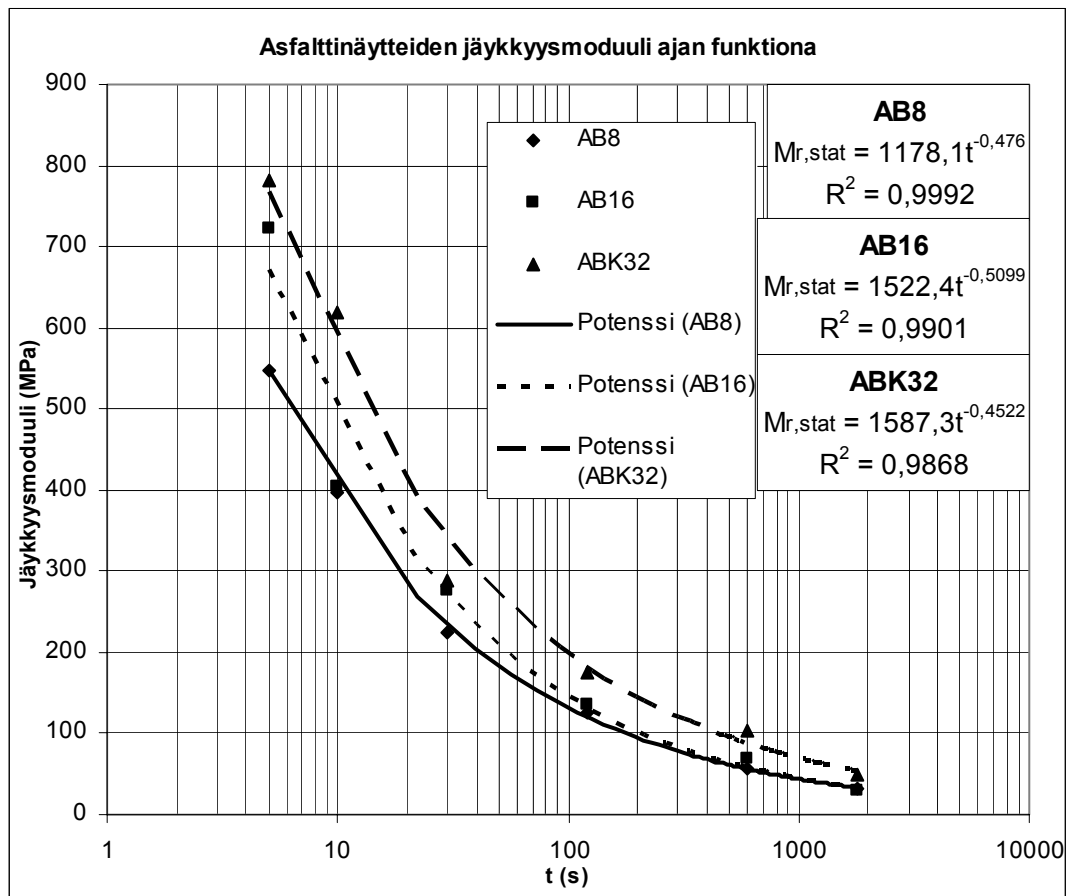
Taulukko 20. Poranäytteiden suhteelliset painumat.

Kuormitusaika (s)	5	10	30	120	600	1800
Asfalttilaji	Suhteellinen muodonmuutos ($\Delta h / h$)					
AB8 keskiarvo	0,000183	0,000253	0,000450	0,000792	0,001811	0,003045
keskihajonta	0,000058	0,000057	0,000093	0,000235	0,000393	0,000262
AB16 keskiarvo	0,000139	0,000248	0,000363	0,000747	0,001473	0,003422
keskihajonta	0,000035	0,000068	0,000085	0,000134	0,000311	0,000704
AB32 keskiarvo	0,000129	0,000163	0,000350	0,000572	0,000969	0,002021
keskihajonta	0,000026	0,000040	0,000054	0,000075	0,000110	0,000316

Taulukko 21. Poranäytteistä mitatut jäykkyysmoduulit.

Kuormitusaika (s)	5	10	30	120	600	1800
Asfalttilaji	Jäykkyysmoduuli ja moduulin keskihajonta (MPa)					
AB8	550 ± 130	400 ± 70	220 ± 40	130 ± 30	55 ± 10	33 ± 3
AB16	720 ± 150	400 ± 90	280 ± 50	140 ± 20	68 ± 12	29 ± 5
AB32	780 ± 130	620 ± 120	290 ± 40	180 ± 20	104 ± 11	50 ± 7

Taulukon 21 keskiarvomoduulit on laskettu suhteellisten painumien keskiarvojen perusteella ja moduulien keskihajonnat suhteellisten painumien keskihajontojen perusteella.



Kuva 27. Asfalttibetonin staattinen jäykkysmoduuli eri kuormitusajoilla sekä mittapisteiden välille sovitetut trendiviivat ja niiden yhtälöt.

6.4 Tulosten analysointi

Mitatut jäykkysmoduulit ovat samassa linjassa Ohion yliopistossa vuonna 2001 tehdyssä tutkimuksessa mitattujen creep-moduulien kanssa (taulukko 22.) /21/ ottaen huomioon, että tutkitut asfalttimassat, mittauslämpötila ja näytteiden korkeus eroavat Ohion tutkimuksesta. Lisäksi Ohion tutkimuksessa kappaleita kuormitettiin 3600 s, jonka jälkeen aika-painumakuvaajasta on määritetty painumat ajoille 1, 10, 100, 1000, 1800 ja 2400 s.

Taulukko 22. Ohion yliopistossa määritettyjä staattisen creep-moduulin arvoja eri kuormitusajoilla. Mittaukset on suoritettu + 25 °C:n lämpötilassa.

Kuormitusaika (s)	1	10	100	1000	1800	2400	3600
	Creep-moduuli (MPa)						
Näytteen korkeus							
> 10 cm	542	365	227	110	91	80	74
< 10 cm	259	194	149	104	95	89	86

Mittaukset osoittavat selvästi, että staattisen kuormituksen alueilla ei katurakenteen mitoitusta tehtäessä ole järkevää käyttää asfalttibetonin mitoitusarvona dynaamisilla menetelmillä mitattuja jäykkyysmoduulin arvoja. Toisaalta mittauksissa määritetyt jäykkyysmoduulin arvot eivät ole käyttökelpoisia esimerkiksi Odemarkin mitoitusmenetelmässä

Tyhjätiloilla tai näytekappaleiden korkeuksilla ei havaittu olleen merkittävää vaikutusta mitattuihin jäykkyysmoduulin arvoihin. Toisaalta mittausaineisto oli niin suppea ja niin yhteneväistä, ettei merkittäviä yhteyksiä jäykkyysmoduulin ja edellä mainittujen ominaisuuksien välillä voitu olettaakaan löytyvän.

Sen sijaan voidaan huomata, että bitumipitoisuuden vähentyessä ja kiviaineksessa käytetyn suurimman raekoon kasvaessa jäykkyysmoduulin arvo kasvaa.

7 Yhteenveto

7.1 Tutkimuksessa havaittua

7.1.1 Eri mittausvälineiden tulosten keskinäiset riippuvuudet

Levykuormituslaitteella ja Heavy Loadmanilla sekä KUAB-pudotuspainolaitteella tehtyjen mittausten välisissä mittaustuloksissa on ilmennyt odotetunlaisia eroavaisuuksia.

Sitomattomille kerroksille ei kertynyt tutkimuksessa uutta aineistoa. Oletuksena on aiempien tutkimusten valossa, että erot eri mittalaitteiden välillä ovat pieniä sitomattomilla kerroksilla. Tällöin kaikki mittalaitteet soveltuvat yhtä hyvin sitomattomien kerrosten mittaamiseen

Sidotuilla kerroksilla levykuormituslaitteen mittaustulokset ovat olleet pienempiä kuin dynaamisilla kantavuudenmittalaitteilla mitatut. Tulosten suhteelliset erot suurenevat päällystekerroksen paksuuden kasvaessa. Levykuormituskokeella on myös havaittu suurempia kantavuusarvoja kuin pudotuspainolaitteilla kohteissa, joiden päällystepaksuus on ollut noin 5 cm. Aiemmissä tutkimuksissa sekä tämän tutkimuksen teoreettinen tarkastelu osiossa on myös havaittu kantavuusarvojen suhteellisten erojen kasvaminen päällystepaksuuden kasvaessa.

Päällysteen päältä mitatut erot ovat selitettävissä aiemmin tehtyjen olettamusten avulla. Asfalttibetonin staattinen jäykkyysmoduuli voi ilmeisesti olla jopa useita kertoja pienempi verrattuna dynaamisella menetelmällä mitattuihin. Levykuormituskokeen tuloksista, Odemarkin menetelmää käyttäen, takaisinlaskettujen jäykkyysmoduulien keskiarvo 20 °C:n lämpötilassa oli 1974 MPa. Pudotuspainolaitteille vastaavat lukemat olivat 3127 MPa (HL) ja 7715 MPa (KUAB). Toisaalta levykuormituslaitteen ja Heavy Loadmanin epäilyttävien havaintojen ottaminen mukaan nostaisi levykuormituskokeella ja pienentäisi Heavy Loadmanilla havaittuja moduuleja. Asfalttipäällysteen jäykkyysmoduulin on myös useassa aiemmassa tutkimuksessa todettu olevan riippuvainen kuormitusajasta.

7.1.2 Lämpötilakorjaus

TVH:n levykuormituskokeen kantavuustuloksen lämpötilakorjauskäyrästä näyttää soveltuvan hyvin levykuormituslaitteella päällysteen päältä mitattavien kantavuusarvojen lämpötilakorjaukseen. Heavy Loadman- ja KUAB-pudotuspainolaitteiden mittaustulosten lämpötilakorjaus on tässä työssä tehty tiehallinnon korjauskaavalla, ja se näyttäisi soveltuvan tarkoitukseen hyvin. Päällysteen päältä tehdyt levykuormituskokeet lämpötilakorjataan siis TVH:n lämpötilakorjauskäyrästä ja Heavy Loadman- sekä KUAB-pudotuspainolaitteiden tulokset tiehallinnon lämpötilakorjauskaavalla.

7.2 Uudet tavoitekantavuusvaatimukset eri mittalaitteille

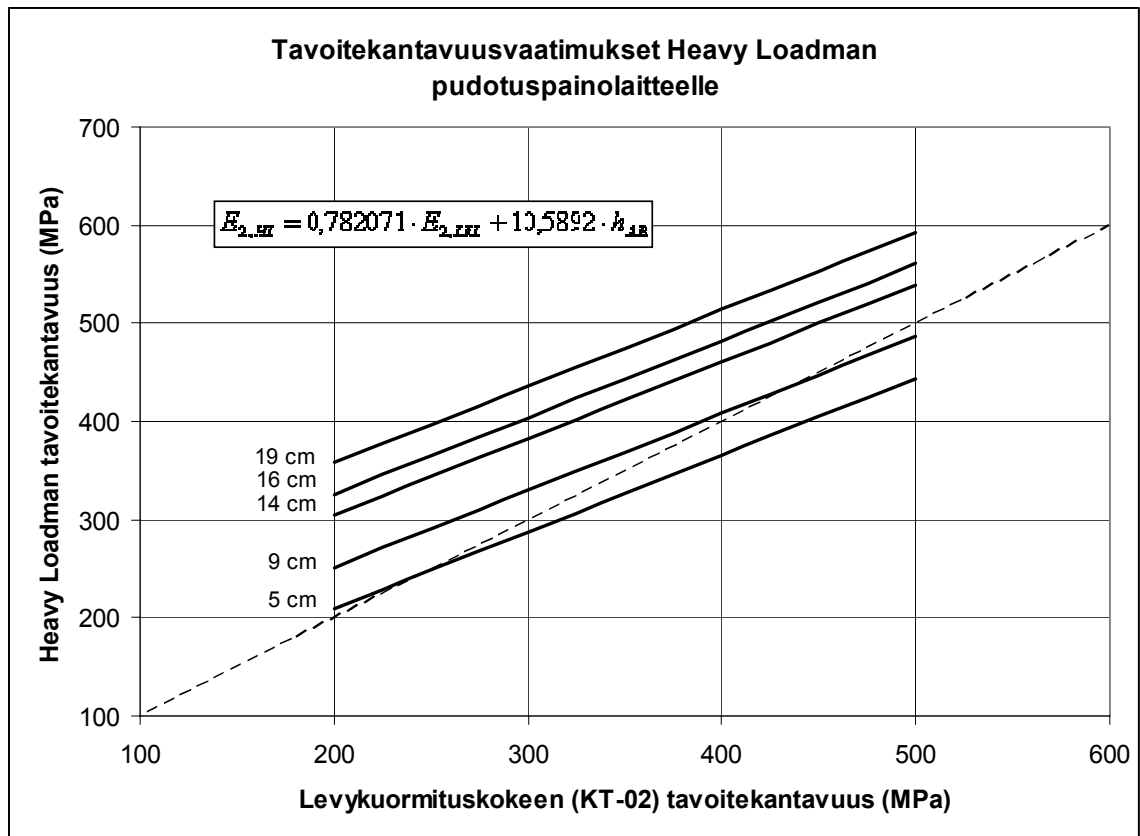
KT-02:ssa määritettyihin normaalipäällysrakenteisiin eri katuluokissa ei ole syytä puuttua. Sen sijaan sekä levykuormitus- että pudotuspainolaitteille on tarkoituksenmukaista päällysteen päältä mitattaessa määrittää omat kantavuusvaatimukset eri katuluokille ja rakennekerroksille.

Ensisijaisena suosituksena on, että kantavuudet mitataan kantavan kerroksen päältä, kuten tähänkin mennessä. Tutkimuksen aikana osoittautui, että Kunnallisteknisen työohjeen tavoitekantavuusarvot on mitä ilmeisimmin määritetty aikoinaan levykuormituslaitteelle. Sitomattomien kerrosten päältä mitattaessa ohjearvoja voidaan soveltaa kaikille mittalaitteille, sillä materiaalin jäykkyys ei ole aikariippuvaista. Päällysteen jäykkyysmoduuli sen sijaan on voimakkaasti riippuvainen kuormitusajasta.

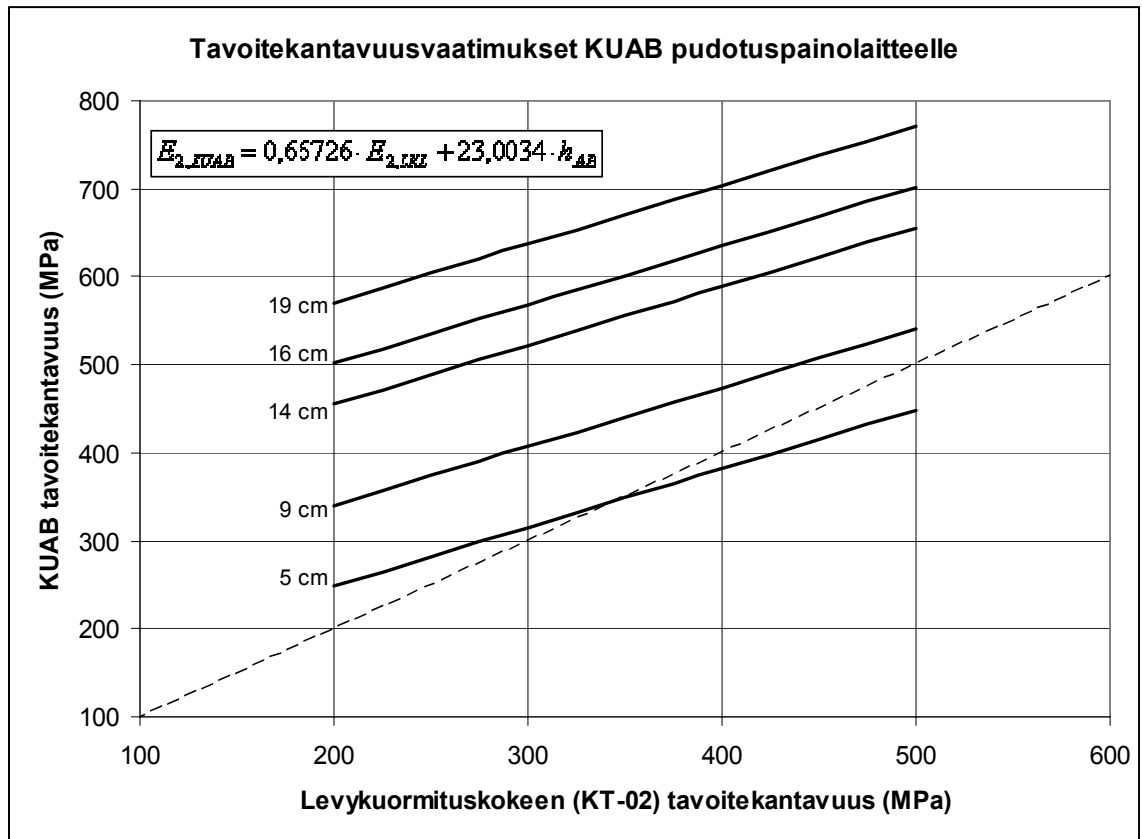
Tehtäessä mittauksia päällysteen päältä on KT-02:ssa ilmoitettuja tavoitekantavuusarvoja pidettävä nimenomaan levykuormituslaitteen tavoitekantavuuksina. Pudotuspainolaitteiden tavoitekantavuudet määritetään alla osoitetulla tavalla.

Levykuormituslaitteella päällysteen päältä saavutettavina tavoitekantavuuksina käytetään siis Kunnallisteknisen työohjeen 2002 mukaan laskettuja tavoitekantavuuksia. Heavy Loadman -pudotuspainolaitteen tavoitekantavuus lasketaan levykuormituslaitteen tavoitekantavuuden ja kyseisen katuluokan KT-02:n mukaisen normaalin päällystetepaksuuden perusteella yhtälöllä (6). KUAB-pudotuspainolaitteella saavutettava tavoitekantavuus lasketaan vastaavalla tavalla yhtälön (7) avulla. Yhtälöt sekä niiden

perusteella lasketut kuvaajat on esitetty kuvissa 28 ja 29. Kuvaajat on piirretty päällystetepaksuuksille 5, 9, 14, 16 ja 19 cm.



Kuva 28. Heavy Loadman pudotuspainolaitteen uudet tavoitekantavuusvaatimukset päällysteen päältä.



Kuva 29. KUAB pudotuspainolaitteen uudet tavoitekantavuusvaatimukset päällysteen päältä.

Taulukossa 23 on esitetty katuluokille 1–6 KT-02:n mukaiset kantavuusvaatimukset, sekä erilliset tavoitekantavuudet Heavy Loadman- ja KUAB-pudotuspainolaitteita varten. Laskettaessa pudotuspainolaitteiden kantavuusvaatimuksia päällystepaksuutena on käytetty katuluokkien 1–6 pohjamaan kantavuusluokan E mukaisia päällystepaksuuksia.

Taulukko 23. Uudet tavoitekantavuudet pudotuspaino- ja levykuormituskokeelle, sekä KT-02:n mukaiset kantavuusvaatimukset.

Katuluokka	KT-02:n vaatimukset (MPa)	HL-tavoite (MPa)	KUAB-tavoite (MPa)
1	500	624	840
2	420	530	717
3	350	443	602
4	250	291	374
5	200	252	340
6	175	179	209

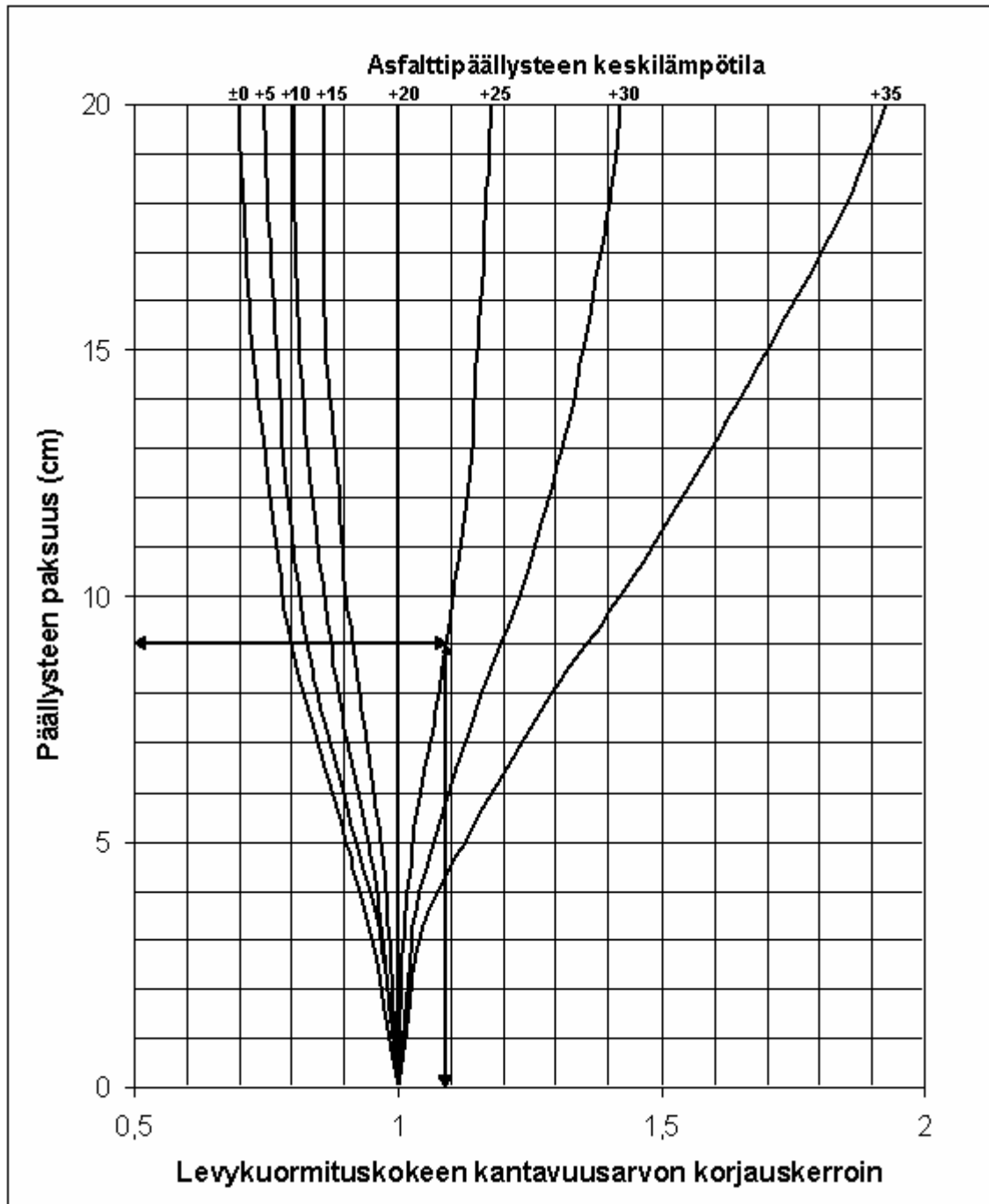
Lisäksi tulee ottaa huomioon, että kyseisten tavoitekantavuusarvojen voidaan olettaa soveltuvan levykuormituskokeen tapauksessa ainoastaan tässä työssä toteutetun mittausmenettelyn tapauksessa. Jos levykuormituskokeen mittausmenettely poikkeaa tässä työssä esitetystä, tulee tavoitekantavuuksiin suhtautua varauksella. Lisäksi myös pudotuspainolaitteiden mittausmenettelyissä on eroavaisuuksia, joten taulukossa 23 esitettyjen Heavy Loadman- ja KUAB-pudotuspainolaitteiden tavoitekantavuuksia voidaan olettaa soveltuvan ainoastaan kyseisillä mittalaitteilla ja menettelyillä saatuihin mittaustuloksiin.

Lähteet

1. Huhtala, Matti: Palojärven – Olkkalan koetien päällysrakenteen teoreettiset laskelmat. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tie- ja liikennelaboratorio, Tiedonanto 59, Espoo 1980, ISBN 951-38-1118-2.
2. Piippo, Hilikka, Belt, Jouko, Ehrola, Esko: Tien kantavuuden mittauslaitteet ja eri laitteilla määritetyt kantavuudet. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 8, Oulu 1990, ISBN 951-42-3016-7.
3. Rantamäki, Martti, Jääskeläinen, Raimo, Tamminenne, Markku: Geotekniikka. Otapaino, Espoo 1982, ISBN 951-671-264-9.
4. Stabilointiohje koekäyttöön. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Tiehallinto, Helsinki 2002, ISBN 951-726-843-2
5. Laaksonen, Rainer, Törnqvist, Jouko: Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa. Asfaltti. Joulukuu 2004, nro 74, s. 28–33.
6. Alkio, Risto, Juvankoski, Markku, Korkiala-Tanttu, Leena, Laaksonen, Rainer, Laukkanen, Kyösti, Petäjä, Sami, Pihlajamäki, Jari, Spoof, Harri: Tien rakennekerrosten materiaalit, Taustatietoa materiaalivalinnoille. Tiehallinnon selvityksiä 66/2001, Helsinki: Tiehallinto, 2001. (WWW-dokumentti.) <<http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/materiaalit66-2001.pdf>>. Luettu 3.2.2006.
7. Lämpötilojen korjauskertoimien määrittäminen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tie- ja liikennelaboratorio, Tutkimusselostus 221, Espoo 1980.
8. Walker, Dwight, Buncher, Mark: Intersection Strategy, Developing a Strategy for Better Performing Intersection Pavements. (WWW-dokumentti.) <http://www.asphaltinstitute.org/upload/Intersection_Strategy.pdf>. 1999. Luettu 3.2.2006.

9. Liimatta, Lauri, Belt, Jouko, Ehrola, Esko: Pudotuspainolaitteen käyttö tien rakenteellisen toiminnan arvioinnissa ja parantamistarpeen suunnittelussa. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 2, Oulu 1989, ISBN 951-42-2773-5.
10. Saarelainen, Seppo: Pohjamaan urautuminen ja sulamisen arviointi kevätkantavuusvaiheessa. Tutkimusraportti TPPT 23, Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994 – 2001, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo 2001.
11. Honkanen, Pentti: Loadman tulosvertailu –pudotuspainolaitteen ja –levykuormituslaitteen tuloksiin. Tielaitos, Piirin tutkimuksia ja selvityksiä, Turun tiepiiri kehittämissyksikkö, Turku 1991.
12. Hildebrand, Gregers: Comparison of Various Types of Bearing Capacity Equipment. Danish Road Directorate (DRD). Nordic Road & Transport Research 3 / 2003. <<http://www.vti.se/Nordic/3-03mapp/comparison.html>>. Luettu 3.2.2006.
13. Alkio, Risto, Pihlajamäki, Jari: Jutikkalan eritasoliittymä. Kohderaportti TPPT 27, Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994 – 2001, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo 2001, <<http://alk.tiehallinto.fi/tppt/kohderaportit/27-vt3jutikkala.pdf>>. Luettu 16.1.2006.
14. Hildebrand, Gregers, Baltzer, Susanne: Statisk pladebelastning, faldlod og minifaldlod, Resultater af sammenlignende målinger. (WWW-dokumentti.) <<http://www.vd.dk/pdf/eksnot16.pdf>>. Maaliskuu 2003. Luettu 3.2.2006.
15. Kotakorpi, Jukka, Ehrola, Esko: Teiden ja katujen mittaaminen pudotuspainolaitteella. Oulun yliopisto, Tie- ja maarakennustekniikan laitos, Julkaisu 33, Oulu 1980, ISBN 951-42-0844-7.

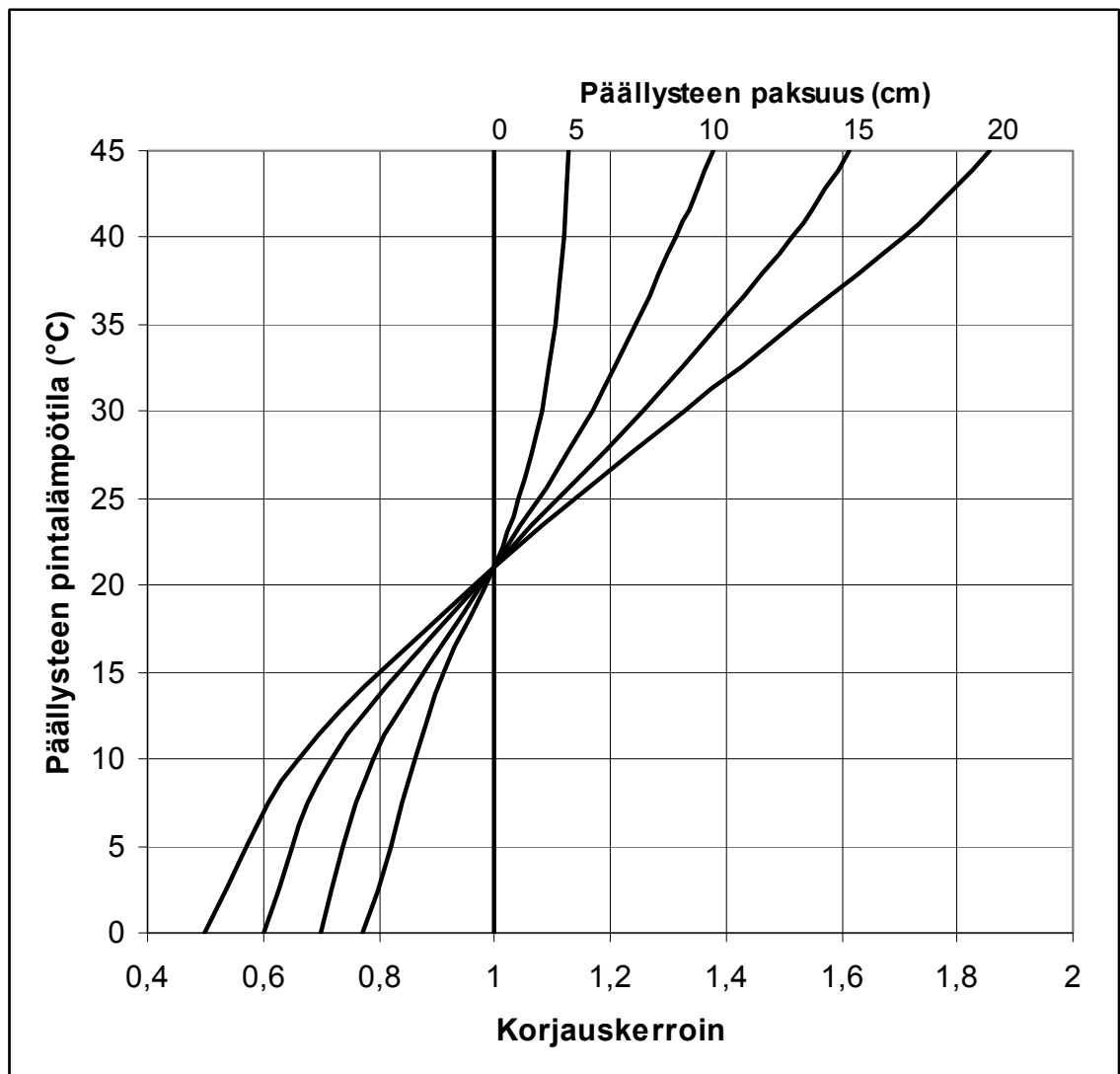
16. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset, Penger- ja kerrosrakenteet. (WWW-dokumentti.) Helsinki: Tiehallinto 9.6.1994. <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/4000_penger_ja_kerrosrakenteet.pdf>. Luettu 3.2.2006.
17. Ryytänen, Teuvo, Belt, Jouko: Kantavuusmittauslaitteilla mitatut taipumat ja määritetyt kantavuudet asfalttipäällysteisillä teillä. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 10, Oulu 1991.
18. Kunnallisteknisten töiden yleinen työselostus 02, Suomen kuntaliitto, 1. painos, Helsinki 2002, ISBN 951-755-681-0
19. Lehtimäki, Jukka: Asfaltin jäykkyysmoduli. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma ASTO 1987 – 1992, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio n:o 30, Espoo 1991.
20. Asfalttinormit 2000. Jäykkyysmoduuli. PANK-4204. Päällystealan neuvottelukunta PANK ry, Helsinki 2000.
21. Masada, Teruhisa., Sargand, Shad: Laboratory characterization of materials & data management for Ohio-SHRP projects (U.S. 23). (WWW-dokumentti.) <<http://www.dot.state.oh.us/research/2002/Pavement/14695-FR.pdf>>. Tammikuu 2002. Luettu 3.2.2006.



Kuva 1. TVH:ssa laadittu levykuormituskokeen kantavuusarvon lämpötilakorjauskäyrästä.

Esimerkki:

9 cm paksuisen päällysteen päältä on mitattu jäykkysmoduulin arvoksi 290 MPa, päällysteen keskilämpötilan ollessa 25 °C. Käyrältä luettu kantavuusarvon korjauskerroin on n. 1,09. Jäykkysmoduulin arvo muunnettuna vertailulämpötilaan 20 °C on tällöin $290 \text{ MPa} \cdot 1,09 \approx 316 \text{ MPa}$.



Kuva 1. Helsingin kaupungin rakennusviraston silloisessa tielaboratoriossa laadittu kantavuuden lämpötilakorjauskäyrästä pudotuspainolaitteille.

Pudotuspainolaitteen kantavuusarvon lämpötilakorjauskaava:

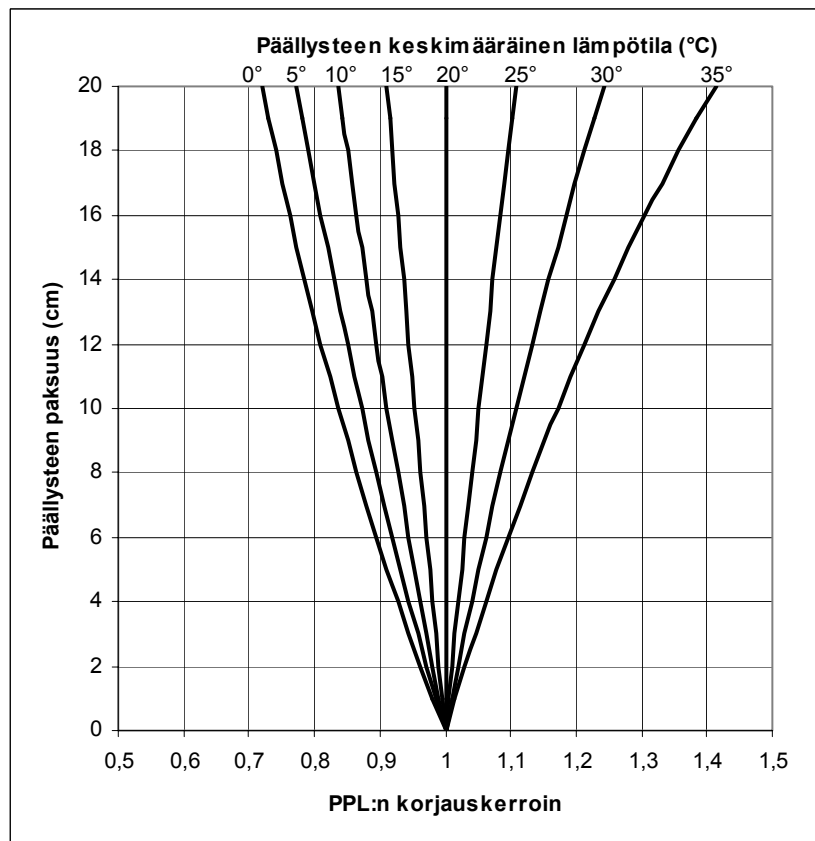
$$E_{2,ref} = \frac{E_{2,Mit}}{1 - (T_{AB} - 20) \cdot 0,000975 \cdot h_{AB}} \quad (1)$$

Kaavassa $E_{2,ref}$ = lämpötilakorjattu kantavuusarvo (MPa)
 $E_{2,Mit}$ = päällysteen päältä mittauslämpötilassa saavutettu kantavuusarvo (MPa)
 T_{AB} = asfalttipäällysteen keskimääräinen lämpötila (°C)
 h_{AB} = sidotun kerroksen paksuus (cm)

Esimerkki:

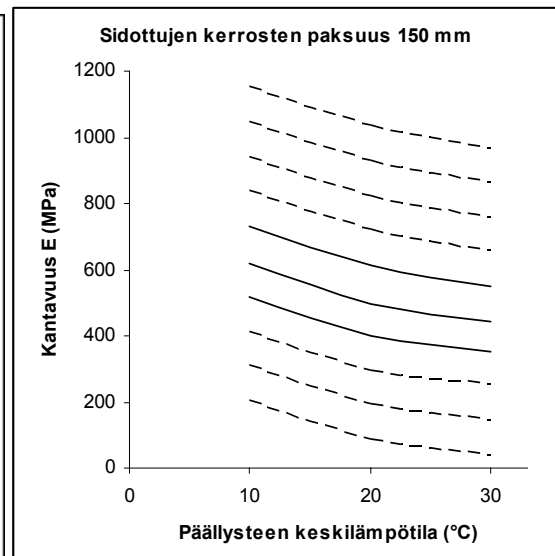
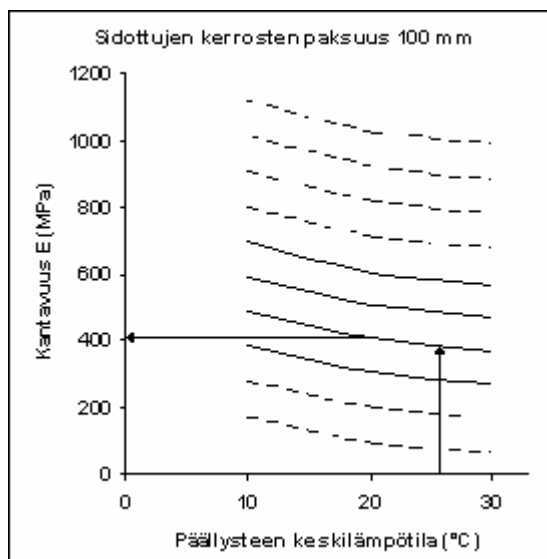
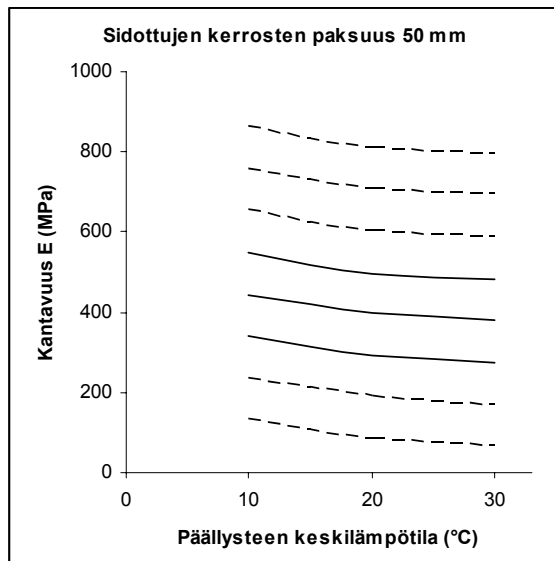
12 cm paksuisen päällystekerroksen päältä on mitattu jäykkyysmoduulin arvoksi 380 MPa, päällysteen keskilämpötilan ollessa 25 °C. Tällöin kantavuusarvo vertailulämpötilassa 20 °C on kaavalla (1) laskettuna:

$$E_{2,ref} = \frac{380}{1 - (25 - 20) \cdot 0,000975 \cdot 12} \approx 404 \text{ MPa}$$



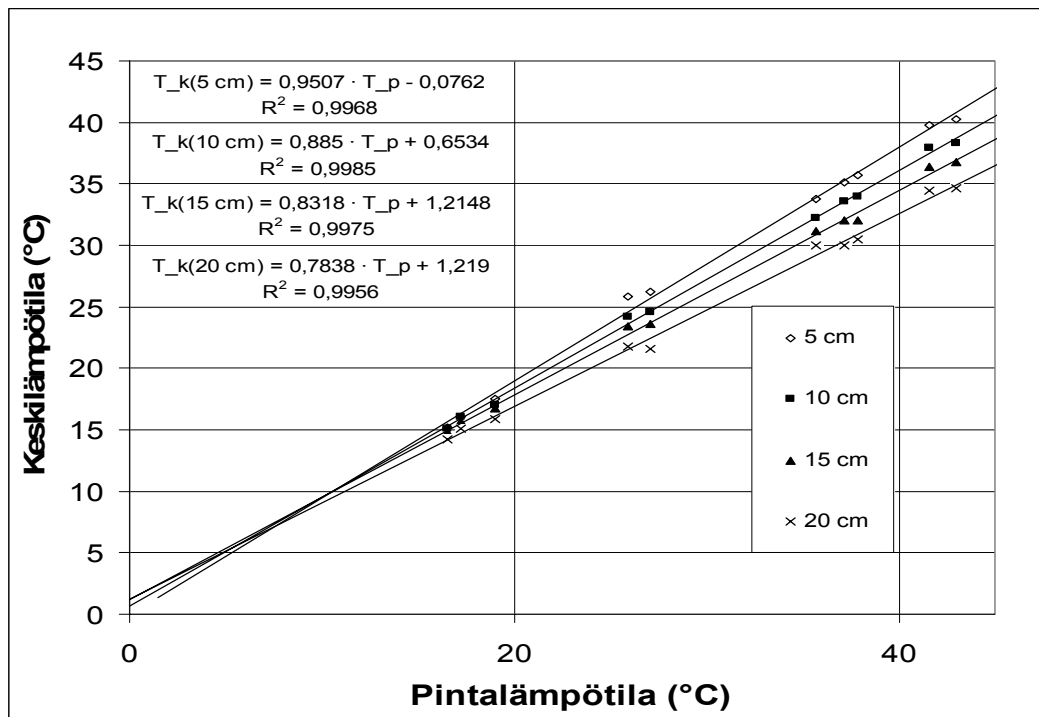
Kuva 1. Tiehallinnon kantavuusarvon korjauskaavan avulla laadittu pudotuspainolaitteen lämpötilakorjauskäyrästä.

VTT:n kantavuuden käyrästäjen mukaan piirrettyjä lämpötilakorjauskäyrästäjä.



Esimerkki:

100 mm päällystekerroksen päältä on mitattu +26 °C:n lämpötilassa kantavuusarvoksi 385 MPa. +20 °C:n lämpötilassa vastaava kantavuusarvo on 405 MPa.



Kuva 1. HKR:n tielaboratorion Kyläsaaren koekentällä laatima asfalttipäällysteen lämpötilankorjauskäyrästä. $T_k(5 \text{ cm})$ = 5 cm paksun päällystekerroksen keskilämpötila pintalämpötilan ollessa T_p .

Välipaksuuksien, esimerkiksi 7 cm, korjauskäyrien yhtälöt voidaan määrittää interpoloimalla ne kuvassa esiintyvien yhtälöiden väliiltä. Alla on laskettu esimerkiksi yhtälö päällystepaksuudelle 7 cm, sekä keskilämpötila kyseisellä yhtälöllä pintalämpötilan ollessa +26 °C.

Lämpötilan korjauskäyrän yhtälö päällystepaksuudelle 7 cm:

$$T_k(5 \text{ cm}) = 0,9507 \cdot T_p - 0,0762 \text{ °C}$$

Ja

$$T_k(10 \text{ cm}) = 0,885 \cdot T_p + 0,6534 \text{ °C}$$

$$T_k(7 \text{ cm}) = \left(0,9507 - \frac{0,9507 - 0,885}{5} \cdot 2 \right) \cdot T_p + \left(-0,0762 + \left(\frac{0,6534 - (-0,0762)}{5} \cdot 2 \right) \right) \text{ °C}$$

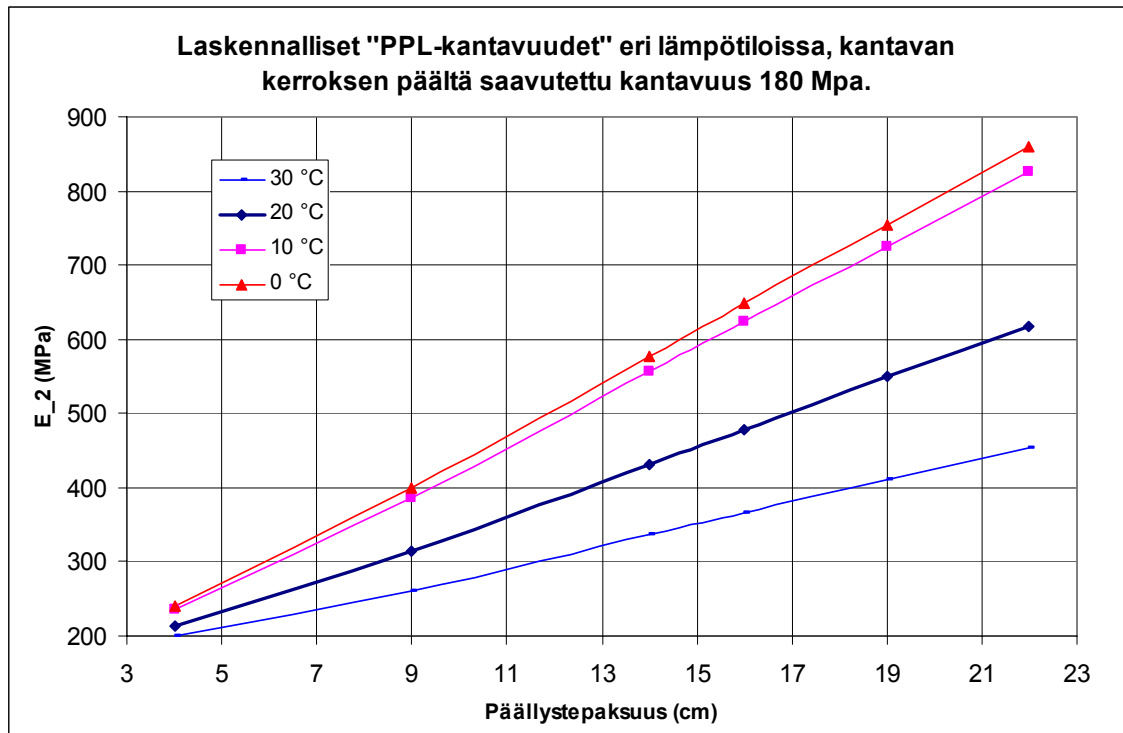
$$T_k(7 \text{ cm}) \approx 0,9244 \cdot T_p + 0,2156 \text{ °C}$$

7 cm paksuisen päällysteen keskilämpötila pintalämpötilan ollessa +26 °C:

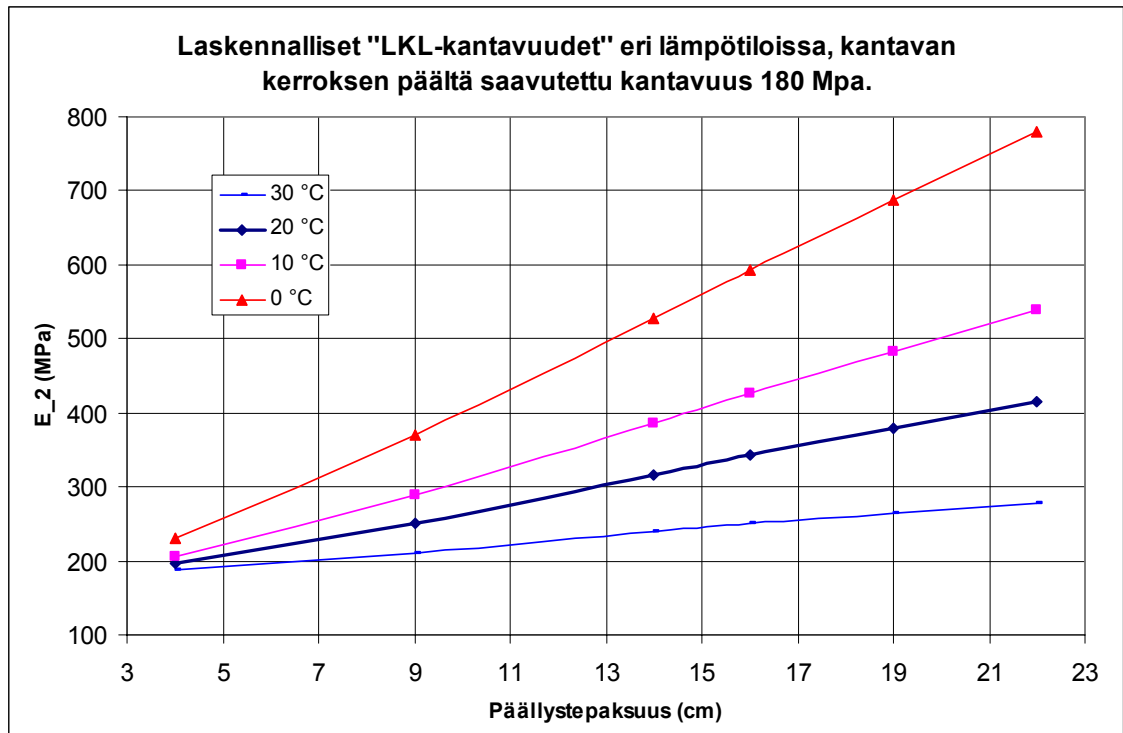
$$T_k(7 \text{ cm}) = 0,9244 \cdot 26 \text{ °C} + 0,2156 \text{ °C} = \mathbf{24,25 \text{ °C}}$$

Kuvissa 1 ja 2 olevat ”LKL- ja PPL-kantavuudet” eri lämpötiloissa päällystepaksuuden funktiona on laskettu kappaleessa 4.2 esitetyn mukaisesti.

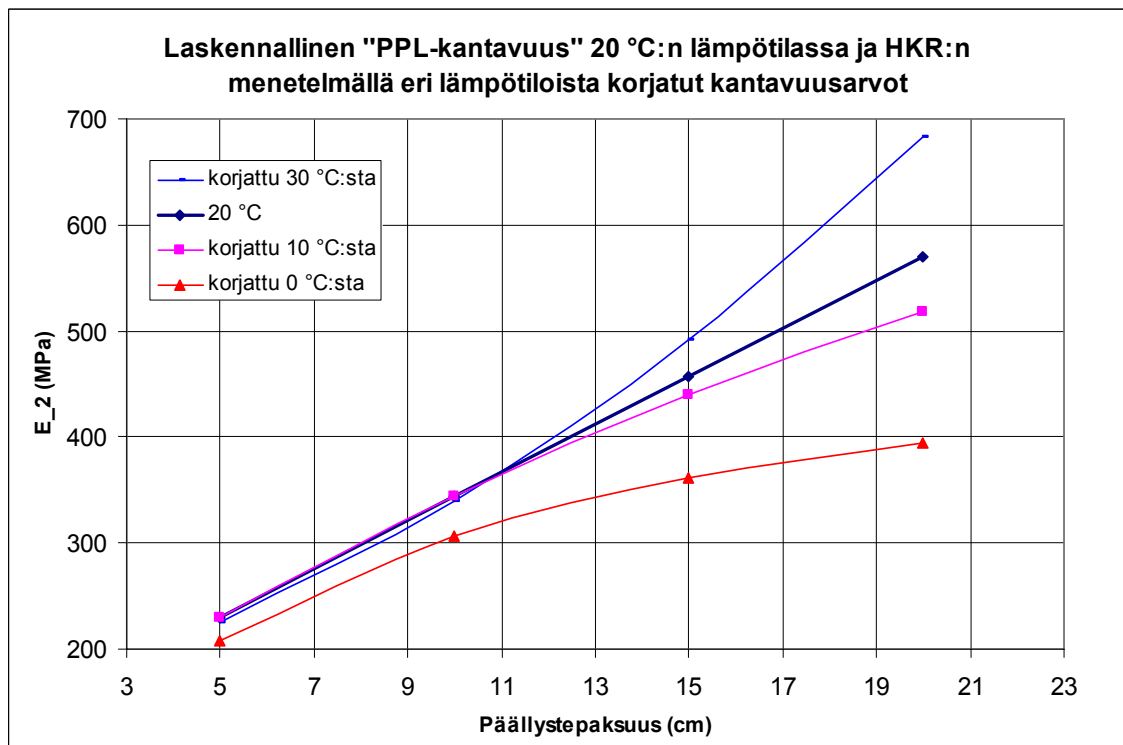
Eri menetelmillä lasketut lämpötilakorjatut kantavuusarvot kuviin 3 ja 4 on saatu määrittämällä laskennalliset ”LKL-” ja ”PPL-” kantavuudet 0, 10 ja 30 °C:n lämpötiloissa. Kuvaajien kantavuusarvot on lämpötilakorjattu 0 °C:n lämpötilassa HKR:n menetelmällä ja 10 ja 30 °C:n lämpötiloissa HKR:n ja VTT:n menetelmillä.



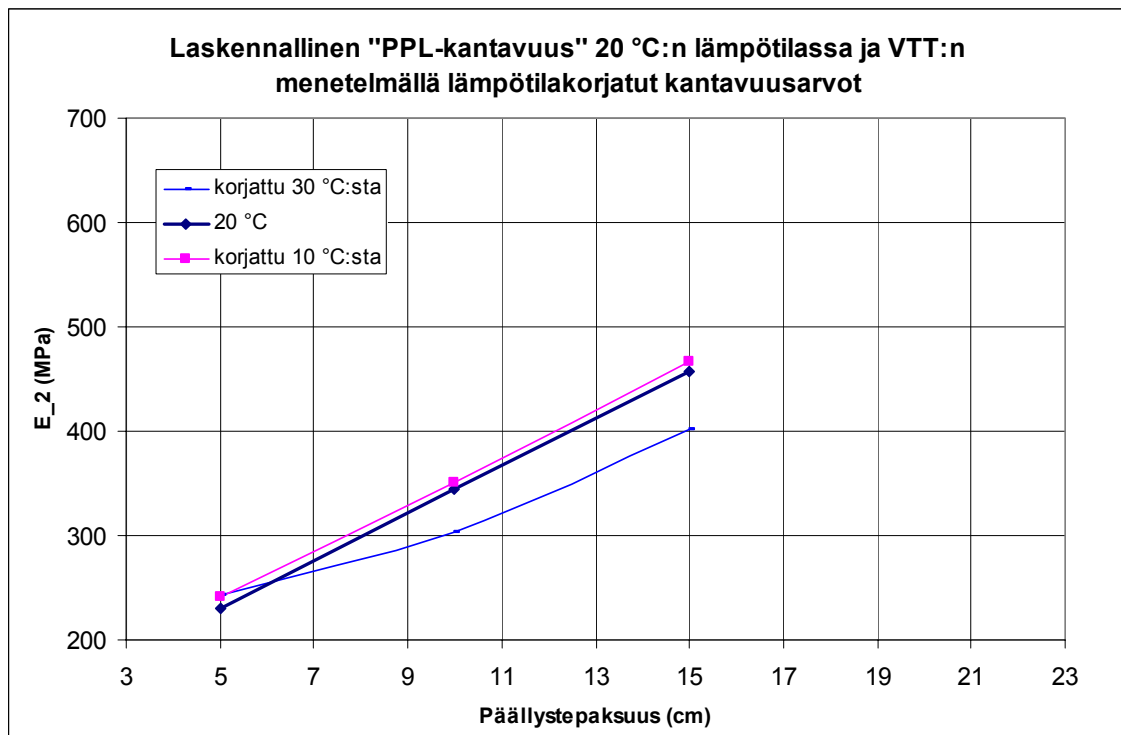
Kuva 1. Laskennalliset ”PPL-kantavuudet” eri lämpötiloissa.



Kuva 2. Laskennalliset "LKL-kantavuudet" päällystepaksuuden funktiona eri lämpötiloissa.



Kuva 3. Laskennallinen "PPL-kantavuus" ja HKR:n menetelmällä 0, 10 ja 30 °C:n laskennallisista kantavuuksista lämpötilakorjatut kantavuusarvot.



Kuva 4. Laskennallinen "PPL-kantavuus" ja VTT:n menetelmällä 10 ja 30 °C:n laskennallisista kantavuuksista lämpötilakorjatut kantavuusarvot.

Taulukko 1. Heavy Loadmanilla mitatut lämpötilakorjaamattomat pistekohtaiset kantavuudet (MPa) ja asfalttipäällysteen keskimääräinen lämpötila mittaushetkellä.

(*Pisteiden 1 – 3 keskimääräinen lämpötila).

Kohde	Mittaus pvm.	T _{mit} (°C)	1	2	3	4	5	6	ka.
Koivumäentie	13.5.2004	10	260	367		316	301	346	318
Ojatie	7.9.2004	17	457	433	439	432	395	417	429
Laivanrakentajantie	15.6.2004	15	745	569	571	477	473	644	580
Aurinkotuulenkatu k.p.	7.9.2004	18	213	197	203	201	213	240	211
Jokisuuntie	16.6.2005	27	233	418	357	431			360
Gustav Pauligin katu	2.6.2005	10		642	675	871	666		713
Maustetehtaankatu	2.6.2005	12	209	242	237	231	209	273	234
Solvikinkatu	2.6.2005	12	381	470	888	726	416	821	617
Aurinkotuulenkatu	2.6.2005	13	386	513	534	383	484	435	456
Pienen Villasaaren tie	2.6.2005	14	248	293	245	282	272	418	293
Pienen Villasaaren kuja	2.6.2005	14	188	171	191	185	184	145	177
Maaherrantie	16.6.2005	18	248	331	401	427	354	526	381
Latokartanonkaari	16.6.2005	25	236	234	213	220	222	185	218
Suunnittelijankatu	16.6.2005	21* & 29	493	523	451	475	796	509	541
Insinöörinkatu	16.6.2005	27	286	460	440	581	569	484	470
Leilikuja	19.8.2005	13	388	369	302	299	347	321	338
Selim Lindqvistin kuja	19.8.2005	13	218	244	240	247	256	257	244
Kalkkivuorenkuja	19.8.2005	23	220	297	260	280	310	389	293
Luokomiehentie jk	19.8.2005	23	186	172	187	191	228	186	192

Taulukko 2. Heavy Loadmanilla mitatuista kantavuuksista lämpötilakorjatut pistekohtaiset tulokset (MPa). (*Laittevertailuja varten poistetut pisteet).

Kohde	Mittaus pvm.	1	2	3	4	5	6	ka.
Koivumäentie	13.5.2004	248	350		301	287	330	303
Ojatie	7.9.2004	444	421	427	420	384	405	417
Laivanrakentajantie	15.6.2004	704	538	539	451	447	608	548
Aurinkotuulenkatu k.p.	7.9.2004	211	195	201	199	211	237	209
Jokisuuntie	16.6.2005	252	452	386	466			389
Gustav Pauligin katu	2.6.2005		512	538	695	531		569
Maustetehtaankatu	2.6.2005	196	228	223	217	197	257	220
Solvikinkatu	2.6.2005	349	429	812*	664	381	751*	564
Aurinkotuulenkatu	2.6.2005	355	471	490	352	444	400	419
Pienen Villasaaren tie	2.6.2005	235	279	233	267	258	397	278
Pienen Villasaaren kuja	2.6.2005	183	166	186	179	178	141	172
Maaherrantie	16.6.2005	239	318	386	411	341	507	367
Latokartanonkaari	16.6.2005	242	240	219	226	228	190	224
Suunnittelijankatu	16.6.2005	502	532	458	558	935*	598	597
Insinöörinkatu	16.6.2005	327	524	502	662	649	552	536
Leilikuja	19.8.2005	365	348	284	282	327	302	318
Selim Lindqvistin kuja	19.8.2005	205	230	226	233	241	243	230
Kalkkivuorenkuja	19.8.2005	227	306	268	289	319	400	301
Luokomiehentie jk	19.8.2005	188	174	190	193	232	188	194

Taulukko 3. Levykuormituslaitteella mitatut lämpötilakorjaamattomat pistekohtaiset kantavuudet (MPa) ja asfalttipäällysteen keskimääräinen lämpötila mittaushetkellä.

(*Pisteiden 1 – 3 keskimääräinen lämpötila).

Kohde	Mittaus pvm.	T _{mit} (°C)	1	2	3	4	5	6	ka.
Koivumäentie	13.5.2004	10	281	322		267	332	313	303
Ojatie	7.9.2004	17	391	421	332	322	304	322	349
Laivanrakentajantie	15.6.2004	26	274	281	267	304	332	274	289
Aurinkotuulenkatu k.p.	7.9.2004	18	261	249	228	238	233	243	242
Jokisuuntie	11.11.2005	27	285	258	233	382			290
Gustav Pauligin katu	2.6.2005	11		490	490	503	546		507
Maustetehtaankatu	2.6.2005	12	265	299	309	304	338	357	312
Solvikinkatu	2.6.2005	12	422	404	378	452	357	357	395
Aurinkotuulenkatu	2.6.2005	13	395	404	364	378	338	364	374
Pienen Villasaaren tie	2.6.2005	14	304	314	285	281	309	299	299
Pienen Villasaaren kuja	2.6.2005	14	197	220	269	265	273	209	239
Maaherrantie	16.6.2005	18	319	348	313	308	330	324	324
Latokartanonkaari	16.6.2005	25	335	303	299	273	299	242	292
Suunnittelijankatu	16.6.2005	21* & 29	354	375	354	324	348	319	346
Insinöörinkatu	11.11.2005	12	455	503	546	531	490	546	512
Leilikuja	17.8.2005	13	285	354	299	308	294	255	299
Selim Lindqvistin kuja	17.8.2005	13	225	294	230	245	225	191	235
Kalkkivuorenkuja	17.8.2005	24	174	258	269	299	319	290	268
Luokomiehentie jk	17.8.2005	24	166	174	180	182	248	212	194

Taulukko 4. Levykuormituslaitteen lämpötilakorjatut pistekohtaiset tulokset (MPa).

Kohde	Mittaus pvm.	1	2	3	4	5	6	ka.
Koivumäentie	13.5.2004	266	304		252	314	296	286
Ojatie	7.9.2004	364	392	309	299	283	299	324
Laivanrakentajantie	15.6.2004	318	326	310	353	385	318	335
Aurinkotuulenkatu k.p.	7.9.2004	256	244	223	233	228	238	237
Jokisuuntie	11.11.2005	333	302	273	447			339
Gustav Pauligin katu	2.6.2005		402	402	412	448		416
Maustetehtaankatu	2.6.2005	239	269	278	274	304	321	281
Solvikinkatu	2.6.2005	363	347	325	389	307	307	340
Aurinkotuulenkatu	2.6.2005	340	347	313	325	291	313	321
Pienen Villasaaren tie	2.6.2005	277	286	259	256	281	272	272
Pienen Villasaaren kuja	2.6.2005	189	211	258	254	262	201	229
Maaherrantie	16.6.2005	297	324	291	286	307	301	301
Latokartanonkaari	16.6.2005	345	312	308	281	308	249	301
Suunnittelijankatu	16.6.2005	365	386	365	434	466	427	407
Insinöörinkatu	11.11.2005	378	417	453	441	407	453	425
Leilikuja	17.8.2005	254	315	266	274	262	227	266
Selim Lindqvistin kuja	17.8.2005	200	262	205	218	200	170	209
Kalkkivuorenkuja	17.8.2005	188	279	291	323	345	313	290
Luokomiehentie jk	17.8.2005	169	177	184	186	253	216	198

Taulukko 5. KUABilla mitatut lämpötilakorjaamattomat pistekohtaiset kantavuudet (MPa) ja asfalttipäällysteen keskimääräinen lämpötila mittaushetkellä.

Kohde	Mittaus pvm.	T _{mit} (°C)	1	2	3	4	5	6	ka.
Gustav Pauligin katu	9.9.2005	15		616	819	801	805		760
Maustetehtaankatu	9.9.2005	19	281	335	353	338	350	333	332
Solvikinkatu	9.9.2005	19	516	598	618	695	448	474	558
Aurinkotuulenkatu	9.9.2005	20	514	630	666	499	469	412	532
Pienen Villasaaren tie	9.9.2005	18	368	379	344	365	420	442	386
Pienen Villasaaren kuja	9.9.2005	21	290	274	300	267	288	212	272
Maaherrantie	9.9.2005	14	619	659	660	629	616	749	655
Latokartanonkaari	9.9.2005	17	374	347	330	313	327	297	331
Suunnittelijankatu	9.9.2005	18	807	743	706	632	862	846	766
Insinöörinkatu	9.9.2005	17	719	817	913	935	946	951	880
Leilikuja	9.9.2005	21	265	340	289	303	297	296	298
Selim Lindqvistin kuja	9.9.2005	17	278	331	242	258	229	209	258
Kalkkivuorenkuja	9.9.2005	20	220	292	295	366	383	456	335
Luokomiehentie	9.9.2005	21	164	162	169	159	222	188	177

Taulukko 6. KUABin lämpötilakorjatut pistekohtaiset tulokset (MPa).

Kohde	Mittaus pvm.	1	2	3	4	5	6	ka.
Gustav Pauligin katu	9.9.2005		547	727	711	714		675
Maustetehtaankatu	9.9.2005	279	332	350	335	347	330	329
Solvikinkatu	9.9.2005	510	591	611	687	443	469	552
Aurinkotuulenkatu	9.9.2005	514	630	666	499	469	412	532
Pienen Villasaaren tie	9.9.2005	362	372	338	359	413	434	380
Pienen Villasaaren kuja	9.9.2005	291	275	301	268	289	213	273
Maaherrantie	9.9.2005	554	590	591	563	551	671	587
Latokartanonkaari	9.9.2005	369	342	325	308	322	293	327
Suunnittelijankatu	9.9.2005	781	719	683	612	834	819	741
Insinöörinkatu	9.9.2005	683	776	867	888	899	903	836
Leilikuja	9.9.2005	267	343	292	306	300	299	301
Selim Lindqvistin kuja	9.9.2005	271	323	236	251	223	204	251
Kalkkivuorenkuja	9.9.2005	220	292	295	366	383	456	335
Luokomiehentie	9.9.2005	165	163	170	160	223	189	178

Liite 8: Levykuormituslaitteen kantavan kerroksen mittaustulokset

Taulukko 1. Levykuormituslaitteella mitatut kantavan kerroksen kantavuudet (MPa).

Kohde	mittaus pvm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ka.
Koivumäentie											
Ojatie											
Laivanrakentajantie	7.6.2004	281	274	296	281	288	313				289
Aurinkotuulenkatu k.p.	30.8.2004	228	228	203	203	203	203				211
Jokisuuntie	2.6.2004	178	172	160	128						160
Gustav Pauligin katu	14.5.2004	205	203	233	201	203	185	197	212	205	205
Maustetehtaankatu	6.5.2004	215	187	199	197	189	182	177			192
Solvikinkatu	29.4.2004	281 203	225 203	187	189	203	195	191	195	174	204
Aurinkotuulenkatu	29.4.2004	172	177	158	138	154	126	193	162	189	163
Pienen Villasaaren tie	21.7.2003	273	205	225	197	245	160				218
Pienen Villasaaren kj	21.7.2003	150	175	149	189	220	156				173
Maaherrantie	12.5.2003	125	160	169	195	169	170	193	166		168
Latokartanonkaari	4-19.5.2004	151 136 167	185 191 167	199 166	160 189	225 169	151 217	184 262	220 245	145 201	187
Suunnittelijankatu	25.6.2003	151	191	178	175	175					174
Insinöörinkatu	25.6.2003	191	189	170	185	169	170	145	174		174
Leilikuja	30.6.2004	98	197	142	166	133					147
Selim Lindqvistin kj	8.10.2004	136	143	162	145	147					147
Kalkkivuorenkuja	10.6.2004	169	233	184	199						196
Luokomiehentie jk	13.5.2005	158	141	175	132	146	118				145

Liite 9: Levykuormituslaitteen mittajalan painuminen taipumasuppiloon

Taulukko 1. Levykuormituslaitteella mitatut E_1 -arvot ja takaisinlasketut taipumat sekä mittakelloilla mitatut poikkeamat. Taipumat ja mittakellon lukemat ilmoitettu mm:inä.

Kohde	mitattu E_1 (MPa)	taipuma	mittakellojen lukema	korjattu taipuma	korjattu E_1 (MPa)	ero mitattuun
Maaherrantie	155	1,209	0,071	1,280	146	-5,5 %
	166	1,129	0,066	1,195	157	-5,5 %
	133	1,409		1,409	133	
	150	1,249	0,052	1,301	144	-4,0 %
	156	1,201	0,12	1,321	142	-9,1 %
	138	1,358	0,068	1,426	131	-4,8 %
Latokartanonkaari	191	0,981	0,014	0,995	188	-1,4 %
	191	0,981	0,018	0,999	188	-1,8 %
	199	0,941	0,0405	0,982	191	-4,1 %
	180	1,041	0,0915	1,132	165	-8,1 %
	182	1,029	0,033	1,062	176	-3,1 %
	140	1,338	0,0695	1,408	133	-4,9 %
Jokisuuntie	150	1,249	0,113	1,362	138	-8,3 %
	139	1,348	0,086	1,434	131	-6,0 %
	134	1,398	0,078	1,476	127	-5,3 %
	251	0,746	0,0425	0,789	237	-5,4 %
Suunnittelijankatu	195	0,961	0,032	0,993	189	-3,2 %
	170	1,102	0,0225	1,125	167	-2,0 %
	172	1,089	0,0385	1,128	166	-3,4 %
	177	1,059	0,064	1,123	167	-5,7 %
	178	1,053	0,0585	1,111	169	-5,3 %
	139	1,348	0,0615	1,409	133	-4,4 %
Luokomiehentie jk	86	2,179	0,035	2,214	85	-1,6 %
	92	2,036	0,0415	2,078	90	-2,0 %
	113	1,658	0,0405	1,699	110	-2,4 %
	96	1,952	0,074	2,026	92	-3,7 %
	114	1,643	0,055	1,698	110	-3,2 %
	115	1,629	0,0685	1,698	110	-4,0 %
Leilikuja	170	1,102	0,081	1,183	158	-6,8 %
	236	0,794	0,034	0,828	226	-4,1 %
	165	1,135	0,039	1,174	160	-3,3 %
	217	0,863	0,0675	0,931	201	-7,3 %
	57	3,287	0,076	3,363	56	-2,3 %
	148	1,266	0,0895	1,355	138	-6,6 %
Kalkkivuorenkuja	115	1,629	0,207	1,836	102	-11,3 %
	132	1,419	0,1725	1,592	118	-10,8 %
	172	1,089	0,121	1,210	155	-10,0 %
	159	1,178	0,1295	1,308	143	-9,9 %
	187	1,002	0,0735	1,075	174	-6,8 %
	133	1,409	0,066	1,475	127	-4,5 %
Selim Lindqvistin kuja	134	1,398	0,0685	1,467	128	-4,7 %
	203	0,923	0,089	1,012	185	-8,8 %
	142	1,319	0,0205	1,340	140	-1,5 %
	170	1,102	0,044	1,146	163	-3,8 %
	155	1,209	0,09	1,299	144	-6,9 %
	130	1,441	0,138	1,579	119	-8,7 %

Liite 9: Levykuormituslaitteen mittajalan painuminen taipumasuppiloon

Taulukko 2. Levykuormituslaitteella mitatut E_2 -arvot ja takaisinlasketut taipumat sekä mittakelloilla mitatut poikkeamat. Taipumat ja mittakellon lukemat ilmoitettu mm:inä.

Kohde	mitattu E_2 (MPa)	taipuma	mittakellojen lukema	korjattu taipuma	korjattu E_2 (MPa)	ero mitattuun
Maaherrantie	319	0,587	0,066	0,653	287	-10,1 %
	348	0,538	0,06	0,598	313	-10,0 %
	313	0,599	0,04	0,639	293	-6,3 %
	308	0,608	0,046	0,654	286	-7,0 %
	330	0,568	0,13	0,698	269	-18,6 %
	324	0,578	0,064	0,642	292	-10,0 %
Latokartanonkaari	335	0,559	0,028	0,587	319	-4,8 %
	303	0,618	0,03	0,648	289	-4,6 %
	299	0,627	0,042	0,669	280	-6,3 %
	273	0,686	0,0785	0,765	245	-10,3 %
	299	0,627	0,0385	0,665	282	-5,8 %
	242	0,774	0,0675	0,842	223	-8,0 %
Jokisuuntie	285	0,657	0,13	0,787	238	-16,5 %
	258	0,726	0,07	0,796	235	-8,8 %
	233	0,804	0,0965	0,901	208	-10,7 %
	382	0,490	0,046	0,536	349	-8,6 %
Suunnittelijankatu	354	0,529	0,028	0,557	336	-5,0 %
	375	0,500	0,0425	0,542	346	-7,8 %
	354	0,529	0,033	0,562	333	-5,9 %
	324	0,578	0,059	0,637	294	-9,3 %
	348	0,538	0,056	0,594	315	-9,4 %
	319	0,587		0,587	319	
Luokomiehentie jk	166	1,129	0,049	1,178	159	-4,2 %
	174	1,077	0,0465	1,123	167	-4,1 %
	180	1,041	0,065	1,106	169	-5,9 %
	182	1,029	0,0865	1,116	168	-7,8 %
	248	0,755	0,0635	0,819	229	-7,8 %
	212	0,884	0,076	0,960	195	-7,9 %
Leilikuja	285	0,657	0,095	0,752	249	-12,6 %
	354	0,529	0,074	0,603	311	-12,3 %
	299	0,627	0,056	0,683	274	-8,2 %
	308	0,608	0,066	0,674	278	-9,8 %
	294	0,637	0,0935	0,731	256	-12,8 %
	255	0,735	0,103	0,838	224	-12,3 %
Kalkkivuorenkuja	174	1,077	0,2135	1,290	145	-16,5 %
	258	0,726	0,123	0,849	221	-14,5 %
	269	0,696	0,141	0,837	224	-16,8 %
	299	0,627	0,106	0,733	256	-14,5 %
	319	0,587	0,082	0,669	280	-12,3 %
	290	0,646	0,1125	0,759	247	-14,8 %
Selim Lindqvistin kuja	225	0,833	0,0895	0,922	203	-9,7 %
	294	0,637	0,0825	0,720	260	-11,5 %
	230	0,815	0,0675	0,882	212	-7,7 %
	245	0,765	0,025	0,790	237	-3,2 %
	225	0,833	0,124	0,957	196	-13,0 %
	191	0,981	0,1395	1,120	167	-12,5 %

Taulukko 1. Staattisen jäykkyyden määrittämiseen käytettyjen porapalojen bitumipitoisuudet, tyhjätilat, ym.

Asfalttilaji	Poranäyte	Päällysteen tiheys (g/cm^3)	Massan tiheys (g/cm^3)	Tyhjätilat (%)	Bitumi- pitoisuus (%)	Näytteen korkeus (mm)
AB8	97/1	2,330	2,390	2,5	6,3	56,23
	149/2	2,333	2,410	3,2	6,3	56,57
	128/2	2,377	2,425	2,0	6,1	47,71
	139/1	2,371	2,450	3,3	6,1	52,15
	165/1	2,308	2,467	6,4	6,5	43,57
AB16 RC40	114/2	2,435	2,436	0,0	5,4	55,92
	134/2	2,406	2,447	1,7	5,8	40,83
	136/3	2,446	2,468	0,9	5,5	46,59
	171/3	2,390	2,439	2,0	5,9	49,4
	171/2	2,428	2,450	0,9	5,5	50,07
	171/1	2,428	2,470	1,7	5,4	46,76
ABK32	49/3	2,351	2,504	6,1	4,1	56,71
	52/1	2,362	2,497	5,4	4,7	53,48
	52/3	2,419	2,522	4,1	4,2	50,97
	93/1	2,402	2,477	3,0	4,9	51,72
	50/2	2,341	2,501	6,4	4,2	51,55
	49/1	2,334	2,516	7,3	3,8	56,49

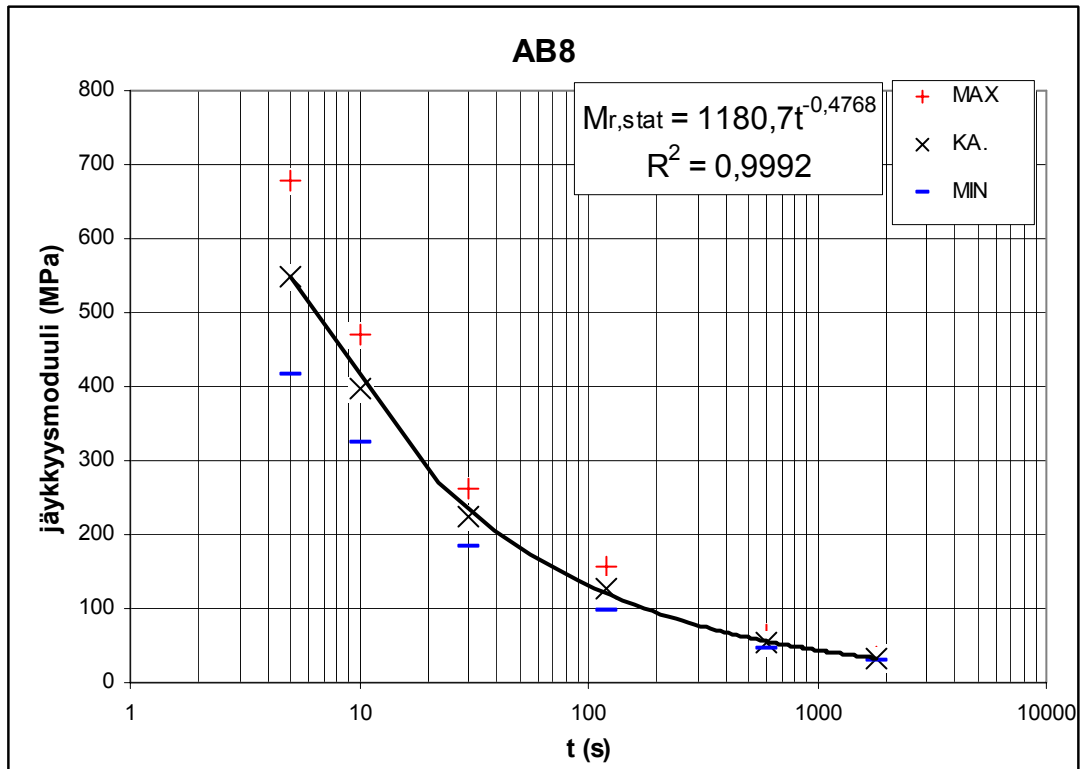
Liite 11: Poranäytteiden suhteelliset painumat ja jäykkyysmoduulit

Taulukko 1. Poranäytteiden suhteelliset painumat.

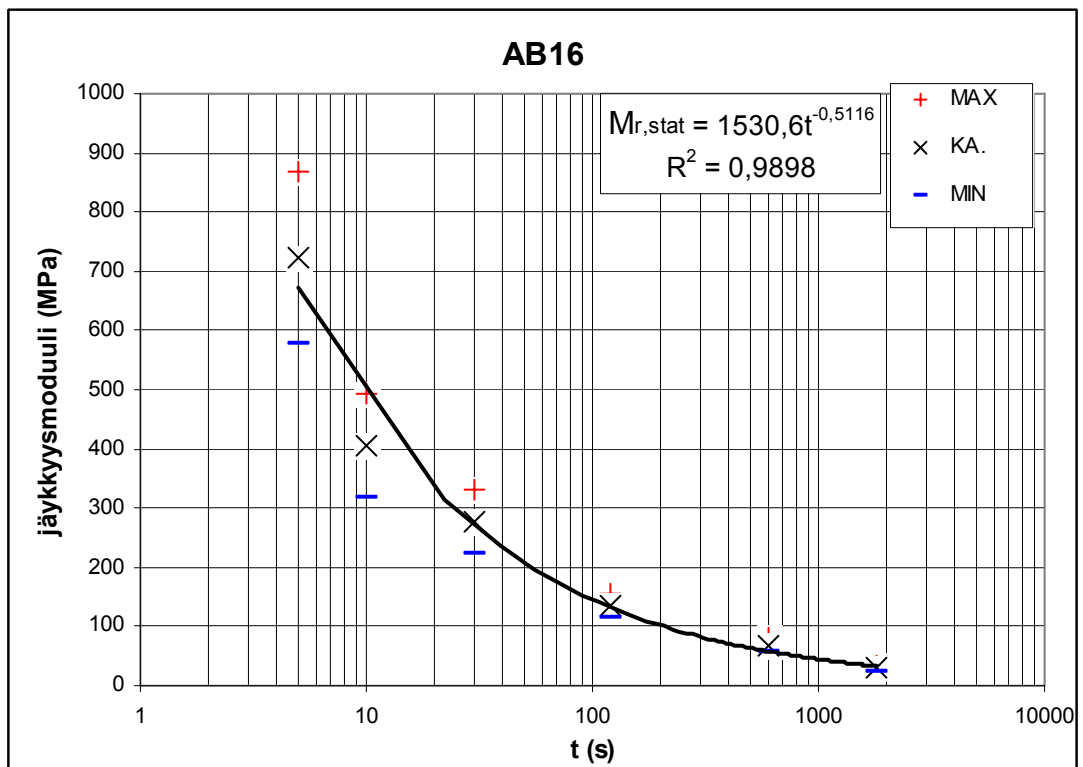
Kuormitusaika (s)		5	10	30	120	600	1800
		Suhteellinen muodonmuutos ($\Delta h / h$)					
Asfalttilaji / Näyte							
AB8	97/1	0,000124	0,000196	0,000409	0,0008	0,001476	0,002632
	149/2	0,000196	0,000285	0,000442	0,000672	0,001962	0,003217
	128/2	0,000168	0,000272	0,000608	0,001195	0,001593	0,003207
	139/1	0,000153	0,000192	0,000422	0,000671	0,001592	0,002934
	165/1	0,000275	0,000321	0,000367	0,00062	0,002433	0,003236
	ka.	0,000183	0,000253	0,00045	0,000792	0,001811	0,003045
AB16	114/2	0,000143	0,000286	0,000483	0,000715	0,001627	0,003398
	134/2	0,000147	0,000171	0,000294	0,000637	0,001543	0,003429
	136/3	0,000193	0,000236	0,000279	0,000901	0,001181	0,00352
	171/3	0,000101	0,000243	0,000385	0,000709	0,001903	0,004312
	171/2	9,99E-05	0,000359	0,000439	0,000919	0,001538	0,003715
	171/1	0,00015	0,000192	0,000299	0,000599	0,001048	0,00216
	ka.	0,000139	0,000248	0,000363	0,000747	0,001473	0,003422
ABK32	49/3	0,000106	0,000176	0,000335	0,000458	0,000935	0,001869
	52/1	0,00015	0,00015	0,00028	0,000542	0,000954	0,001851
	52/3	0,000137	0,000235	0,000334	0,000687	0,001059	0,002433
	93/1	0,000135	0,000135	0,000445	0,000561	0,000773	0,001624
	50/2	0,000155	0,000155	0,000369	0,000601	0,001028	0,002367
	49/1	8,85E-05	0,000124	0,000336	0,000584	0,001062	0,001983
	ka.	0,000129	0,000163	0,00035	0,000572	0,000969	0,002021

Taulukko 2. Poranäytteistä mitatut jäykkyysmoduulit. Keskiarvomoduulit on laskettu suhteellisten painumien keskiarvojen perusteella.

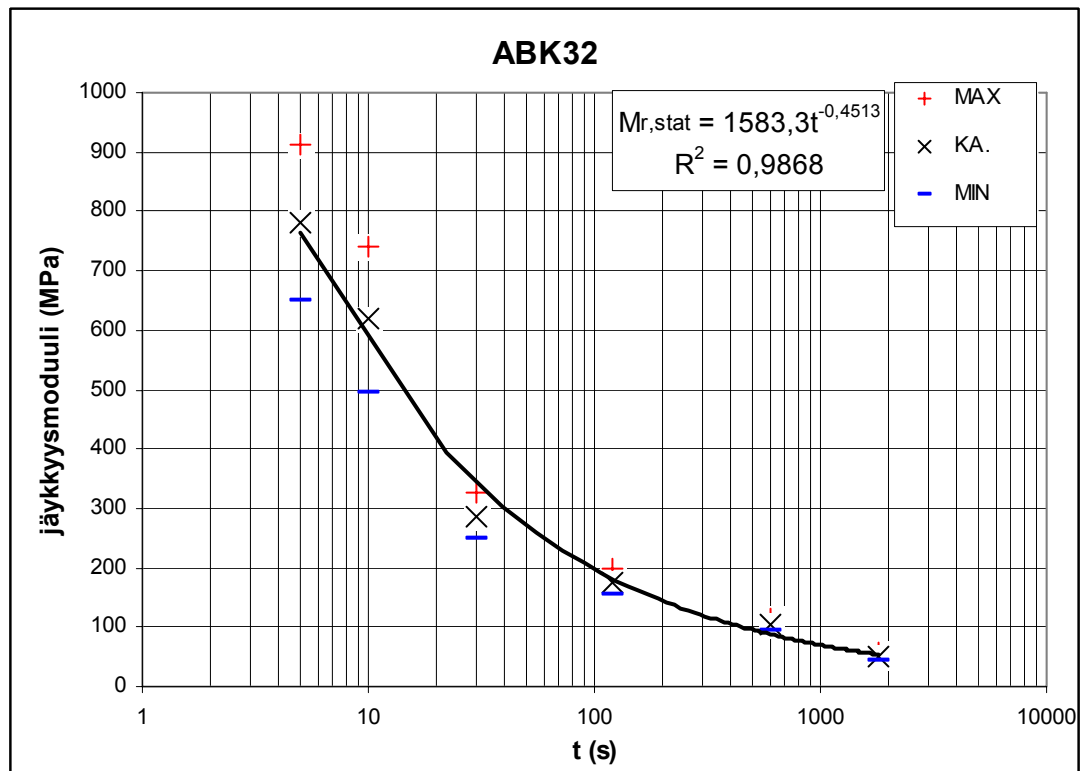
Kuormitusaika (s)		5	10	30	120	600	1800
		Jäykkyysmoduuli (MPa)					
Asfalttilaji / Näyte							
AB8	97/1	807	514	246	126	68	38
	149/2	514	353	227	150	51	31
	128/2	599	369	165	84	63	31
	139/1	655	524	238	150	63	34
	165/1	365	313	274	162	41	31
	ka.	548	397	224	127	55	33
AB16	114/2	702	351	208	140	62	30
	134/2	684	586	342	158	65	29
	136/3	520	426	360	111	85	29
	171/3	993	414	261	142	53	23
	171/2	1006	280	229	109	65	27
	171/1	671	522	336	168	96	47
	ka.	723	405	277	135	68	29
ABK32	49/3	950	570	300	219	108	54
	52/1	672	672	358	185	105	54
	52/3	732	427	301	146	95	41
	93/1	742	742	226	179	130	62
	50/2	648	648	273	167	98	42
	49/1	1135	811	299	172	95	51
	ka.	781	618	287	176	104	50



Kuva 1. AB8:n staattinen jäykkyyssmoduuli ajan funktiona. Kuvaan on merkitty myös maksimi- ja minimiarvot keskihajonnan perusteella.



Kuva 2. AB16:n staattinen jäykkyyssmoduuli ajan funktiona. Kuvaan on merkitty myös maksimi- ja minimiarvot keskihajonnan perusteella.



Kuva 3. ABK32:n staattinen jäykkyyshmoduuli ajan funktiona. Kuvaan on merkitty myös maksimi- ja minimiarvot keskihajonnan perusteella.