



INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**DÜNAAMILISE KOORMUSSEADME (FWD)  
MÕÕTMISTULEMUSTE ALUSEL TEEKATENDI  
KANDEVÕIME ARVUTUSMETOODIKA  
TÄPSUSTAMINE**

**ADJUSTMENT OF THE PAVEMENT BEARING CAPACITY  
CALCULATION METHODOLOGY BASED ON THE FALLING  
WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD) MEASUREMENT DATA**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Jaan Viljas

Üliõpilaskood: 153860EATI

Juhendaja: Dots. Andrus Aavik

Tallinn 2021

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

10. mai 2021

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

"....." ..... 2021

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....2021

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....  
/ nimi ja allkiri /

# LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, **Jaan Viljas**, sünd. 17.12.1995,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **DÜNAAMILISE KOORMUSSEADME (FWD) MÕÕTMISTULEMUSTE ALUSEL TEEKATENDI KANDEVÕIME ARVUTUSMETOODIKA TÄPSUSTAMINE**, mille juhendaja on Andrus Aavik,
  - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

<sup>1</sup>Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

\_\_\_\_\_ (allkiri)

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **JAAN VILJAS**

Üliõpilaskood **153860EATI**

Õppekava: **EATI02/15 Teedehitus ja geodeesia**

Peeriala: **Teedehitus**

Lõputöö teema:

### **DÜNAAMILISE KOORMUSSEADME (FWD) MÕÕTMISTULEMUSTE ALUSEL TEEKATENDI KANDEVÕIME ARVUTUSMETOODIKA TÄPSUSTAMINE**

#### **Adjustment of the Pavement Bearing Capacity Calculation Methodology Based on the Falling Weight Deflectometer (FWD) Measurement Data**

Juhendaja: **Dots. Andrus Aavik**

andrus.aavik@taltech.ee

Lõputöö põhiülesanded:

- Kirjeldada senine Eestis kasutatud FWD mõõtmise meetoodika katttega teedel nii võrgu kui objekti tasandil ning tekkinud probleemid mõõtmis- ja arvutustöödel.
- Hinnata FWD kontrollpunktide 1999-2013 aastate mõõtebaasi aluseks võttes olemasoleva kandevõime ekvivalentseks taandamise meetoodika paikapidavust, mis eeldab meetoodikas toodud arvutusvalemite kehtivuse kontrolli.
- Analüüsi tulemusena teha ettepanekud kandevõime mõõtmiste teostamise meetoodika ning aja osas.
- Anda ülevaade sarnase kliimavõõtmega riikides kasutatavate FWD mõõtmiste lähenemiste ja meetoodikate osas.
- Kajastada teistes riikides erinevate enam levinud ja Eesti tingimustesse sobivate FWD seadmete kasutamise nõudeid ja erisusi.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. FWD kontrollpunktide mõõtebaasi ja Percojaamade andurite asukohtades teostatud mõõtmiste tulemuste analüüs, mille eesmärk on hinnata praegu kasutatava kandevõime taandamise meetoodika ja arvutusvalemi kehtivust.
2. Analüüsi tulemuste alusel teha ettepanekud kandevõime taandamise arvutusmeetoodika täiendamiseks.
3. Sarnase kliimaga riikide kandevõime mõõtmiste praktikate selgitamine ja analüüs.
4. Anda soovitused kandevõime mõõtmise teostamise meetoodika ja aja osas.

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1. Üldteoreetilise osa kirjutamine, andmete kogumine	30.10.2020
2. Andmetöötluse arvutuslik osa	29.01.2021
3. Andmetöötluse analüütiline osa	12.02.2021
4. Lähiriikide küsimustiku koostamine ja välja saatmine	30.10.2020
5. Lähiriikide küsimustiku vastuste analüüs	04.12.2020
6. Põhijärelduste koostamine	26.02.2021
7. Kokkuvõtte koostamine	12.03.2021
<b>Lõputööde 95% ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks</b>	<b>10.05.2021</b>

**Lõputöö esitamise tähtaeg:**

**24. mai 2021**

Lõputöö ülesanne välja antud: 21.09.2020

Juhendaja: Andrus Aavik

Ülesande vastu võtnud: Jaan Viljas

Avalikustamise piirangu tingimused: puuduvad

# SISUKORD

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks .....	3
SISUKORD .....	6
SISSEJUHATUS.....	7
1. Käesolev mõõtmispraktika ja selle puudused .....	9
2. Andmetöötluse üldosa.....	12
2.1 Mõõtetulemused.....	12
2.2 Arvutusmetoodika .....	15
2.3 Teekatendi üldise elastsusmooduli arvutamine .....	19
2.4 Kandevõime muutus kontrollpunktis aastate võrdluses.....	28
2.5 Kuu teguri $M_i$ väärtuse mõju arvatud elastsusmooduli väärtusele.....	31
2.6 Asfaltkatte temperatuuri T väärtuse mõju arvatud elastsusmooduli väärtusele .....	34
3. Eesti tingimustesse sobivad FWD seadmed.....	37
3.1 Dynatest FWD.....	37
3.2 KUAB FWD .....	39
3.3 Primax FWD.....	41
3.4 Greenwood TSD .....	42
3.5 Seadmete võrdlus .....	43
4. Sarnase kliimaga riikide kandevõime mõõtmiste parktikad ja nende analüüs .....	47
4.1 Läti kandevõime mõõtmiste praktika.....	48
4.2 Leedu kandevõime mõõtmiste praktika .....	50
4.3 Soome kandevõime mõõtmiste praktika .....	52
4.4 Taani kandevõime mõõtmiste praktika .....	54
4.5 Lähiriikide kandevõime mõõtmiste praktika analüüs.....	55
KOKKUVÕTE.....	58
SUMMARY .....	62
Kasutatud kirjandus .....	66
LISAD.....	68
LISA 1 Kontrollpunktide geoloogia .....	69
LISA 2 Meetodile vastavad päevased tegurid .....	76
LISA 3 Kontrollpunktide keskmised elastsusmooduli väärtused .....	81
LISA 4 Elastsusmoodulid ja nende erinevused erinevate kuu tegurite $M_i$ väärtuste juures.....	85
LISA 5 Elastsusmoodulid ja nende erinevused erinevate temperatuuri T väärtuste juures.....	88
LISA 6 KUAB ja Dynatest FWD-seadmete võrdlus.....	91
LISA 7 Läti vastused FWD kasutamisega seotud küsimustele .....	111
LISA 8 Leedu vastused FWD kasutamisega seotud küsimustele.....	114
LISA 9 Soome vastused FWD kasutamisega seotud küsimustele.....	122
LISA 10 Taani vastused FWD kasutamisega seotud küsimustele.....	130

## SISSEJUHATUS

Teed on oluline osa meid ümbritsevast taristust, mistõttu peame tagama nende vastupidavuse ning hea seisukorra. Oluliseks sisendiks kvaliteetsele ja kauakestvale teele on teekonstruktsiooni tugevus. Tegemist on ühe peamise parameetriga teedevõrgu seisukorra hindamiseks ning ehitus- ja remonttööde vajaduse määramiseks ja planeerimiseks. Hea ülevaade teede seisukorrast annab võimaluse teha kaalutletud ja mõistlikke otsuseid.

Käesolev diplomitöö keskendub A. Aaviku poolt aastal 2003. aastal tema doktoritöö raames loodud dünaamilise koormusseadmega (FWD) katendi üldise elastsusmooduli arvutamise meetodika täiendamisele. Dünaamiliselt koormusseadmelt saadud mõõtmisandmete alusel arvutatakse teekonstruktsiooni üldine elastsusmoodul, mille tulemus oleks ekvivalentne elastsete teekatendite juhise (katendite arvutamise programmi KAP) kohase elastsusmooduliga. Antud töö raames on peamiseks eesmärgiks aastatel 2002 kuni 2013 teostatud FWD mõõteandmete kaasamine analüüsi, mille abil selgitada välja teekonstruktsiooni kandevõime mõõtetulemuste teisendamisel hetkel kasutatava meetodika paikapidavus ning esitada ettepanekud selle täiendamiseks.

Töömahu peamise osa moodustab andmetöötlus, kus selgitatakse arvutusmeetodikat ning tuuakse välja, millises mahus on uusi mõõteandmeid kaasatud ja kuidas need mõjutavad teekatendi üldise elastsusmooduli arvutamist. Kaasatud on neli erinevat lähteandmete empiiriliste konstantide kombinatsiooni, mille kasutamisel arvutatud katendi üldise elastsusmooduli väärtuseid võrreldakse katendiarvutamise programmiga KAP leitud väärtustega. Lisaks eeltoodule püütakse leida võimalik seos katendi üldise elastsusmooduli muutumisest ajas.

Kandevõime määramise täpsus ei sõltu ainult arvutusmeetodist, vaid ka seadmest, mille andmeid arvutusteks kasutatakse. Seetõttu on vaatluse alla võetud ka erinevad dünaamilise koormamise (FWD) seadmed. Töösse kaasati neli erinevat seadet, mida kasutatakse antud ajahetkel ka Eesti lähiriikides.

Töös vaadeldakse ka Eestiga sarnase kliimaga riikide kandevõime mõõtmiste praktikaid, kus kajastatakse nelja riiki: Läti, Leedu, Taani ning Soome. Analüüs teostatakse igale riigile saadetud küsimustiku vastuste põhjal.

Olulisel kohal on lõputöös kasutusel oleva teede kandevõime mõõtmispraktika analüüsimine ning selle puuduste hindamine. Ettekujutuse saab Eesti

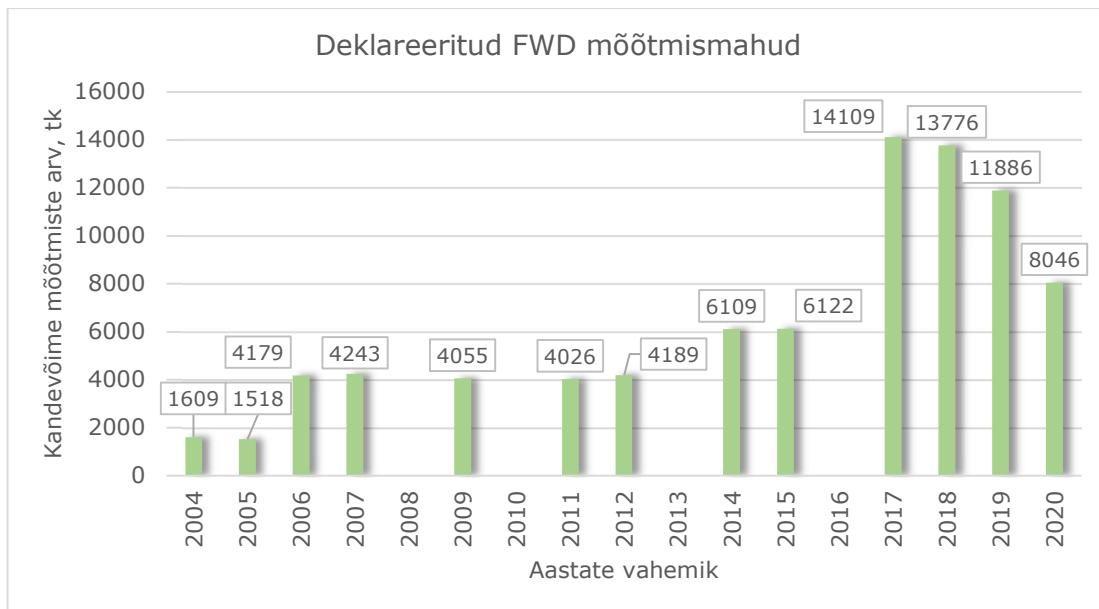
teekonstruktsioonide kandevõime senistest mõõtmiste mahtudest ning teostamisest. Lisaks antakse ka soovitused FWD mõõtmiste edasiseks teostamiseks.



# 1. KÄESOLEV MÕÕTMISPRAKTIKA JA SELLE PUUDUSED

Eestis sai teekonstruktsiooni kandevõime mõõtmise alguse hetkest, mil Maanteeameti Tehnokeskus ostis 1996. aastal Dynatest FWD seadme. Kandevõime mõõtmist alustati esialgu põhimaanteedel ning seejärel tugimaanteedel. Viimaseks jäeti kõvakattega kõrvalmaanteed, kus aasta keskmiseks ööpäevaseks liiklussageduseks oli üle 500 auto ööpäevas.

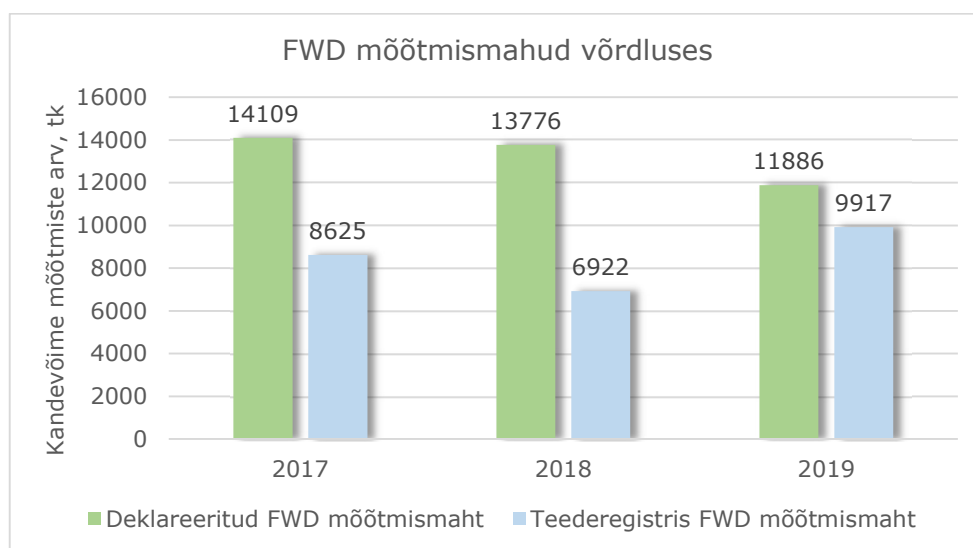
Alltoodud joonisel 1.1 on märgata selgeid erinevusi teekonstruktsiooni kandevõime mõõtmiste mahtudes aastate lõikes. Antud nähtus on tingitud Maanteeameti ja AS Teede Tehnokeskuse vahel sõlmitud erinevatest lepinguperioodidest ja -mahtudest.



Joonis 1.1 Teekonstruktsiooni kandevõime mõõtmiste arv (punkti/aastas) aastate lõikes [1]

Võttes vaatluse alla 2017, 2018 ja 2019 aastate mõõtmismahud (Joonis 1.2 Teostatud mõõtmismahtude ning teeregistris sisalduvate mõõtmismahtude võrdlus), näeme suurt erinevust teostatud mõõtmismahtude ning teeregistris sisalduvate vastavate aastate FWD andmetega. Teeregistrisse sisestatud ja tegelikult teostatud mõõtmismahud ei ole võrdsed põhjustel, et mõned FWD mõõtmised teostatakse ainuüksi projekti koostamiseks. Seejärel toimub tee rekonstrueerimine ja uue katte FWD mõõtmistulemuste teeregistrisse sisestamine, mis tähendab, et vanad andmed

registrist likvideeritakse, kuna nad ei iseloomusta vastvalminud katet. Uutele katetele teostatakse kandevõime mõõtmine järgmisel aastal peale katte valmimist. Lisaks, projekteerimisobjektide ja uute katete kandevõime mõõtmise andmetest kantakse teeregistrisse mõõtmistulemused iga 100 m kohta (mõõdetakse aga iga 50 m järel) ehk üks tulem analoogselt võrgumõõtmiste andmetega. Sellest tulenevalt on registrisse kantud poole vähem andmeid, kui mõõtmistel saadi. [1]



Joonis 1.2 Teostatud mõõtmismahude ning teeregistris sisalduvate mõõtmismahude võrdlus [1]

Kandevõime võrgumõõtmiste planeerimisel lähtutakse kolmest peamisest tingimusest, milleks on:

- Kõvakattega teelõigud;
- Vanemate kui 15 aasta FWD andmetega teelõigud;
- Teelõigud, kus aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus AKÖL > 500.

Teeregistris olevate andmete põhjal on 47% FWD mõõtmistest viimastel aastatel tehtud oktoobris. Lisades juurde septembris teostatud FWD mõõtmised, siis 72% mõõtmistest on tehtud sügisesel ajaperioodil. Kõige stabiilsemate mõõtmisoluudega suvisel perioodil on FWD mõõtmis teostatud vaid 16% olemasolevatest andmeteist. [1]

Võttes vaatluse alla viimaste aastate mõõtmispraktika, siis enamus projekteerimisele minevate teelõikude FWD mõõtmisi on teostatud just aprillis ja mais Ajaperioodil, kus teekatte kandevõime on kõige muutlikumas seisundis ja kus teekonstruktsiooni sulamist mõjutavad lume rohkus ning temperatuurid. Seni teostatud FWD

mõõtmistulemused näitavad, et suure tõenäosusega võib aprillis (ja mõningatel juhtudel isegi mais) teekonstruktsioon olla veel külmunud. Sellest lähtuvalt ei ole meil võimalik anda alati aprilli ja mai FWD mõõtmistulemuste alusel adekvaatset hinnangut tee kandevõimele, teadmata, kas teekate on mõõtmise toetamise ajal külmunud või mitte.

Soovituseks oleks FWD mõõtmisi teostama hakata alates juunist, seda põhjustel, et kevadisel perioodil on teekonstruktsiooni seisund pidevas muutuses. Sõltuvalt talvede ja kevade iseloomust võib kandevõime olulisel määral olla muutlik ning kasutatud andmestik ei kajasta viimastel aastatel toimunud kliimamuutusi. Seetõttu uurimustöös toodud aprilli ja mai päevakoeffitsiendid ei vasta tingimata tegelikele oludele. [1]

## 2. ANDMETÖÖTLUSE ÜLDOSA

### 2.1 Mõõtetulemused

Andrus Aaviku doktoritöö [2], mis käsitles muuhulgas FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud katendi üldise elastsusmooduli väärtuse taandamist võrreldavaks KAP (Katendi Arvutamise Programm) alusel arvutatud katendi üldise elastsusmooduli väärtusega, raames valiti 1999. aastal 31 ja 2001. aastal täiendavalt 19 kontrollpunkti FWD mõõtmiste teostamiseks olemasoleval kattekonstruktsioonil. Eelnimetatud kontrollpunktides 1999-2002 toimunud FWD mõõtmistulemuste alusel (kokku 1278 FWD mõõtmist) valmis A. Aavikul 2003. aasta kevadeks meetodika FWD mõõtmistulemuste alusel KAP-iga võrreldava katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks, mida kasutatakse tänase päevani. Samades kontrollpunktides jätkusid enamuses mõõtmised veel kuni 2007. aastani.

2008. aastal otsustati FWD mõõtmistega jätkata, et suurendada A. Aaviku meetodika aluseks olevat andmebaasi ning selleks valiti põhimaanteedel nr 1, 2, 4 ja 9 ning tugimaanteel nr 15 kaksteist 40 m pikkust lõiku, kus nimetatud lõikudel toimusid mõõtmised 5 m sammuga, kokku 9 mõõtmist lõigul. Nelja uue mõõdetava lõigu asukohta jäävad ka A. Aaviku poolt valitud 4 kontrollpunkti ja neis punktides on seega olemas FWD mõõtmistulemused aastatest 1999-2013, mis võimaldab analüüsida, kuidas neis kontrollpunktides on katendi kandevõime aja jooksul muutunud.

FWD mõõtmisi on teostatud ka aastatel 2011-2014 varakevadel (katendi sulamise ajal) ja hilissügisel (katendi külmunise ajal) viie Percojaama (mõõdab niiskust ja külmumist katendikonstruktsioonis) asukohas. Sarnaselt 2008 valitud lõikudele toimusid ka Percojaamade asukohtades mõõtmised 40 m pikkustel lõikudel 5 m sammuga. Nendes punktides on käesolevas uuringus arvesse võetud ainult mõõtmised perioodist, mil teekonstruktsioon oli juba sulanud. Ülejäänud mõõtmisi neist punktides arvesse ei ole võetud.

Kõigi kontrollpunktide/-lõikude kohta on toodud informatsioon asukoha (teeregistri aadressid), mõõtmiste teostamise aastate ja geoloogia olemasolust tabelis 2.1:

- Kontrollpunktid 1-50 – A. Aaviku doktoritöö aluseks olevad punktid;
- Kontrollpunktid 101-219 – 2008 valitud uued kontrollpunktid;
- Kontrollpunktid 1001-5009 – Percojaamade asukohtades asuvad kontrollpunktid.

**Tabel 2.1** Statistikas kaasatavad mõõtepunktid

KP nr	KP address				Mõõtmiste aastad	Ehitatud uus kate	Mõõtmispunkte KP asukohas	Geoloogia olemasolu / puurimisaasta
	Mnt	Stee	TO	Kaugus				
1	8	1	2	3448	1999-2007		1	1999
2	8	1	3	429	1999-2007		1	1999
3	8	1	4	450	1999-2007		1	1999
4	8	1	4	6251	1999-2007		1	1999
5	8	1	5	3840	1999-2007		1	1999
6	8	1	6	344	1999-2003		1	1999
7	8	1	6	1176	1999-2007		1	1999
8	8	1	6	2280	1999-2007		1	1999
9	8	1	7	1695	1999-2007		1	1999
10	11102	1	1	?	1999-2003		1	1999
11	11102	1	1	1290	1999-2003		1	1999
12	9	1	2	2401	1999-2007		1	1999
13	9	1	2	2640	1999-2007		1	1999
14	9	1	3	468	1999-2007		1	1999
15	9	1	3	2727	1999-2007		1	1999
16	9	1	3	4922	1999-2004		1	1999
17	9	1	3	6309	1999-2007		1	1999
18	9	1	3	6695	1999-2007		1	1999
19	9	1	3	7280	1999-2007		1	1999
20	11	1	3	353	1999-2003		1	1999
21	11	1	3	1970	1999-2004		1	1999
22	11	1	3	4264	1999-2004		1	1999
23	11	1	4	611	1999-2004		1	1999
24	11	1	4	4707	1999-2007		1	1999
25	11	1	4	6032	1999-2007		1	1999
26	8	1	6	2407	1999-2004		1	1999
27	8	1	6	2320	1999-2004		1	1999
28	11102	1	1	1628	1999-2003		1	1999
29	11370	12	2?3	6011	1999-2003		1	1999
30	11370	1	2?3	4944	1999-2003		1	1999
31	11370	1	2?3	1328	1999-2003		1	1999
32	2	1	8	1364	2001-2007		1	2001
33	2	1	8	2518	2001-2007		1	2001
34	2	1	8	4769	2001-2007		1	2001
35	2	1	10	1894	2001-2003		1	2001
36	2	1	10	2083	2001-2003		1	2001
37	2	1	10	2083	2001-2003		1	2001
38	2	1	9	6896	2001-2003		1	2001
39	11201	1	1	?	2001-2003		1	2001
40	11201	1	?	?	2001-2003		1	2001
41	11302	1	1	5354	2001-2003		1	2001
42	11302	1	1	3121	2001-2003		1	2001
43	4	1	5	2329	2001-2007		1	2001
44	4	1	5	2632	2001-2007		1	2001
45	4	1	5	3668	2001-2007		1	2001
46	4	1	5	5734	2001-2007		1	2001
47	11404	1	1	9583	2001-2003		1	2001
48	11406	1	1	7620	2001-2003		1	2001
49	17	1	3	5083	2001-2007		1	2001
50	17	1	3	5087	2001-2007		1	2001
<b>101-109</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3740-3700</b>	<b>2008-2013</b>	<b>01.09.2017</b>	<b>9 - iga 5m</b>	<b>Puudub</b>

KP nr	KP address				Mõõtmiste aastad	Ehitatud uus kate	Mõõtmispunkte KP asukohas	Geoloogia olemasolu / puurimisaasta
	Mnt	Stee	TO	Kaugus				
<b>111-119</b>	1	2	4	4400-4360	2008-2013	01.09.2015 111-113 01.09.2017 114-119	9 - iga 5m	Puudub
<b>121-129</b>	2	2	4	3302-3262	2008-2013	01.07.2008	9 - iga 5m	2020
<b>131-139</b>	2	2	4	3182-3142	2008-2013	01.07.2008	9 - iga 5m	2020
<b>141-149</b>	4	1	5	2309-2349	2008-2013	01.11.2017 uus 2+1 tee	9 - iga 5m	2001
<b>151-159</b>	4	1	5	2612-2652	2008-2013	01.11.2017 uus 2+1 tee	9 - iga 5m	2001
<b>161-169</b>	9	1	2	2381-2421	2008-2013	02.11.2015	9 - iga 5m	1999
<b>171-179</b>	15	1	10	955-995	2008-2013	31.07.2006	9 - iga 5m	2020
<b>181-189</b>	9	1	2	2620-2660	2008-2013	02.11.2015	9 - iga 5m	1999
<b>191-199</b>	15	1	10	1330-1370	2008-2013	31.07.2006	9 - iga 5m	2020
<b>201-209</b>	15	1	11	440-480	2008-2013	15.07.2016	9 - iga 5m	Puudub
<b>211-219</b>	1	2	4	4400-4360	2008-2013	01.09.2015	9 - iga 5m	Puudub
<b>1001-1009</b>	22	1	10	1751-1711	2011-2014	Emumäe Perco	9 - iga 5m	2010
<b>2001-2009</b>	63	1	1	0-40	2011-2014	Karisilla Perco	9 - iga 5m	2010
<b>3001-3009</b>	92	1	16	5160-5120	2011-2014	Napsi Perco	9 - iga 5m	2010
<b>4001-4009</b>	17	1	6	7314-7354	2011-2014	Suursoo Perco	9 - iga 5m	Puudub
<b>5001-5009</b>	10	1	18	232-192	2011-2014	Valjala Perco	9 - iga 5m	2010

Kõigis eeltoodud punktides on mõõtmisi teostatud igal aastal aprillist oktoobrini igas kuus vähemalt üks mõõtmine. Kokku on tabelis 2.1 esitatud mõõtmisaastatel teostatud kõigis kontrollpunktide kokku 6441 FWD mõõtmist.

2008. aastal valitud kontrollpunktides ei teostatud geoloogilisi puurimisi katendikonstruktsiooni ja aluspinnase määramiseks, mis on vajalik katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks KAP-iga ja mille alusel omakorda toimub seose leidmine FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud elastsusmooduli taandamiseks KAP-iga arvutatud mooduliks. Täna, 2020. aastal, on osadele neist lõikudest (põhimaanteel nr 1 ja tugimaanteel nr 15 kokku 4 lõiku, tabelis 2.1 punasega) ehitatud peale 2013. aastat uus kate, mistõttu neil ei ole mõtet muutunud katendikonstruktsiooni tõttu täna enam geoloogilisi puurimisi teostada. Neljal lõigul (põhimaanteel 2 ja tugimaanteel 15) ei ole

peale 2013. aastat katendi remonti toimunud ja neis punktides teostasime 2020. aastal geoloogilised puurimised. Neljas 2008. aastal valitud punktis (põhimaantee nr 4 ja 9) on geoloogilised puurimised teostatud 1999. ja 2001. aastal A. Aaviku doktoritöö raames. Geoloogia ja seega katendikonstruktsioon puudub ka ühe Percojaama (Suursoo) asukohas.

Kuna osades kontrollpunktides/-lõikudel puudub geoloogia, mille alusel arvutada KAP-iga katendi üldine elastsusmoodul, siis saame kõigist 6441-st FWD mõõtmistulemust käesolevas töös teostatavas analüüsis kaasata ainult 4953 mõõtmistulemust, millest:

- 2102 mõõtmistulemust kontrollpunktides 1-50 ehk A. Aaviku doktoritöö koostamisel valitud punktidest;
- 2545 mõõtmistulemust kontrollpunktidest 101-219 ehk 2008-2013 toimunud mõõtmistest;
- 306 mõõtmistulemust kontrollpunktidest 1001-5009 ehk Percojaamades toimunud mõõtmistest.

## 2.2 Arvutusmetoodika

Põhivalem, mida katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks kasutatakse, põhineb Boussinesq'i võrranditel. Antud valem on koormusplaadi korral esitatav alljärgneval kujul: [2]

$$E_{eq} = \frac{0,25\pi FS(1-\mu^2)}{d_0}, \quad (2.1)$$

kus:  $E_{eq}$  - katendi üldine E-moodul koormusplaadi keskel (MPa);  
F - kontaktsurve koormusplaadi all (kPa);  
S - koormusplaadi diameeter (mm);  
 $\mu$  - Poisson'i tegur;  
 $d_0$  - vajum koormusplaadi keskel ( $\mu\text{m}$ ).

Seost (2.1) on lihtne kasutada FWD mõõtmistulemuste alusel katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks, sest kõik vajalikud lähteandmed selleks on olemas:

- Kontaktsurve koormusplaadi all ja vajum koormusplaadi keskel salvestatakse FWD mõõtmise teostamisel;
- Koormusplaadi diameeter sõltub katseseadmest (Dynatest 8002 seadme puhul üldjuhul 300 mm);
- Poisson'i tegur vastavalt KAP-ile on katendi üldise elastsusmooduli arvutamisel 0,3.

Samas seose (2.1) alusel arvatud katendi üldise elastsusmooduli väärtus ei lange kokku KAP-is kasutatud katendi materjalide ja pinnaste elastsusmoodulite alusel arvatud katendi üldise elastsusmooduli väärtustega. Tavaliselt on seose (2.1) alusel arvatud katendi üldise elastsusmooduli väärtus suurem, kui KAP-iga arvatud väärtus. Põhjuseid on mitmeid:

- KAP-iga arvutatakse katendi kevadine ehk kõige madalam üldine elastsusmoodul, FWD mõõtmisi teostatakse aga üldjuhul varakevadest hilissügiseni;
- Dynatest 8002 seadme koormuskestus on 0,02-0,03 sekundit, KAP-i meetodikas materjalide ja pinnaste elastsusmooduli määramisel laboris on koormuskestus 0,1 sekundit;
- Sidumata kihtide niiskustingimuste ja bituumeniga seotud kihtide temperatuuri muutus FWD mõõtmisperioodi jooksul kevadest sügiseni.

Andrus Aavik leidis enda doktoritöös, et sobivaks meetodiks, mis võimaldaks kaasata kõiki üldise elastsusmooduli väärtust mõjutavaid tegureid korraga, on Cobbi-Douglas'ee teooria, kuna see võimaldab leida seoseid suure hulga muutujate vahel. Teostuseks saab kasutada Microsoft Excel'i Linest funktsiooni. [2]

Alternatiiv 2001-52 meetodikale katendi üldise elastsusmooduli arvutusvalemile, mis võtab arvesse teadaolevad võimalikud tegurid, mis mõjutavad tema väärtust, võib esitada järgneval kujul:

$$y = a_0 * x_1^{a_1} * x_2^{a_2} * \dots * x_n^n, \quad (2.2)$$

Seost (2.2) saab esitada ka logaritmilisel kujul:

$$\log y = \log a_0 + a_1 \log x_1 + a_2 \log x_2 + \dots + a_n \log x_n, \quad (2.3)$$

kus:  $y$  – arvutatav väärtus;  
 $a_0 \dots a_n$  – konstandid;  
 $x_1 \dots x_n$  – muutujad, mis mõjutavad arvutatavat väärtust.

Sarnasuse abil saame väljendada katendi üldist elastsusmoodulit, mis on võrreldav KAP-i alusel arvatuga.

$$E_{eq2001-52} = a_0 * x_1^{a_1} * x_2^{a_2} * \dots * x_n^{a_n} * E_{eq}^{a_m}, \quad (2.4)$$

kus:  $E_{eq}$  – katendi üldine elastsusmoodul koormusplaadi all (seos (2.1));



$a_0 \dots a_n$  – leitavad konstandid;

$x_1 \dots x_n$  – muutujad, mis mõjutavad arvutatavat väärtust (nt niiskuspaikkond, temperatuur, FWD mõõtmiste aeg jms).

Seose (2.4) saab esitada samuti logaritmilisel kujul:

$$\log E_{eqKAP} = \log a_0 + a_1 \log x_1 + a_2 \log x_2 + \dots + a_n \log x_n + a_m \log E_{eq}, \quad (2.5)$$

Seoses (2.5) esinevate üldiste muutujate asendamisel teada olevate võimalike teguritega (kombineerimise võimalus), mis mõjutavad katendi üldise elastsusmooduli väärtust, saame seose (2.5) esitada näiteks kujul :

$$E_{eqKAP} = C * E_{eq}^e * Ekap^t * H^h * K^k * M_i, \quad (2.6)$$

kus  $E_{EeqKAP}$  – katendi üldine E-moodul, mis on võrreldav KAP-i meetodika alusel arvutatuga, MPa;

$E_{eq}$  – katendi üldine elastsusmoodul koormusplaadi all (seos (2.1)), MPa;

T – bituumensideainet sisaldava katte temperatuur FWD seadmega mõõtmise hetkel, °C;

H – seotud kihtide (asfaltkate + stabiliseerimine) paksus, cm;

K – katte (asfaltkatte) paksus, cm;

$M_i$  – tegur arvestamiseks kuud, millal toimus FWD-ga mõõtmine (i=4,...10, aprill - oktoober)÷

C, e, t, h, k - empiirilised (leitavad) konstandid.

Eelnevalt mainitud konstandid C, e, t, h, k ja teguri  $M_i$  saab määrata Microsoft Excel'is funktsiooniga Linest, kasutades vähimruutude meetodit. Väärtuste arvutamiseks tuleb kasutada alljärgnevat seose (2.6) logaritmilist kuju:

$$\log E_{eqKAP} = \log C + e \log E_{eq} + t \log T + h \log H + k \log K + m_i \log x_i \quad (2.7)$$

kus  $x_i = 10$  – vastava kuu i väärtus (i=4, ..., 10) millal teostati FWD mõõtmist (log10=1);

$x_i = 1$  – kõikide teiste kuude kasutamine analüüsis (log1=0);

$E_{EeqKAP}$  – katendi üldine E-moodul arvutatud KAP-i meetodika alusel, MPa (teada olevad y väärtused suhtes  $y=ax+b$ );

$E_{eq}$  - katendi üldine elastsusmoodul koormusplaadi all, MPa (seos (2.1));  
 $T$  - bituumensideainet sisaldava katte keskmine temperatuur FWD seadmega mõõtmise hetkel, °C;  
 $H$  - seotud kihtide (asfaltkate + stabiliseerimine) paksus, cm;  
 $K$  - katte (asfaltkatte) paksus, cm;  
 $\log C, e, t, h, k, m_i$  - empiirilised konstandid, mis on määratud Linest funktsiooniga.

Linest funktsiooni kasutamiseks MS Excel'is, et leida seos FWD mõõtmistulemuste alusel arvatud katendi üldise elastsusmooduli ja KAP-iga arvatud katendi üldise elastsusmooduli vahel, valmistati ette lähteandmed:

- $E_{EeqKAP}$  - katendi üldine E-moodul (MPa), mis on arvatud KAP-iga lähtudes kontrollpunktide geoloogias (Lisa 1);
- $E_{eq}$  - katendi üldine elastsusmoodul koormusplaadi all (MPa), arvatud seosega (2.1) kasutades FWD mõõtmistulemustest saadud kontaktsurvet koormusplaadi all (kPa), koormusplaadi diameetrit (mm), Poisson'i tegurit ja vajumit koormusplaadi keskel ( $\mu\text{m}$ );
- $T$  - bituumensideainet sisaldava katte temperatuur FWD seadmega mõõtmise hetkel, °C;
- $H$  - seotud kihtide (asfaltkate + stabiliseerimine) paksus (cm) geoloogilistelt profiilidelt Lisas 1;
- $K$  - katte (asfaltkatte) paksus (cm) geoloogilistelt profiilidelt Lisas 1;.

Konstandid  $C, e, t, h, k$  ja teguri  $M_i$  määramiseks vähimruutude meetodil Microsoft Excel'is funktsiooniga Linest tuleb olemasolevad lähteandmed teisendada logaritmilisele kujule (vt seos (2.6)).  $\log x_i = 1$  - vastava kuu  $x_i$  väärtus ( $i=4, \dots, 10$ ) millal teostati FWD mõõtmist,  $\log x_i = 0$  - kõikide teiste kuude kasutamine analüüsis. (Tabel 2.2)

**Tabel 2.2.** Linest funktsiooni logaritmiliste sisendandmete näide

log $E_{eqKAP}$	log $x_i$								log $E_{eq}$	log $T$	log $K$	log $H$
	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$					
2,2253093	1	0	0	0	0	0	0	2,3733685	1	0,7781513	0,7781513	
2,2253093	1	0	0	0	0	0	0	2,3928227	1,0791812	0,7781513	0,7781513	
2,2253093	0	1	0	0	0	0	0	2,3275935	1,0791812	0,7781513	0,7781513	
2,2253093	0	0	1	0	0	0	0	2,3153095	1,4149733	0,7781513	0,7781513	

Teguri  $M_i$  ning konstandi  $C$  võrrandis (2.6) saab arvutada konstantide  $m_i$  ja  $\log C$  väärtuste abil, mis on määratud funktsiooniga Linest (tabel 2.3):

$$M_i = 10^{m_i} \quad (2.8)$$

$$C = 10^{\log C} \quad (2.9)$$

Tabelist 2.3 on ka näha empiiriliste konstantide  $e$ ,  $t$ ,  $h$  ja  $k$  väärtused Linest funktsiooni väljundis (kollasel taustal).

**Tabel 2.3.** Linest funktsiooni väljundi näide (jämedama joonega eraldatud tabeli osas) selgitustega ja tegurite ning konstandi arvutusega

		Empiirilised konstandid				FWD mõõtmiste teostamise kuu tegurid							Konstant
		k	h	t	e	$m_{10}$	$m_9$	$m_8$	$m_7$	$m_6$	$m_5$	$m_4$	$\log C$
Linest väljundväärtused		0,2950	0,2930	0,0505	0,3116	-0,0007	-0,0032	-0,0055	0,0057	0,0000	0,0085	-0,0062	0,9094
		0,0042	0,0063	0,0078	0,0075	0,0058	0,0052	0,0050	0,0051	0,0000	0,0047	0,0053	0,0210
	$R^2$	0,8189	0,0764	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		2235,26	4942,00	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		130,57	28,86	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Arvutatud väärtused		Mi arvutatud seosega (2.8) C arvutatud seosega (2.9)				0,9985	0,9926	0,9874	1,0131	1,0000	1,0197	0,9859	8,1180
						$M_{10}$	$M_9$	$M_8$	$M_7$	$M_6$	$M_5$	$M_4$	C

## 2.3 Teekatendi üldise elastsusmooduli arvutamine

Teekatendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks FWD mõõtmistulemuste alusel (mis oleks ühilduv KAP-iga arvutatud katendi üldise elastsusmooduli väärtusega) kasutades seost (2.6), peame leidma Linest funktsiooni abil kõigi kontrollpunktides teostatud FWD mõõtmistulemuste alusel puudu olevad empiirilised konstandid ja tegurid, mida on kirjeldatud eelmises punktis 2.2.

Tabelis 2.4 on esitatud A. Aaviku doktoritöös 1278 FWD mõõtmistulemuse alusel leitud vastavad tegurid ja konstandid, mis on hetkel katendi üldise elastsusmooduli arvutamisel kasutuses. Samuti on tabelis 2.4 esitatud 4953 FWD mõõtmistulemuse alusel leitud uued empiirilised konstandid ja tegurid.

Lisaks on ühe katendi üldise elastsusmooduli väärtuse mõjutajana võetud arvesse ka katendi seotud kihtide (asfaltbetoon/mustkate ja stabiliseerimine) kogupaksus.

**Tabel 2.4.** Konstantide e, t, h, k ja C ja teguri  $M_i$  väärtused kasutamiseks seoses (2.6) katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks, mis on võrreldav KAP-i meetodikaga

		Konstantide ja tegurite määramiseks kasutatud algandmete lühendid				
		<b>ETM<sub>2003</sub></b>	<b>ETM</b>	<b>ETMH</b>	<b>ETMK</b>	<b>ETMHK</b>
Empiirilised konstandid	<b>e</b>	0,793	0,7007	0,5327	0,4044	0,3116
	<b>t</b>	0,098	0,0736	0,0285	0,0866	0,0505
	<b>h</b>	0,000	0,0000	0,3833	0,0000	0,2930
	<b>k</b>	0,000	0,0000	0,0000	0,3354	0,2950
	<b>C</b>	2,039	2,8169	3,1345	8,5502	8,1180
<b>M<sub>i</sub></b> Tegur, mis arvestab konkreetset kuud, millal FWDga mõõtmise teostati	<b>M<sub>4</sub></b> - Aprill	1,000	1,0850	1,0702	0,9847	0,9859
	<b>M<sub>5</sub></b> - Mai	0,911	1,0470	1,0286	1,0318	1,0197
	<b>M<sub>6</sub></b> - Juuni	0,830	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
	<b>M<sub>7</sub></b> - Juuli	0,816	1,0208	1,0272	1,0066	1,0131
	<b>M<sub>8</sub></b> - August	0,831	0,9791	0,9758	0,9915	0,9874
	<b>M<sub>9</sub></b> - September	0,825	0,9706	0,9700	0,9962	0,9926
	<b>M<sub>10</sub></b> - Oktoober	0,817	0,9489	0,9424	1,0115	0,9984
<b>Determinatsioonikordaja R<sup>2</sup></b>		<b>0,574</b>	<b>0,498</b>	<b>0,640</b>	<b>0,739</b>	<b>0,819</b>

Tabelis 2.4 kasutatud algandmete (konstandid ja tegurid) lühendite selgitus on esitatud tabelis 2.5.

**Tabel 2.5.** Tabeli 2.4 lühendite selgitus

Lühendid	Algandmete lühendite selgitus
<b>ETM</b>	<b>E</b> - katendi üldine elastsusmoodul koormusplaadi all, MPa (arvutatud valemiga (2.1))
	<b>T</b> - bituumensideainega töödeldud kihi keskmine temperatuur FWD-ga mõõtmise ajal, °C
	<b>M</b> - kuu, millal FWD-ga mõõtmise teostati (4, ..., 10, aprill-oktoober).
<b>ETM<sub>2003</sub></b>	<b>E, T, M</b> - sama, mis eelnevalt, <b>ETM<sub>2003</sub></b> - A.Aaviku poolt 2003. aastal leitud konstandid ja tegurid
<b>ETMH</b>	<b>E, T, M</b> - sama, mis eelnevalt
	<b>H</b> - seotud kihtide (asfalt + stabiliseerimine) paksus FWD mõõtmiskohas, cm
<b>ETMK</b>	<b>E, T, M</b> - sama, mis eelnevalt
	<b>K</b> - katte (asfaltkatte) paksus FWD mõõtmiskohas, cm
<b>ETMHK</b>	<b>E, T, M, H, K</b> - sama, mis eelnevalt

Katendi üldist elastsusmoodulit mõjutavate tegurite arvukus mõjutab determinatsioonikordaja  $R^2$  väärtust. Selgus, et mida rohkem tegureid üldise elastsusmooduli arvutamisel arvesse võetakse, seda suurem on  $R^2$  väärtus. Antud

väärtus iseloomustab korrelatsiooni FWD mõõtmistulemuste alusel seosega (2.6) ja KAP meetodiga arvatud katendi üldise elastsusmooduli väärtuse vahel.

Võttes katendi üldise elastsusmooduli arvutamisel FWD mõõtmistulemuste alusel arvesse asfaltkatte keskmise temperatuuri (T) ja mõõtmiste teostamise kuu (M) on ETM determinatsioonikordaja  $R^2$  väärtuseks 0,498 ning lisades katte (asfaltkatte) paksuse (K) FWD mõõtmispaigas, saame ETMK puhul  $R^2$  väärtuseks 0,739. Seevastu lisades asfaltkatte paksuse (K) asemele seotud kihtide (asfalt + stabiliseerimine) paksuse (H) FWD mõõtmispaigas, tuleb ETMH puhul  $R^2$  väärtuseks 0,640. Saame determinatsioonikordaja  $R^2$  väärtuse põhjal järeldada, et kõige suurema mõju korrelatsiooni paranemisele annab katte (asfaltkatte) paksus (K) FWD mõõtmiskohas. Erinevaid empiirilisi konstante kasutades kõigub  $R^2$  väärtus vahemikus 0,574 kuni 0,819. Kõige parema tulemuse annab meetod ETMHK, mis kasutab viite empiirilist konstanti, mis arvestavad FWD mõõtmistulemusi (E), asfaltkatte keskmist temperatuuri (T), mõõtmiste teostamise aega (M), seotud kihtide paksust (H) ja asfaltkatte paksust (K) ning mille determinatsioonikordaja  $R^2$  väärtus on 0,819.

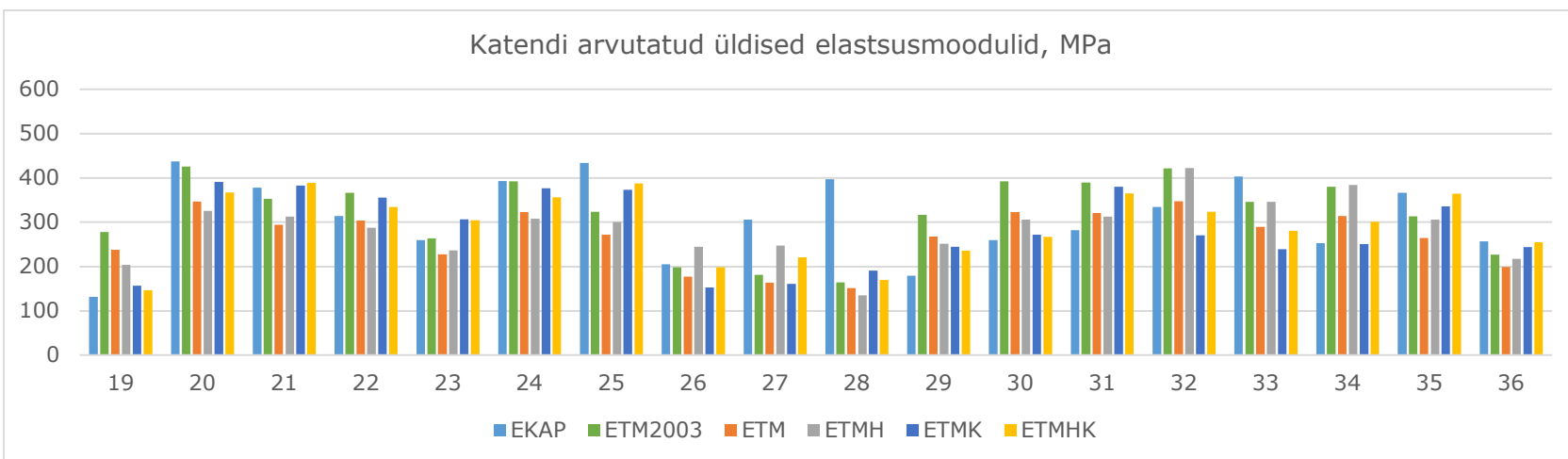
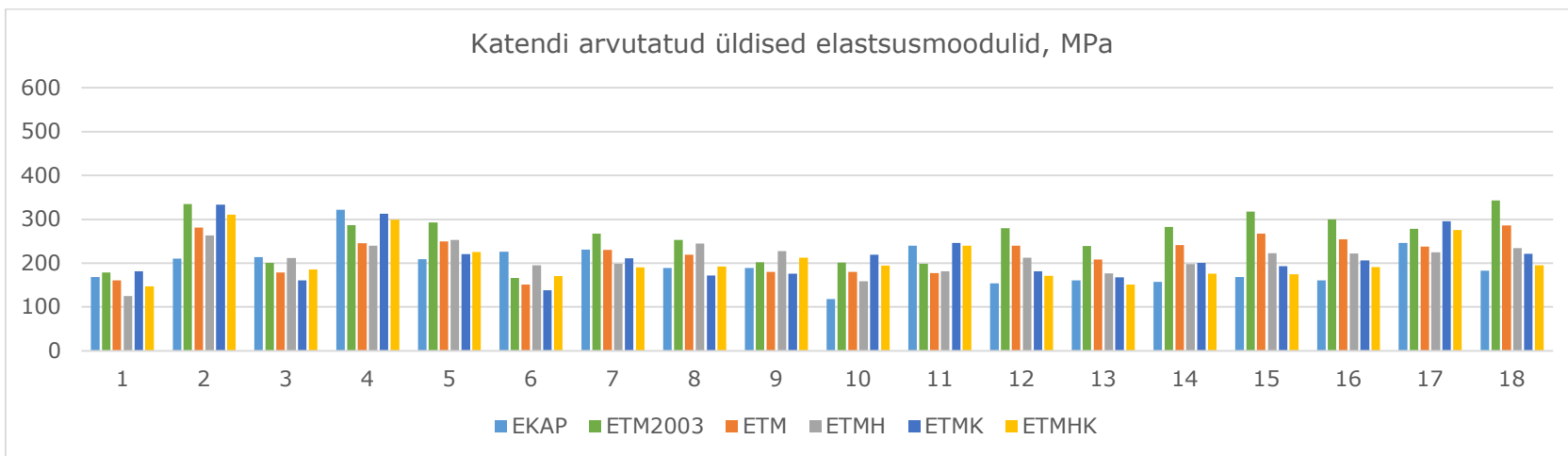
Kõigil eeltoodud juhtudel on determinatsioonikordaja  $R^2$  väärtus suurem, kui seda on A. Aaviku doktoritöös [2] 2003. aastal leitud  $ETM_{2003}$  (FWD mõõtmistulemused E, asfaltkatte keskmine temperatuur T, mõõtmiste teostamise kuu M) alusel arvatud katendi üldise elastsusmooduli väärtuse korrelatsioon KAP-iga arvatud mooduli väärtusega, välja arvatud korrelatsioon samade vastavate andmete alusel käesolevas töös arvatud moodulite väärtuste vahel – determinatsioonikordaja  $R^2$  väärtused vastavalt  $ETM_{2003}=0,574$  ja  $ETM=0,498$ . Selline tulemus oli ka oodatav, sest käesolevas töös andmetöötamise aluseks olnud andmebaas oli võrreldes 2003. aastaga märkimisväärselt suurem nii FWD mõõtmiste arvu kui ka mõõtmispunktide arvu osas (vt. p. 2.1).

Tabelis 2.4 toodud FWD mõõtmiste teostamise kuu teguri  $M_i$  väärtuste alusel on arvatud  $M_i$  väärtused igale päevale perioodiks 15. aprill – 31. oktoober (vt Lisa 2), et vältida selle alusel arvatava katendi üldise elastsusmooduli väärtuse järsku muutust mõõtmiskuu vahetusel.

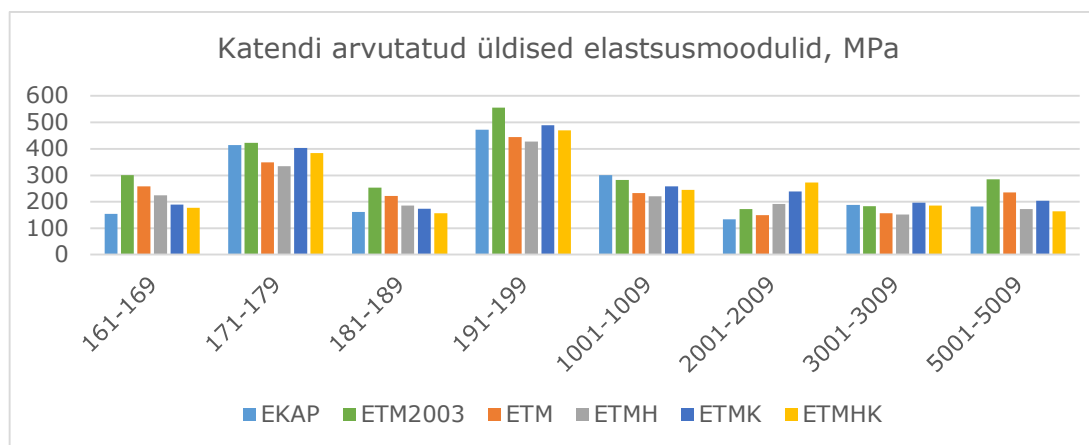
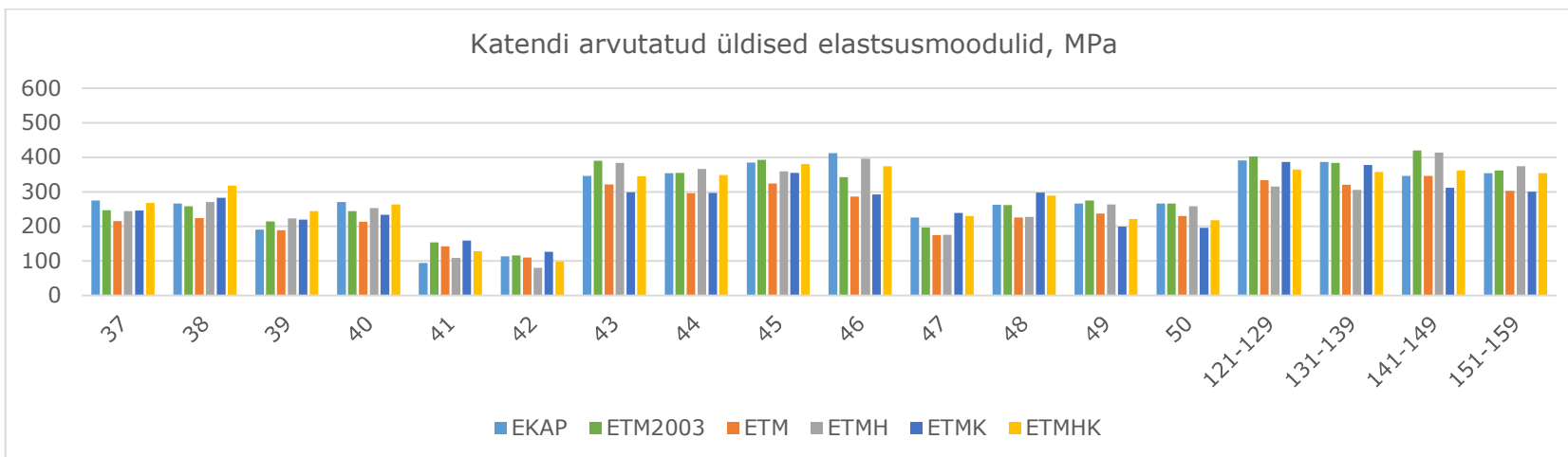
Kasutades tabelis 2.4 esitatud tegureid ja konstante, on arvatud seosega (2.6) FWD mõõtmistulemused. Arvestades kõigi mõõtmiste alusel katendi üldised elastsusmoodulid, millest omakorda on leitud iga kontrollpunkti keskmine üldine elastsusmoodul ning võrreldud seda KAP-iga arvatud katendi üldise elastsusmooduli väärtusega samas kontrollpunktis (joonis 2.1, Lisa 3).

Joonis 2. kujutab võrdlevalt FWD 4953 mõõtmistulemuse alusel arvatud katendi keskmiste üldiste elastsusmoodulite väärtuseid. Igale mõõtmiste kontrollpunktile on FWD mõõtmistulemuste alusel seosega (2.6) arvatud keskmised katendi üldise elastsusmooduli väärtused (arvestades erinevaid tulemust mõjutavaid tegureid E, T, M, H, K), eesmärgiga võrrelda neid tulemusi katendiarvutuse programmiga KAP mõõtmispunktide geoloogia alusel arvatutega. Sellest lähtuvalt saab ka visuaalselt hinnata parimat arvutamisel arvesse võetavate tulemust mõjutavate tegurite kombinatsiooni täpseima tulemuse leidmiseks, mis oleks võrreldav KAP-iga leitud katendi üldise elastsusmooduli väärtusega.

Analüüsisides joonist 2.1 on märgata, et ETMK ja ETMHK tagavad oluliselt täpsema tulemuse võrreldes ETM<sub>2003</sub>, ETM ning ETMH. Ainult üksikutel juhtudel saab öelda, et ETM ning ETMH tagavad täpsema tulemuse. Võttes arvesse kõik kontrollpunktid, on selgelt näha, et ETMHK tagab erinevates situatsioonides ligikaudse tulemuse katendiarvutamise programmiga KAP leituga.



**Joonis 2.1** Katendi (seosega 2.6) arvutatud keskmised üldised elastsusmoodulid kontrollpunktides (jätkub järgmisel lehel)



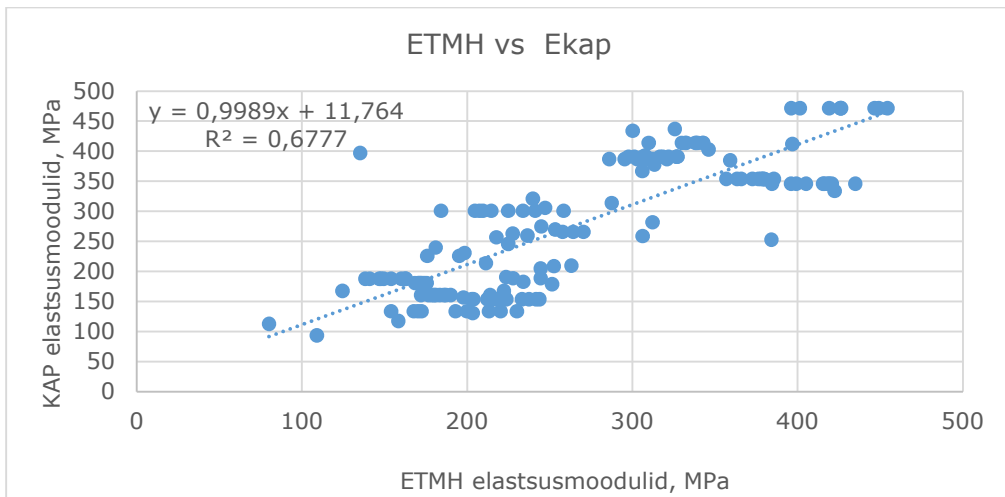
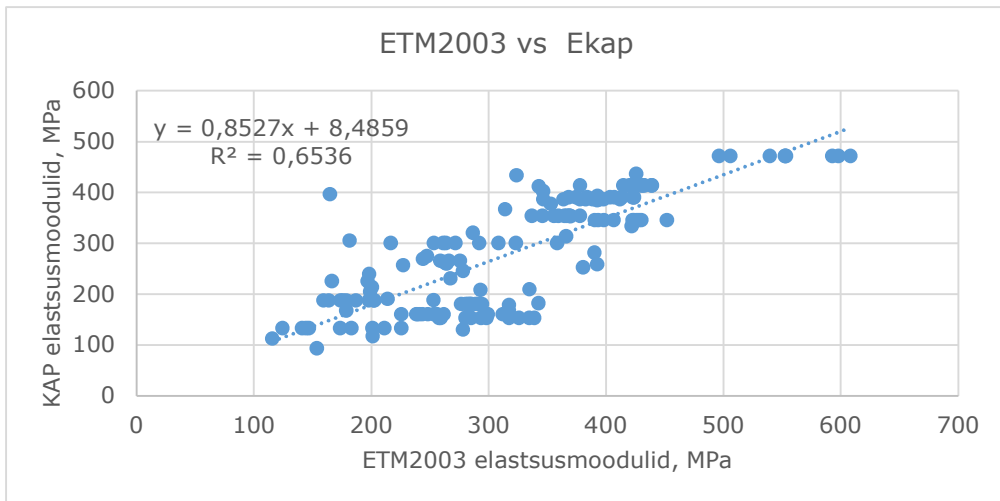
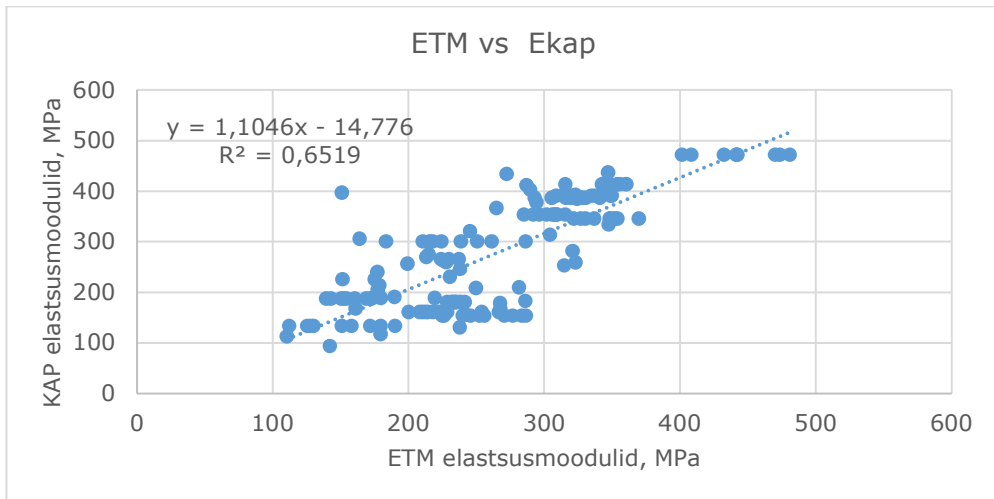
**Joonis 2.1** Katendi (seosega 2.6) arvatud keskmised üldised elastsusmoodulid kontrollpunktides (eelmise lehe järg)



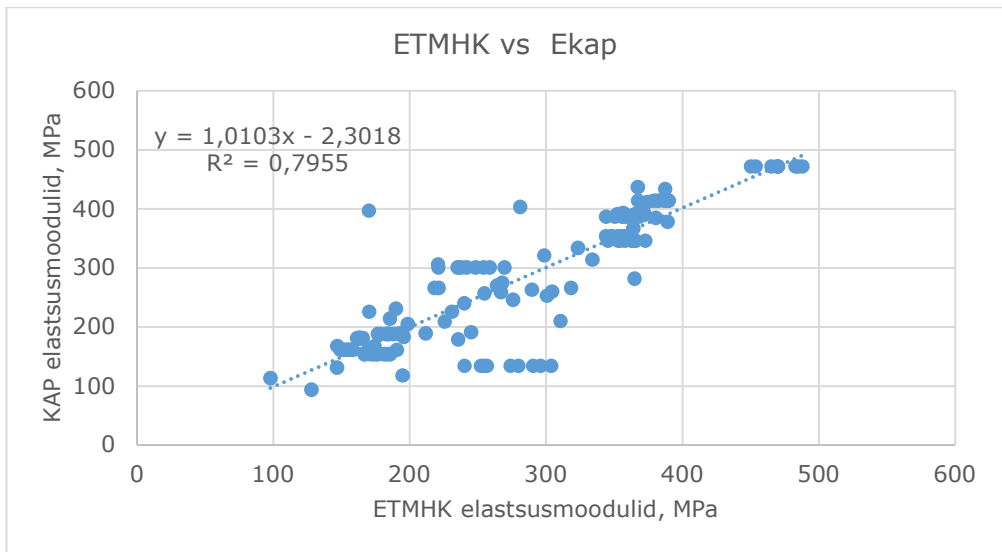
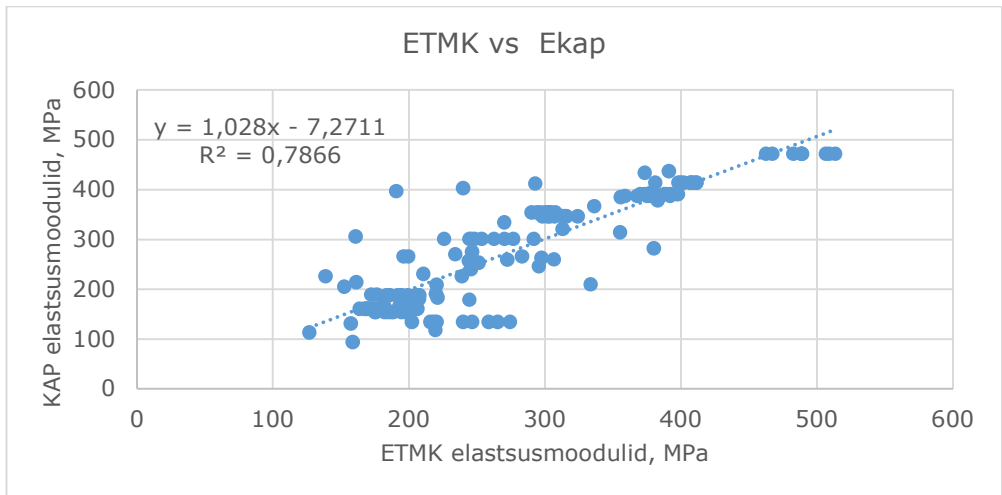
Selleks, et täpsemalt (lisaks eeltoodud joonise 2.1 graafikute visuaalsele hinnangule) hinnata FWD mõõtmistulemuste alusel seosega 2.6 arvutatud katendi üldise elastsusmooduli väärtuste kokkulangevust KAP-iga arvutatud mooduli väärtustega koostati graafikud, mis iseloomustavad erinevate empiiriliste konstantidega arvutatud elastsusmoodulite seost KAP-iga arvutatud moodulitega (joonis 2.2).

Nagu jooniselt 2.2 on näha, annavad 2003. aastal tuletatud seose alusel arvutatud elastsusmoodulite väärtused ( $ETM_{2003}$ ) praktiliselt sama korrelatsiooni KAP väärtustega, kui käesolevas analüüsis leitud ETM seos (determinatsioonikordajad  $R^2$  vastavalt 0,654 ja 0,652). Seega võime teedevõrgu tasandil jätkata siiani kasutusel oleva FWD mõõtmisandmete alusel katendi üldise elastsusmooduli arvutamise empiiriliste konstantidega ( $ETM_{2003}$  tabelis 2.4), et tagada Riiklikus Teeregistris olemas olevate elastsusmoodulite väärtuste võrreldavus uute mõõtmistulemustega.

Seoste  $ETMH$  vs  $E_{KAP}$ ,  $ETMK$  vs  $E_{KAP}$  ja  $ETMHK$  vs  $E_{KAP}$  determinatsioonikordajate väärtused on joonisel 2.2 vastavalt 0,678, 0,787 ja 0,796, mis on head tulemused. Samas kõige parema determinatsioonikordaja väärtuse annab seos  $ETMHK$  vs  $E_{KAP}$  ehk seos empiiriliste konstantidega, mis arvestavad katendi seotud kihtide ja asfaltkihtide paksust (tabelis 2.4 empiirilised konstandid  $ETMHK$  veerus). Natuke väiksem on determinatsioonikordaja väärtus  $ETMK$  vs  $E_{KAP}$  puhul ehk juhul, kui arvestame ainult asfaltkatte paksust (tabelis 2.4 empiirilised konstandid  $ETMK$  veerus), kuid vahe seose  $ETMHK$  vs  $E_{KAP}$  determinatsioonikordajaga (0,009) ei ole nimetamisväärne seose usaldatavuse seisukohalt. Seega projekti tasandil soovitame katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks FWD mõõtmistulemuste alusel seosega 2.6 kasutada tabelis 2.4 esitatud empiirilisi konstante kas  $ETMK$  või  $ETMHK$  veerust sõltuvalt sellest, millised andmed meil olemasoleva katendi kohta kättesaadavad on (kas ainult asfaltkatte paksus  $K$  või siis ka kogu seotud kihtide paksus  $H$  FWD mõõtmiste teostamise kohas).



**Joonis 2.2** Erinevate empiiriliste konstantide arvatud elastusmoodulite seos KAP-iga arvatud moodulitega (jätkub järgmisel lehel)



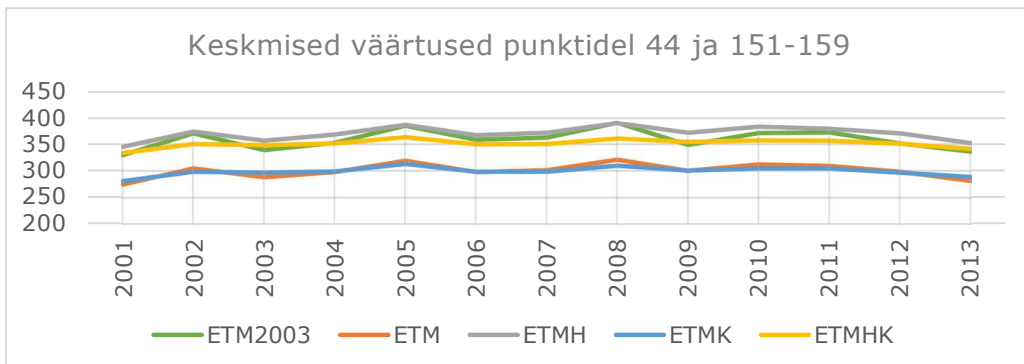
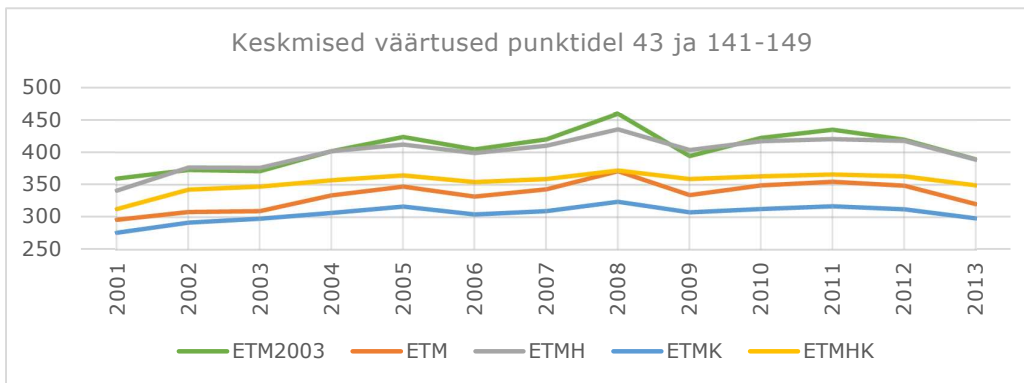
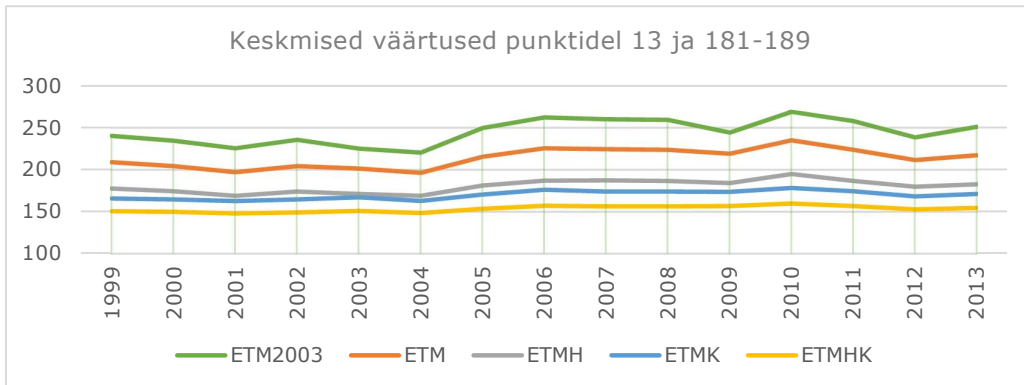
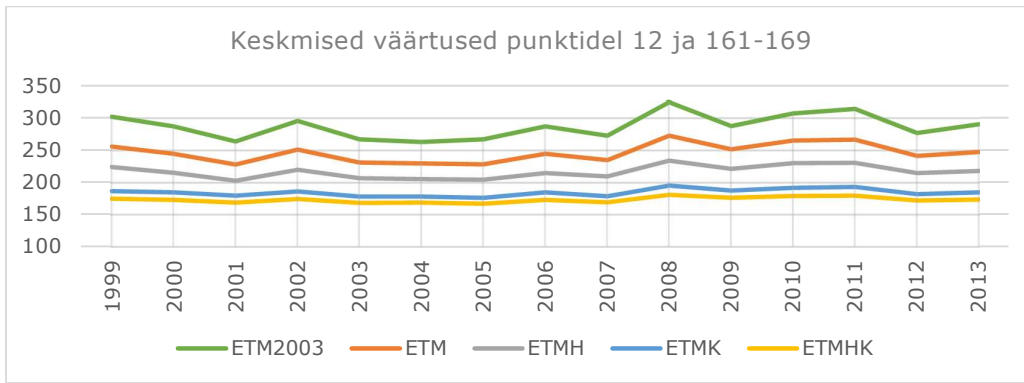
**Joonis 2.2** Erinevate empiiriliste konstantide arvatud elastusmoodulite seos KAP-iga arvatud moodulitega (elmise lehe järg)

## 2.4 Kandevoime muutus kontrollpunktis aastate võrdluses

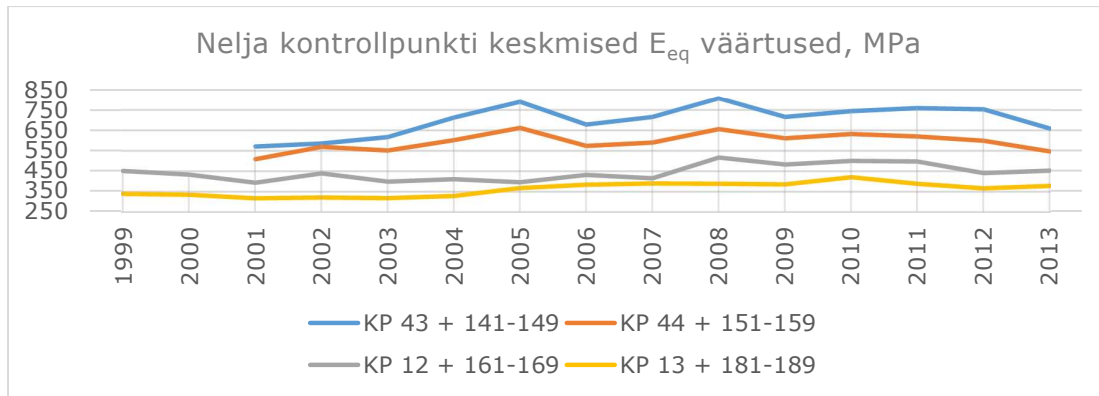
Käesolevas punktis võtame vaatluse alla neli kontrollpunkti, kus kahes on toimunud FWD mõõtmised aastatel 1999-2013 ja kahes aastatel 2001-2013, et näha katendi kandevoime muutust aastate lõikes. Teoreetiliselt peaks ajas katendi üldine elastsusmoodul vähenema, kuna katendi sidumata kihtides (eriti fraktsioneeritud killustikust aluse kihis) mineraalosakeste vaheline mehhaaniline nake liikluskoormuse mõjul väheneb (ja koos sellega ka elastsusmoodul). Teades võimalikku katendi üldise elastsusmooduli vähenemise seost ajas, oleks võimalik korrigeerida ka varasemalt mõõdetud ja arvutatud elastsusmooduli väärtusi erinevates andmebaasides (eelkõige Teeregistris) ja võtta seda arvesse remondiobjektide valikul.

Valitud nelja kontrollpunkti FWD mõõtmistulemuste alusel arvutati seosega 2.6 iga mõõtmiste teostamise aasta keskmine katendi üldine elastsusmoodul arvestades erineva lähteandmete hulgaga (tabel 2.4) ja võrreldi saadud tulemusi (joonis 2.3). Vaadeldes joonisel 2.3 kõiki nelja kontrollpunkti, on selgelt näha, et aastate lõikes katendi üldise elastsusmooduli keskmised väärtused nimetamisväärselt ei muutu. Antud tulemust kirjeldavad kõige paremini ETMH, ETMK ning ETMHK väärtused.  $ETM_{2003}$  ning ETM on joonistel küll hüplik, kuid aastate jooksul jääb elastsusmooduli suurusjärk sarnasesse vahemiku. Seega nende nelja analüüsiks valitud kontrollpunkti FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud katendi iga-aastaste keskmiste üldiste elastsusmoodulite väärtuste põhjal me ei saa järeldada, et eksisteeriks mingit seost üldise elastsusmooduli ajas vähenemise hindamiseks.

Eeldades, et ülaltoodud lähenemisega me ei leidnud seost üldise elastsusmooduli ajas vähemise kohta, kuna meie poolt kõigi FWD mõõtmistulemuste alusel leitud seos 2.6 katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks „tasandab“ võimaliku elastsusmooduli vähenemise ajas, teostame eeltooduga sarnase analüüsi kasutades selleks Boussinesq'i võrrandiga (seos 2.1) ainult FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud katendi iga-aastaseid keskmisi elastsusmooduli  $E_{eq}$  väärtuseid, mida ei ole erinevate empiiriliste konstantidega töödeldud. Selgus, et sarnaselt varasemale, ei ilmne ka siin elastsusmooduli muutusi aastate lõikes (joonis 2.4) ning vastavat seost me esitada ei saa.



Joonis 2.3 Kontrollpunktide keskmised elastsusmodulite väärtused aastate lõikes



**Joonis 2.4** Nelja kontrollpunkti keskmised aastased  $E_{eq}$  väärtused, MPa

Joonistel 2.3 ja 2.4 esitatud aastate 1999-2013 keskmiste elastsusmoodulite väärtuste võrdlus on esitatud ka tabelis 2.6.

**Tabel 2.6** Katendi aastate 1999-2013 keskmiste üldiste elastsusmoodulite väärtused (MPa) neljas FWD mõõtmiste kontrollpunktis (jätkub järgmisel lehel)

Aasta	Keskmised väärtused punktidel 12 ja 161-169							Keskmised väärtused punktidel 13 ja 181-189						
	$E_{KAP}$	$ETM_{2003}$	ETM	ETMH	ETMK	ETMHK	$E_{eq}$	$E_{KAP}$	$ETM_{2003}$	ETM	ETMH	ETMK	ETMHK	$E_{eq}$
1999	154	302	256	224	186	175	452	161	240	209	177	166	151	339
2000	154	287	245	215	185	173	433	161	235	204	174	165	150	335
2001	154	264	228	203	180	169	394	161	225	197	169	163	148	318
2002	154	296	251	220	186	174	439	161	236	204	174	165	149	321
2003	154	267	231	207	178	169	398	161	225	201	171	167	151	318
2004	154	263	230	206	178	169	412	161	220	196	169	163	148	329
2005	154	267	228	205	176	167	396	161	250	215	181	170	154	367
2006	154	287	245	215	185	173	431	161	262	225	187	176	157	384
2007	154	273	235	209	179	169	415	161	260	224	187	174	156	389
2008	154	325	273	234	195	181	517	161	259	224	186	174	156	389
2009	154	288	252	221	188	176	482	161	244	219	184	174	157	386
2010	154	308	265	230	192	179	500	161	269	235	195	178	160	421
2011	154	315	267	231	193	180	498	161	258	224	187	174	157	388
2012	154	277	242	215	182	172	440	161	238	211	180	168	153	366
2013	154	291	248	218	185	174	453	161	251	217	183	171	154	378

**Tabel 2.6** Katendi aastate 1999-2013 keskmiste üldiste elastsusmoodulite väärtused (MPa) neljas FWD mõõtmiste kontrollpunktis (eelmise lehe järg)

Aasta	Keskmised väärtused punktidel 43 ja 141-149							Keskmised väärtused punktidel 44 ja 151-159						
	E <sub>KAP</sub>	ETM <sub>2003</sub>	ETM	ETMH	ETMK	ETMHK	E <sub>eq</sub>	E <sub>KAP</sub>	ETM <sub>2003</sub>	ETM	ETMH	ETMK	ETMHK	E <sub>eq</sub>
2001	346	360	296	341	276	313	571	354	330	274	345	281	334	509
2002	346	373	308	377	292	342	586	354	371	305	374	299	350	569
2003	346	371	310	376	298	347	617	354	339	288	357	297	349	552
2004	346	402	334	402	307	357	713	354	353	298	369	299	352	602
2005	346	424	347	412	316	365	790	354	385	319	387	313	364	662
2006	346	405	332	399	304	354	678	354	359	298	367	298	350	574
2007	346	420	343	410	309	359	715	354	363	301	372	298	351	591
2008	346	460	371	435	324	372	807	354	391	321	390	310	361	656
2009	346	394	334	403	308	359	716	354	349	300	372	301	355	611
2010	346	422	349	417	313	363	743	354	372	312	383	305	357	631
2011	346	435	355	421	317	366	759	354	373	309	379	305	357	619
2012	346	419	349	418	312	363	752	354	352	298	371	297	351	599
2013	346	389	320	389	299	349	659	354	337	282	353	289	342	547

## 2.5 Kuu teguri $M_i$ väärtuse mõju arvutatud elastsusmooduli väärtusele

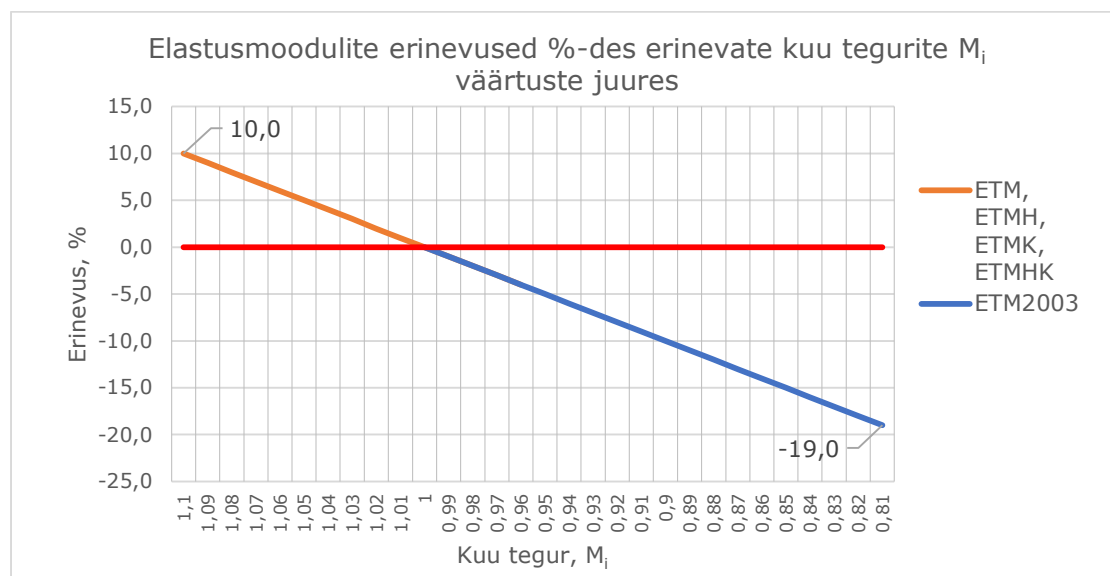
Käesolevas punktis võeti vaatluse kolmes kontrollpunktis mõõdetud FWD tulemused ning võrreldakse seosega 2.6 arvutatavate elastsusmoodulite sõltuvust kuu teguri  $M_i$  väärtuse muutmisest (kõik muud arvutuses kasutatavad muutujad peale kuu teguri on konstandid). Kolm kontrollpunkti valiti analüüsiks eesmärgiga hinnata kuu teguri  $M_i$  muutumise mõju erinevate elastsusmooduli väärtustega (väike, keskmine ja suur moodul) katendikonstruktsioonidele (tabel 2.7).

**Tabel 2.7** Kuu teguri  $M_i$  väärtuse mõju arvutamisel kasutatud FWD kontrollpunktide lähteandmed

KP number	Seosega (2.1) arvutatud elastsusmoodul $E_{eq}$ , MPa	Asfaltkatte keskmine temperatuur $T$ , °C	Asfaltkatte paksus $K$ , cm	Seotud kihtide paksus, $H$ , cm	FWD mõõtmiste teostamise kuu, M
1	229	29	6	6	6
2	506	29	14	14	6
42	119	11	4	4	6

Joonis 2.6 esitatud kuu teguri mõju seosega 2.6 arvutatavatele elastsusmoodulite väärtuste erinevustele protsentides võrreldes olukorraga, kui kuu tegur  $M_i=1$ , on esitatud vastavalt lisa 4 tabelist. Kuu tegur  $M_i$  oli määratud ETM, ETMH, ETMK ja ETMHK

puhul vahemikku 1,1 kuni 0,96 ning  $ETM_{2003}$  puhul 1 kuni 0,81. Eeltoodud kuu tegurite vahemikkude valik baseerub tabelis 2.4 arvatud kuu teguri minimaalsetele ja maksimaalsetele väärtustele. Jooniselt 2.5 selgub, et kõigil juhtudel (ETM, ETMH, ETMK, ETMHK,  $ETM_{2003}$ ) põhjustab kuu teguri 0,01 suurune muutus arvatud elastsusmoodulite 1 % väärtuse erinevuse (vt. täpsemalt lisa 4).

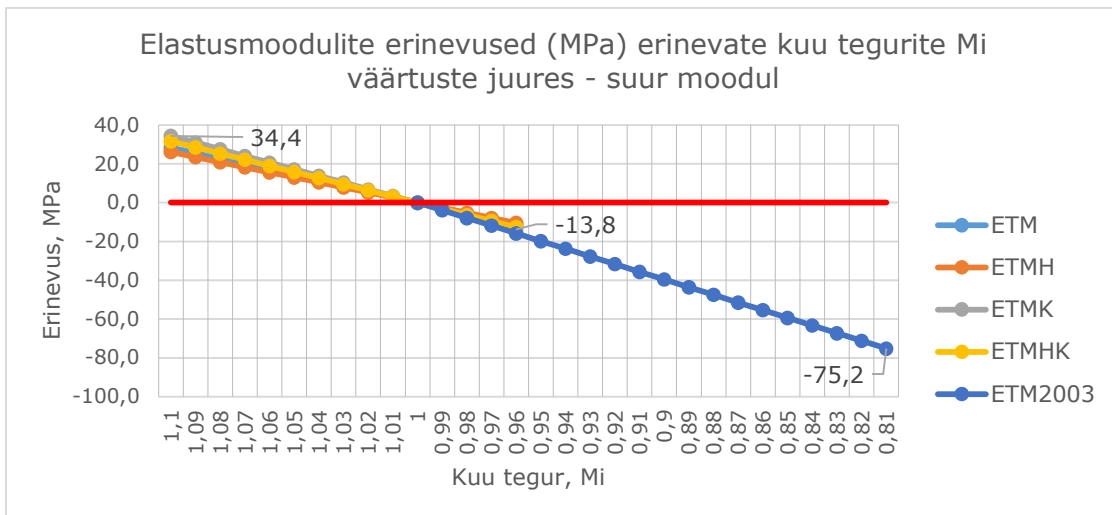
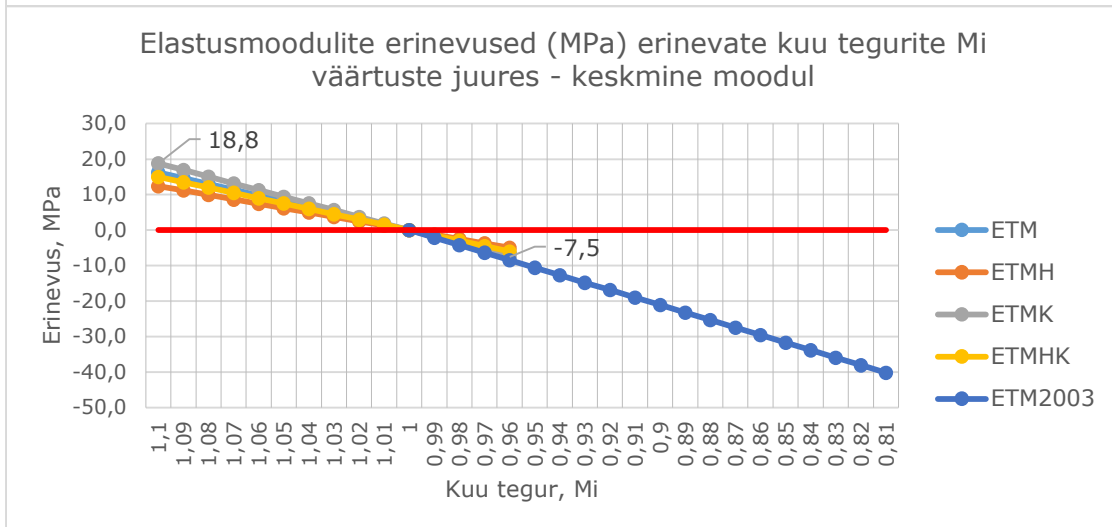
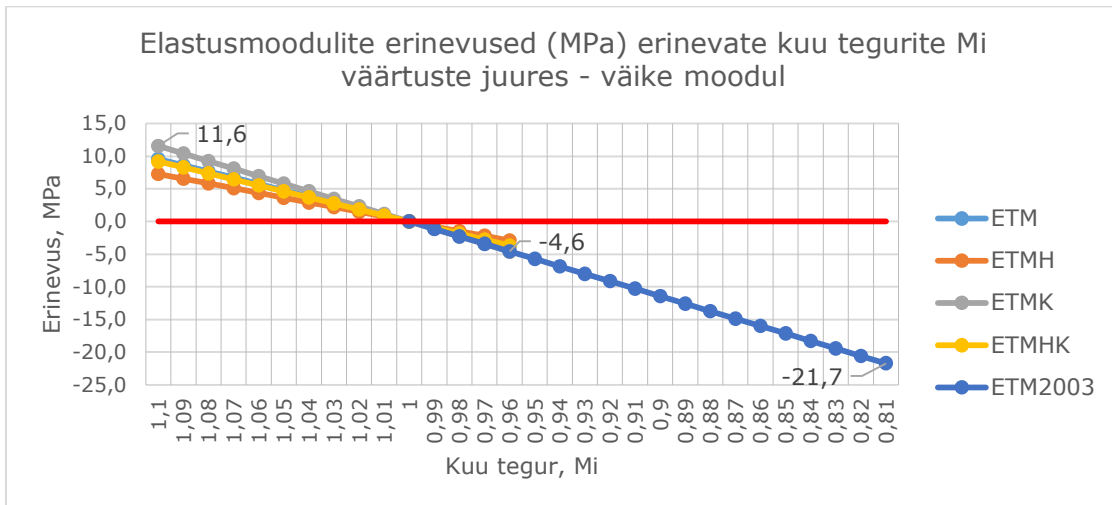


Joonis 2.5 Kuu teguri muutuse mõju elastsusmooduli väärtuse erinevusele protsentuaalselt (Lisa 4)

Joonisel 2.6 on esitatud kuu teguri muutuse mõju elastsusmooduli väärtuse erinevusele MPa-lites, mis oli aluseks kuu teguri muutuse mõju arvutamisele protsentuaalselt (joonis 2.5, lisa 4).

Jooniste 2.5 ja 2.6 põhjal saab öelda, et kuu teguri muutuse mõju seosega 2.6 arvutatava elastsusmooduli väärtusele on lineaarne. Lisaks selgus, et kuu teguri  $M_i$  väärtuse mõju on arvutatavale elastsusmooduli väärtusele suure osakaaluga (+10 kuni -19 %), mistõttu tuleks elastsusmoodulit arvutades alati arvesse võtta õige kuu tegur.





Joonis 2.6 Kuuteguri mõju elastsusmooduli väärtuse erinevusele, MPa (Lisa 4)

## 2.6 Asfaltkatte temperatuuri T väärtuse mõju arvutatud elastsusmooduli väärtusele

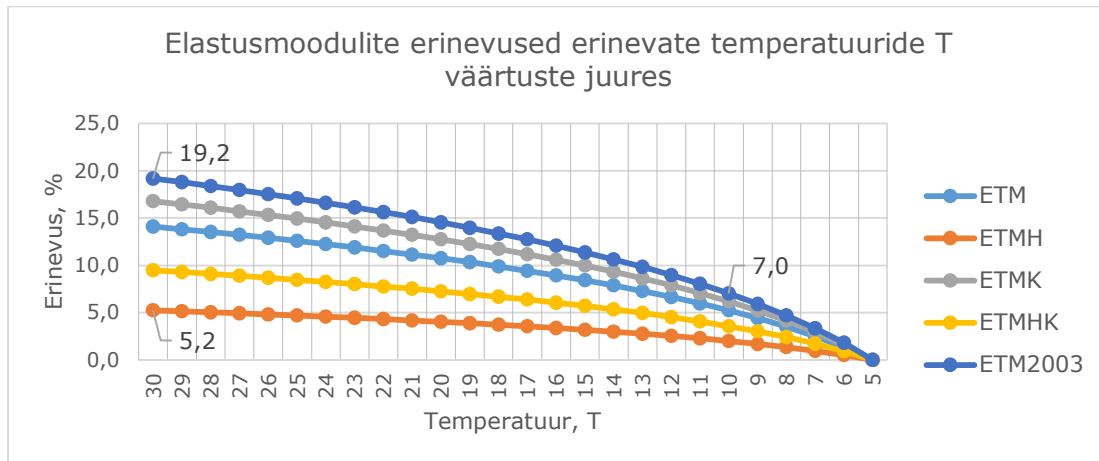
Sarnaselt punktidele 2.5 võeti ka siin vaatluse alla kolme kontrollpunkti (tabel 2.8) FWD mõõtmistulemused, kus võrreldakse seosega 2.6 arvutatavate elastsusmoodulite väärtuse sõltuvust asfaltkatte keskmise temperatuuri T väärtuse muutmisest (kõik muud arvutuses kasutatavad muutujad peale temperatuuri T väärtuse on konstandid).

Joonis 2.9 kajastab seosega 2.6 arvutatud katendi üldise elastsusmooduli väärtuste protsentuaalset sõltuvust asfaltkatte keskmise temperatuuri T väärtuse muutmisest vahemikus 5 kuni 30 °C võrrelduna katendi elastsusmooduli väärtusega temperatuuril +5 °C. Selline temperatuurivahemik on valitud, kuna enamus FWD mõõtmisi on teostatud eelnimetatud asfaltkatte keskmise temperatuuri vahemikus. Temperatuuri väärtuste mõju arvutatud elastsusmooduli väärtuste erinevustele on esitatud lisas 5.

Kõige rohkem on mõjutatud katendi üldise elastsusmooduli väärtus  $ETM_{2003}$  lähteandmete kasutamisel, kus temperatuuri T väärtuse muutmisel on seosega 2.6 arvutatud katendi üldiste elastsusmoodulite väärtuste erinevuseks maksimaalselt 19,2 protsenti. Arvutatud elastsusmooduli väärtuse sõltuvus väheneb järgemööda vastavalt joonisele 2.7. ETMH puhul on arvutatud elastsusmooduli sõltuvus temperatuurist T on kõige väiksem, ehk 5,2 protsenti.



Joonis 2.7 Temperatuuri T väärtuse mõju vähenevas järjekorras

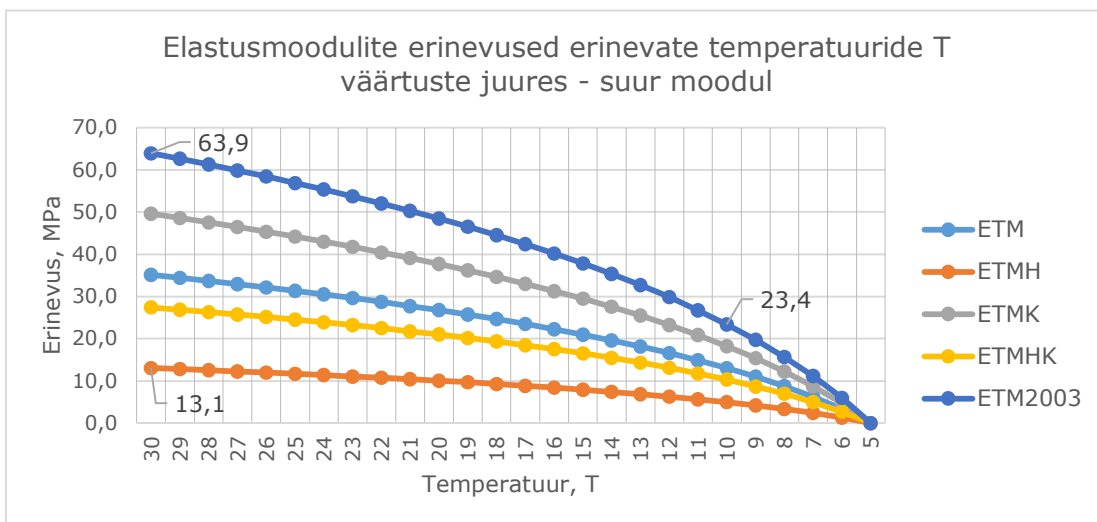
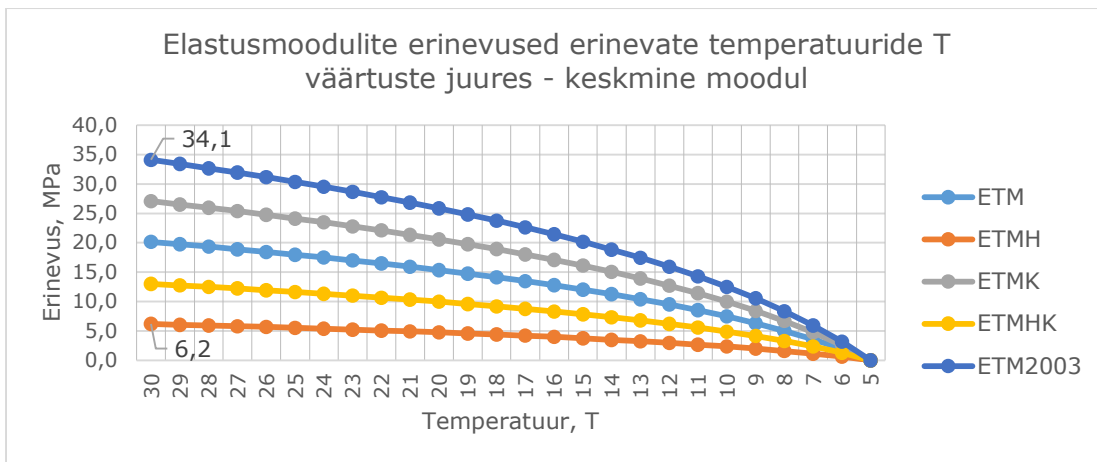
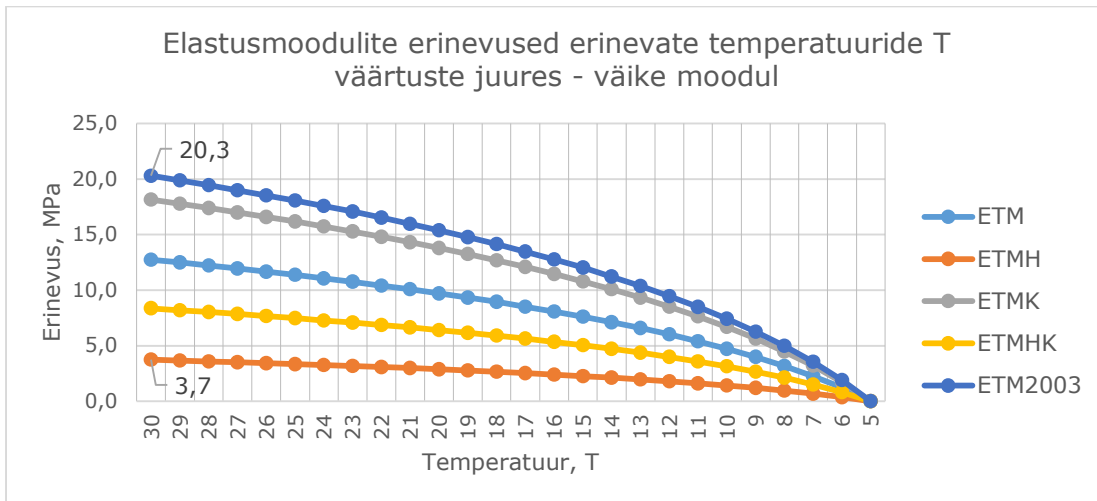


Joonis 2.8 Temperatuuri T väärtuse mõju elastsusmooduli väärtusele erinevusele protsentuaalselt (Lisa 5)

Joonisel 2.9 on esitatud asfaltkatte keskmise temperatuuri T mõju elastsusmooduli väärtuse erinevusele MPa-lites, mis oli aluseks temperatuuri T muutuse mõju arvutamisele protsentuaalselt (joonis 2.8, lisa 5).

Saame öelda, et asfaltkatte keskmise temperatuuri T väärtuse mõju arvutavale katendi üldise elastsusmooduli väärtusele on vastavalt kasutatavatele lähteandmetele (joonis 2.7) erinev. Teades, et temperatuuri ja arvutatud elastsusmooduli suhe on paraboolne (joonised 2.8 ja 2.9), tekib näiteks ETM<sub>2003</sub> puhul asfaltkatte keskmise temperatuuri tõusul +5 °C-lt +10 °C-le 7 protsendiline arvutatud elastsusmooduli väärtuse muutus ning katte temperatuuri tõusul kuni +30 °C-le isegi kuni 19,2 protsendiline elastsusmooduli väärtuse muutus (joonis 2.8). Samas, kasutades elastsusmooduli arvutamiseks ETMH empiirilisi konstante, ei mõjuta temperatuuri muutus elastsusmooduli väärtust niivõrd suurel määral - temperatuuri tõus +5 °C-lt +30 °C-le muudab arvutatud elastsusmooduli väärtust 5,2 % (joonis 2.8)

Eeltoodust lähtuvalt saame järeldada, et asfaltkatte keskmise temperatuuri T korrektne väärtus teostatud mõõtmistel võib oluliselt mõjutada ka seosega 2.6 arvutatava elastsusmooduli väärtust ning korrektse asfaltkatte keskmise temperatuuri määramine FWD mõõtmiste teostamise ajal on oluline.



Joonis 2.9 Temperatuuri T väärtuse mõju elastusmooduli väärtusele erinevusele, MPa (Lisa 5)

### **3. EESTI TINGIMUSTESSE SOBIVAD FWD SEADMED**

Käesolevas peatükis võtame vaatluse alla neli dünaamilist koormusseadet, mida kasutatakse meie lähiriikides ning mis sobiksid kasutamiseks ka Eestis. Iga seadme eripära lahatakse järgnevatel alapunktides. Lisaks on koostatud koondtabel, kus analüüsitakse, milline dünaamiline koormusseade oleks Eesti tingimustes kõige sobivam ja ratsionaalsem.

Võrdlemisse on kaasatud järgnevad seadmed:

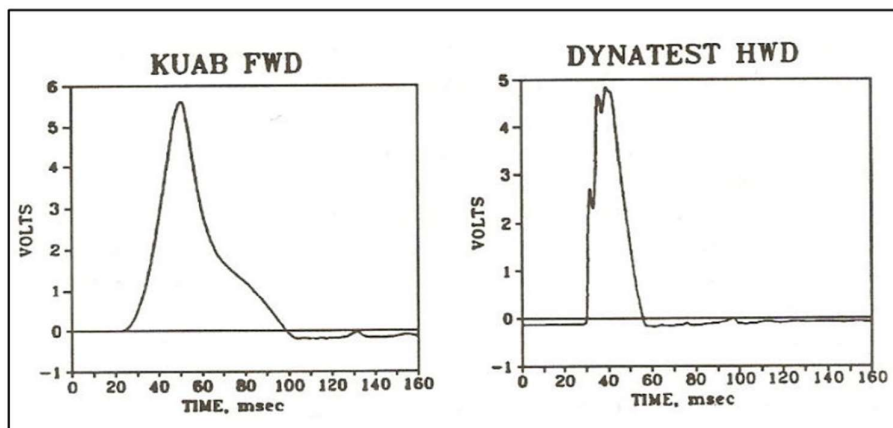
- Eestis kasutuses olnud Dynatest-8002,
- KUAB FWD,
- Primax FWD ning
- Greenwood Traffic Speed Deflectometer.

Vaatluse alla võetud seadmetest on autole järele haagitav nii Dynatest, Primax kui ka KUAB FWD seade. Ainsana sadulautole haagitav seade on Greenwood Traffic Speed Deflectometer. Täpsete andmete ja parameetrite leidmiseks on kasutatud tootjatelt, edasimüüjatelt ning erinevatest uuringutest ning aruannetest saada olevat informatsiooni.

#### **3.1 Dynatest FWD**

Käesoleval hetkel on Eestis kasutusel teekonstruktsiooni kandevõime määramiseks Dynatest FWD-8002, mida toodetakse Taanis ja mille mõõtmistulemuste alusel arvutatud katendi üldise elastsusmooduli väärtused riigimaantee iga 100 m kohta on kantud ka Teeregistrisse.

Mudelit Dynatest-8002 on võimalik uuendada kiiremale versioonile nimega Fast FWD. Antud versiooni eeliseks on võime kukutada massi viis korda kiiremini. See annab tulemuseks 75% rohkem testimispunkte tunnis või 45% vähem liiklusega kokkupuudet, kasutades samu sensoreid ja kasutajaliidest. Hüdraulika puudumise tõttu on ka väiksemad hoolduskulud [3]. Dynatesti tehniku sõnul on müüdnud ligikaudu 100 HWD seadet ning üle 450 FWD seadme, millest käesoleval hetkel on kasutusel 200-250 seadet.



**Joonis 3.1** Koormuse avaldumise ajaline graafik [4]

Antud dünaamiline koormusseade kasutab ühemassilist süsteemi. Selle põhimõtteks on massi kukutamine puhvrile, mis on ühendatud testitava pinnal asetseva koormusplaadiga. Jõud kanduvad pinnale läbi segmenteeritud koormusplaadi ning plaat tekitab läbipainde, mis jäljendab auto ratta koormust. Lahenduse miinuseks on koormuse avaldumise ebaühtlus. Dynatesti poolt tekitatav koormus, võrreldes KUAB seadmega, on hüplik, mis ei sarnane auto poolt tekitud koormusele (joonis 3.1). [4]

Seadet saab osta ka kokku võiditava haagisena, mis lihtsustab transportimist. Lisadena on võimalik osta:

- kuni 15 painde sensoriga seade,
- kaamerasüsteem koormusplaadi asukoha määramiseks ja pildistamiseks,
- generaator eraldi iseseivateks töödeks,
- haagise katted (saadaval nii pehmed kui ka kõvad) ning
- vilkurid.



**Joonis 3.2** Dynatest FWD seade (Allikas: <https://www.dynatest.com/>)

## 3.2 KUAB FWD

KUAB seadet (Joonis 3.3) hakati tootma 1976. aastal Rootsis. Rootsi Transpordiameti eesmärk oli arendada olemasolevaid mittelõhkuvaid katte läbipainde mõõtmise seadmeid. Hetkel on olemas kolm mudelit, mis erinevad üksteisest pinnale üle kantava koormuse vahemiku poolest [5]. KUAB 50 on kõige kergem ja mitmekülgsem mudel, mis annab võimaluse kattekonstruktsiooni katsetamiseks erinevates asukohtades nagu maanteedel, tänavatel ja parklates [6].



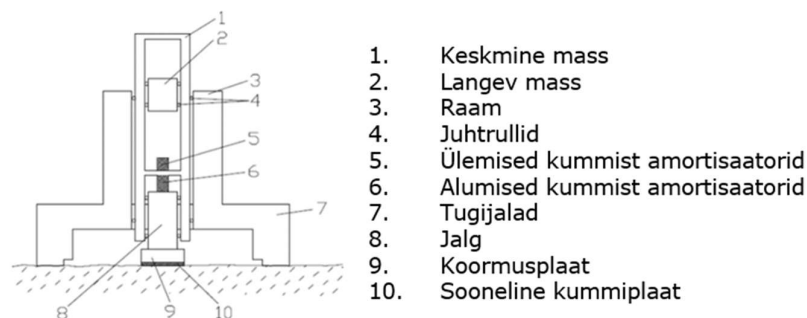
**Joonis 3.3** KUAB FWD seade [7]

KUAB dünaamiline koormusseade kasutab katte läbipainde tekitamiseks ainulaadset kahemassilist süsteemi. Tehnoloogia patenteeriti juba aastal 1976 ning leiutajateks olid Bengt Olov Tholen ja Hans Ivar Hedstrom [8].

Kahemassiline süsteem kukutab massi kahepuhvrilisele süsteemile [9]. Koormusimpulsi tekitamiseks juhib seadme raam massi nii, et ta langeks katte pinnaga risti. Mass tõstetakse ettemääratud kõrgusele ja kukutatakse ülemisele amortisaatorile. Jõuline impulss kattele tekitatakse langeva ja keskmise massi, kahe amortisaatori (ülemine ja alumine), jala ning neljaks osaks segmenteeritud koormusplaadiga, mille allosas paikneb parema kontakti saavutamiseks kattega sooneline kummiplaat (Joonis 3.4) [10]. Kahemassilise süsteemi eeliseks on pikem koormamiskestus, mis annab pinnasele

pehmema koormusimpulsi. Seetõttu saab öelda, et antud viis jäljendab auto ratta koormust täpsemini võrreldes Dynatesti seadmega (vt joonis 2.1).

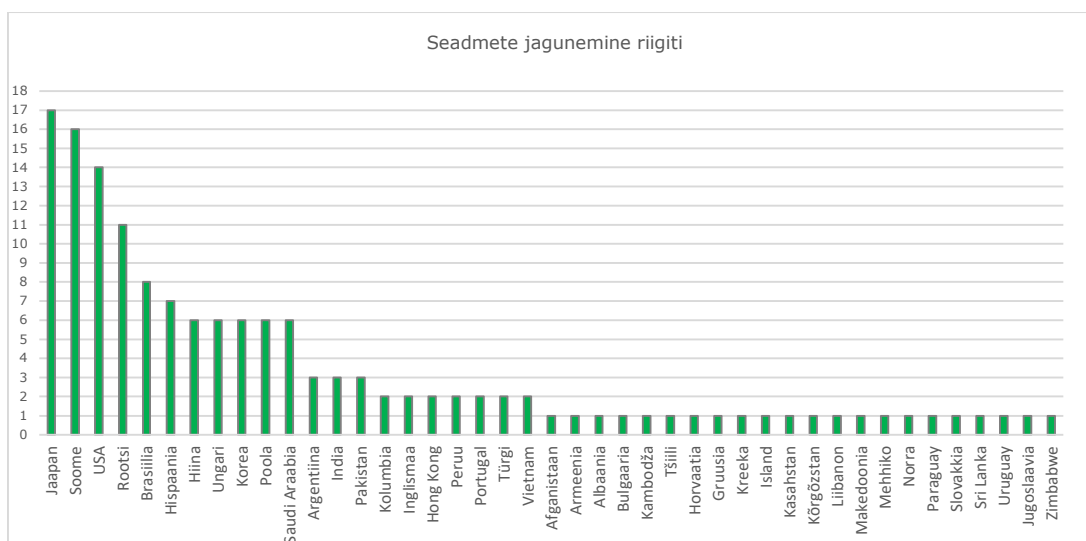
Koormusplaati ning massi juhivad terasest rullid ja raamid, mis toetuvad mõõtmise ajal tugijalgadele (Joonis 3.4). Tugijalgade kasutamine hoiab mõõtmise perioodil autot paigal ja seeläbi vähendab seadme kahjustamise ohtu [10].



**Joonis 3.4** KUAB koormusseadme konstruktsiooniline joonis [10]

Ühemassilise süsteemi puhul pole võimalik koormusimpulsi tippkoormust ning tõusuaega korrata. Kahemassilise süsteemi eeliseks on aga asjaolu, et katse kordamisel jääb lõpptulemus samaks. Lisaks on ühemassilise süsteemi tõusuaeg muutuv, mis võib ebasoodsates tingimustes muuta katte pinna läbipainet kuni 20% [10].

Hetkeseisuga on KUAB FWD kasutajaid ülemaailmselt 134 (Joonis 3.5). Enim seadmeid võib leida Jaapanist, Ameerika Ühendriikidest ning meie põhjanaabritelt Soomest ja Rootsist.



**Joonis 3.5** KUAB FWD seadet kasutavad riigid [11]



### 3.3 Primax FWD

Primax'i laialdasest tootevalikust leiab näiteks Primax 1500 (FWD) (Joonis 3.7), Primax 2500(HWD) ning Primax 3000(SHWD). Lähema vaatluse alla võetakse Primax 1500 FWD, mis on Eesti tingimustesse kõige sobivam. Vajadusel saab seadet täiendada ka järgnevatele mudelitele (Joonis 3.6) [12].



**Joonis 3.6** Primax seadme täiendamise ahel

Antud mudelit on võimalik saada nii kaheteljelisel haagisel kui ka kaubikusse paigaldatuna. Koormamiseks kasutatakse ühemassilist süsteemi nagu ka Dynatest seadme puhul. Seadme kaitseks kasutatavad katted võivad olla materjali poolest nii kõvad kui ka pehmed. Mudelit on võimalik saada erinevate sensorite arvuga. Valikuvariantideks on 10, 14 ja 18 sensorit. Antud mudelil on võimekus teha kuni 65 katset tunniga, seda olenevalt mõõtepunktide omavahelisest kaugusest. [12]



**Joonis 3.7** Primax 1500 FWD [12]

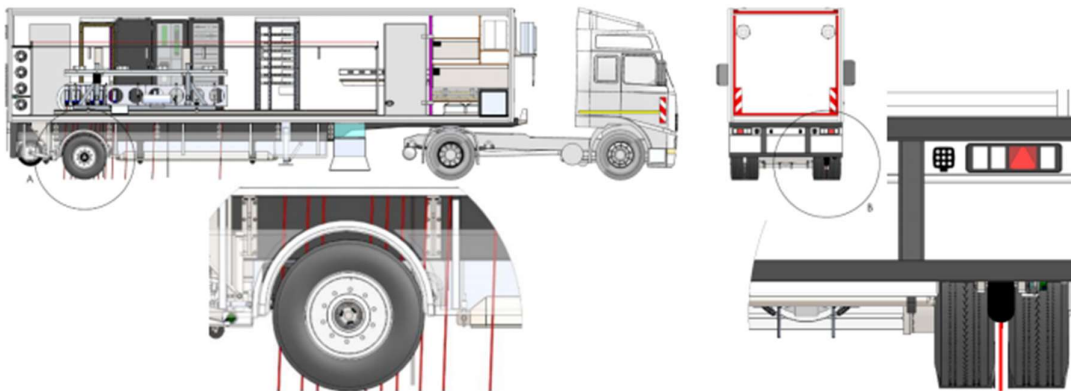
### 3.4 Greenwood TSD

Eelnevalt mainitud seadmetest on täielikult eristuv dünaamilise koormamise seade nimega Greenwood TSD ehk „Traffic Speed Deflectometer“ (Joonis 3.8). Seadet toodetakse Taanis, kus on ka nimetatud seadet kasutatud juba alates aastast 2005.

Katte läbipainde mõõtmine toimub kümne või enama Doppleri laseri abil. Andurid paiknevad koormamistelje (tagumise parema telje) ees, ulatudes kuni 1,8 m kaugusele koormuskeskmest koormusest tekkiva vajumikausi mõõtmiseks. Servo süsteem jälgib ja kontrollib järjepidevalt Doppleri sensorite positsiooni, arvestades sõiduki kere liikumist. Andurid mõõdavad ratta koormuse poolt tekitatud katendi pinna deformatsiooni võrrelduna koormamata katendi tasapinnaga. Teljekoormuseks on tavaliselt 100 kN, ratta koormuseks 50 kN. Ratta koormus võib muutuda lähtudes tee geomeetriast ja tasasusest, seetõttu kasutab seadme andmetöötlustarkvara seost mõõdetud deformatsioonide taandamiseks koormusele 50 kN.

Täpsemate andmete saamiseks katendikonstruktsioonist ja katte seisukorrast pakub Greenwood Engineering erinevat lisavarustust:

- maaradar (GPR),
- laserskänner tee põikkalde määramiseks,
- Right of Way (ROW) kaamera,
- pragude tuvastaja ja
- teekatte märgistuse skaneerija.



**Joonis 3.8** Greenwood TSD [13]

Seadme eeliseks on tee kandevõime mõõtmine liikluskiirusega, mis vähendab suurel määral liiklusõnnetuste riski, ummikuid ning õhusaastet. Mõõtmisi tehakse tavaliselt kiirusel 70-80 km/h, maksimaalne kiirus on 90 km/h ja minimaalne 38 km/h.

Koos deformatsioonide mõõtmistega mõõdetakse samaaegselt ka õhu- ja katte temperatuur mõõtmistulemuste temperatuuriparanduste tarbeks. TSD-ga mõõtmiste teostamine peaks toimuma õhutemperatuuril 8...30 °C lähtudes mõõtmistulemuste töötlemise temperatuuriparandusseosest.

Lisas 8 on toodud Soomest Destia Oy TSD-seadme kasutuskogemuste kaks Powerpoint ettekannet, milles teostatud TSD ja KUAB-i mõõtmistulemuste võrdluse peamisteks tulemusteks on:

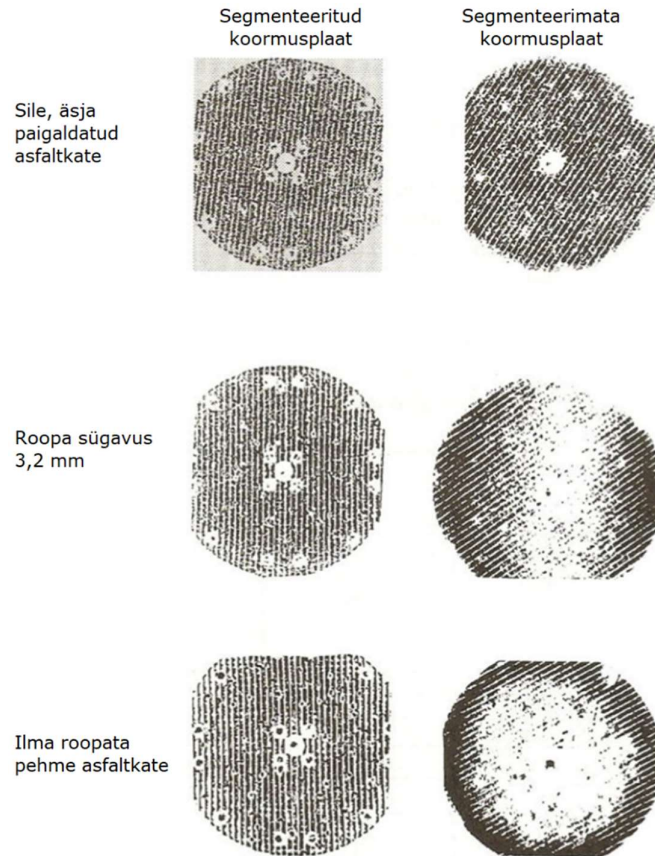
- TSD tekitatud katendi deformatsioonid (D0) on samasuured või natuke väiksemad, kui KUAB-il (erinevused erinevatel mõõtmislõikudel 0,9-22,0 %);
- Vajumikausid on samakujulised, kuid nendel on tasemeerinevus:
  - SCI ja BDI väärtused üsna sarnased KUAB-iga;
  - BCI väärtustes tasemeerinevus: TSD D600-D1800 väärtused väga väikesed, nullilähedased.

Samuti on Destia Oy TSD mõõtmistulemuste alusel järeldanud, et TSD kasutatav arvutusalgoritm ei sobi väga jäikadele katetele (näiteks tsementstabiliseerimised), kuid loodavad selle puuduse parandada. [13]

Negatiivse aspektina tooksin välja kõrge hinnataseme. Antud seade muutub tasuvaks ning mõistlikuks suuremate töömahtude puhul. Tiit Kaalu andmetel üritati aastatel 2016-2017 pilootprojekti raames TSD seadet Eestisse tuua. Sellel ajahetkel oli hinna suurusjärk 10 000 kuni 12 000 eurot päev koos andmetöötlusega.

### **3.5 Seadmete võrdlus**

Võttes vaatluse alla eelnevates alapeatükkides käsitletud dünaamilised koormusseadmed leiame, et kõikidel seadmetel on segmenteeritud koormusplaadid, mis tagavad koormuse jaotamise mõõdetavale pinnale võrdselt (Joonis 3.9). See osutub eriti tähtsaks olukorras, kus soovitakse testida ebatasaseid pindasid (nagu näiteks killustikust alus). Dynatest ja Primax seadmed sarnanevad omavahel nii parameetrite kui ka koormamismeetodi poolest (tabel 3.1). Teistest analüüsitud seadmetest eristub Greenwood TSD katendi mõõtmise ja analüüsimise tehnoloogia poolest.



**Joonis 3.9** Pingejaotuse jagunemine vastavalt katte pinnale koormusplaadi all [4].

**Tabel 1** Dünaamiliste koormusseadmete parameetrite koondtabel, [7], [14], [12]

Parameetrid	Mudelid		
	Dynatest FWD	KUAB FWD	Primax FWD
Mõõtmed, m	4,35x1,65x1,4	5,2x1,9x2,5	4,3x1,84x1,3
Mass, kg	1200-1300	1600-1800	1180
Koormuse vahemik, kN	7-120	12-50 Upgrade võimalik kuni 150	7-150
Koormuse kestus, msec	25-30	40-60	25-30
Tõusuaaja kestus, msec	x	17-23	10-15
Segmenteeritud koormusplaat	300 mm; 2 osaline	300 mm; 4 osaline	300 mm; 4 osaline
Siirdeanduri tüüp	Kiirendusandurid	Seismomeetrid	Kiirendusandurid
Läbipainde sensori resolutsioon, $\mu\text{m}$	1	1	1
Termomeetrid	teekatte ja õhu	teekatte ja õhu	teekatte ja õhu

Võttes võrdlusesse KUAB, Dynatest ning Primax seadmed, saame öelda, et KUABi kahemassiline süsteem tekitab sujuvama koormuse. Lisaks tänu pikemale koormuse tõusule ja koormuskestusele sarnaneb süsteemi tekitatud koormusimpulss rohkem liikuva sõiduki poolt tekitatud mõjule. Seetõttu on võimalik saavutada täpsemad mõõtmistulemused. Sellest saame järeldada, et kahemassiline süsteem tagab parema korratavuse ja annab täpsema tulemuse ka ebasoodsates mõõtmistingimustes.

KUAB seadme eeliseks on deformatsiooniandurid, mis võimaldavad mõõta suuremat amplituudi ning pole ka niivõrd tundlikud mõõdetava pinna ebatasasusele. Nõrgema kandevõime korral ei jõua koormustalla all olev andur suure läbipainde tõttu tagasi nullasendisse, registreerides väiksema läbipainde, kui sellele järgnev andur. Seetõttu tulevad SCI (Surface Curvature Index, pinnakõveruse tegur) väärtused negatiivsed, mille korral tuleb vähendada langeva koormuse suurust. See omakorda toob kaasa koormuse mittevastavuse normteljele. [4]

Mõlemad seadmed nii KUAB kui ka Dynatest on kandevõime mõõtmisteks sobivad, kuid KUAB annab keskmiselt 5 kuni 10 protsenti kõrgemaid tulemusi. Põhjus seisneb kahemassilise süsteemi eripäras, milleks on väiksem koormuse kestus ühemassilise seadmega. Mõõtetulemused on mõlemal siiski piisavalt täpsed hindamaks teekatendi kandevõimet ja selle struktuurset seisukorda. Täpsemat informatsiooni erinevuste leidmise kohta leiab lisast 6. [4]

Soomlaste andmeil annab Greenwood TSD seade võrreldes KUAB-iga natuke väiksemaid (erinevatel mõõtmislõikudel 0,9-22 %) deformatsioonide mõõtmistulemusi. Samuti on võrreldes KUAB-iga väiksemad mõõtmistulemused (5-10 %) ka meil kasutataval Dynatest seadmel. Seega võime eeldada, et Greenwood TSD seadme mõõtmistulemused langevad Dynatest seadme mõõtmistulemustega suhteliselt hästi kokku.

Kokkuvõtteks saame öelda, et täpsuse poolest tuleks võrreldud traditsioonilistest FWD seadmetest eelistada KUAB seadet. Juhul, kui aga soovitakse teostada suurel hulgal mõõtmisi lühikese ajaperioodi vältel, tuleks kaaluda Greenwood TSD seadme valikut. Soetushinna poolest on tegemist tunduvalt kulukama seadmega, kuid selle eelised ilmnevad suuremate mõõtemahtude juures. Samas ei ole ilmselt otstarbekas Eestil omale Greenwood TSD seadet soetada, kuna iga-aastased kandevõime mõõtmismahud on suhteliselt väikesed ning odavam tuleks vastavat teenust sisse osta.

Lisas 6 on esitatud väljavõte Sven Sillamäe poolt Maanteeametile koostatud uurimistöo aruandest *Madalaklassiliste (kruusateede) remondi/uuendamise meetodika*

*laiendamine kattega teedele* (Maanteeamet, 2019, lk 24-40), kus on täpsemalt võrreldud KUAB ja Dynatest seadmeid ja nende mõõtmistulemuste alusel arvutatud katendi üldise elastsusmoduli väärtuseid.

## 4. SARNASE KLIIMAGA RIIKIDE KANDEVÕIME MÕÕTMISTE PRAKTIKAD JA NENDE ANALÜÜS

Käesolevas peatükis võtame vaatluse alla sarnase kliimaga riikide – Läti, Leedu, Soome, Taani - kandevõime mõõtmiste meetodid ning tavad. Selgitame, milliseid dünaamilisi koormusseadmeid riigid kasutavad ning täpsemalt mida nende andmetega hiljem tehakse.

Lätile ja Leedule esitati 5 järgmist küsimust koos alaküsimustega:

1. Millise tootja FWD-seadet Te kasutate? Millist tüüpi/mudelit?
2. Kas Te kasutate FWD-seadet ainult projekti tasandi mõõtmistel või ka teedevõrgu tasandi mõõtmistel?
  - Kui Te kasutate seadet ka võrgu tasandil, siis kuidas Te kasutate mõõtmistulemusi? Kas Te kasutate arvatud elastsusmooduli väärtuseid rekonstrueerimist vajavate teelõikude valimiseks? Mis on sellisel juhul elastsusmooduli piirväärtused?
  - Sama küsimus projektitasandi mõõtmistulemuste kasutamise kohta.
3. Millist võrrandit Te kasutate FWD mõõtmistulemuste alusel katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks?
  - Milliseid algandmeid selleks on vaja?
  - Kuidas Te võtate arvesse mõõtmiste teostamise aja (kuupäeva või kuu) arvatud elastsusmooduli väärtuse taandamiseks võrreldavale/suhtelisele ajale, kui katendikonstruktsioon on kõige nõrgem (tavaliselt kevadel)?
4. Kuidas FWD mõõtmistulemuste alusel arvatud elastsusmooduli väärtused korreleeruvad Teie katendiarvutusmetoodikas kasutatavate elastsusmooduli väärtustega?
  - Nõukogudeaegne katendiarvutusmetoodika (VSN) baseerub staatilistel elastsusmooduli väärtustel, aga FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatakse dünaamilised elastsusmooduli väärtused. Kas see on Teie jaoks probleemiks? Kui jah, siis millist üleminekut (võrrand, tegur vmt.) Te kasutate dünaamilise ja staatilise elastsusmooduli vaheliseks üleminekuks?
5. Kas Te kasutate FWD vajumikausi parameetreid katendi ja aluspinnase seisukorra hindamiseks? Millist metoodikat Te selleks kasutate? Kas seda tehakse ainult projekti tasandil või ka teedevõrgu tasandil?

Kuna Soome (ja Taani) puhul ei eksisteeri probleemi Nõukogudeaegse VSN-põhise katendiarvutusmetoodikaga ja sellest tulenevalt puudub vajadus leida seost katendi dimensioneerimisel kasutatavate ja FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatavate elastsusmoodulite vahel, siis neile esitatud küsimusi on korrigeeritud sellest lähtuvalt. Põhimõtteliselt esitati samad eespool loetletud mõningase erisusega 5 küsimust: (erisused eelnevaga *kaldkirjas*):

1. Millise tootja FWD-seadet Te kasutate? Millist tüüpi/mudelit? *Miks Te valisite just selle seadme tootja?*
2. Kas Te kasutate FWD-seadet ainult projekti tasandi mõõtmistel või ka teedevõrgu tasandi mõõtmistel?
  - Kui Te kasutate seadet ka võrgu tasandil, siis kuidas Te kasutate mõõtmistulemusi? Kas Te kasutate arvutatud elastsusmooduli väärtuseid rekonstrueerimist vajavate teelõikude valimiseks? *Kuidas sellisel juhul elastsusmooduli piirväärtused on määratud?*
  - *Milline on võrgu tasandil teostatavate mõõtmiste sagedus? Milline on mõõtmiste tihedus teelõigu või kilomeetri kohta?*
3. Millist võrrandit Te kasutate FWD mõõtmistulemuste alusel katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks?
  - Kuidas Te võtate arvesse mõõtmiste teostamise aja (kuupäeva või kuu) arvutatud elastsusmooduli väärtuse taandamiseks võrreldavale/suhtelisele ajale, kui katendikonstruktsioon on kõige nõrgem (tavaliselt kevadel)?
4. Kuidas FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud elastsusmooduli väärtused korreleeruvad Teie katendiarvutusmetoodikas kasutatavate elastsusmooduli väärtustega?
5. Kas Te kasutate FWD vajumikausi parameetreid katendi ja aluspinnase seisukorra hindamiseks? Millist metoodikat Te selleks kasutate? Kas seda tehakse ainult projekti tasandil või ka teedevõrgu tasandil?

## **4.1 Läti kandevõime mõõtmiste praktika**

Läti vastused kandevõime mõõtmise praktika küsimustele on esitatud Lisas 7.

Analoogselt Eestile kasutab Läti dünaamilist koormusseadet Dynatest-8002 FWD. Kandevõime mõõtmisi teostatakse Läti riigimaanteedel teedevõrgu tasandil, teede rekonstrueerimisel ning mõne konkreetse juhtumi tarbeks.



Teedevõrgu tasandil kasutab Läti Maanteeameti strateegiaosakond HDM-4 teede haldamise tarkvara. Üks paljudest HDM-4 tarkvara sisenditest on näiteks FWD koormusplaadi aluse anduri mõõdetud deformatsiooni D1 andmed.

Teede rekonstrueerimisel varustab Läti Maanteeameti strateegia osakond projekteerijaid värskete FWD mõõtmisandmetega. Hetkel teadaolevalt pole FWD andmete kasutamine projekteerijatele kohustuslik. Samas plaanitakse projekteerijatele kehtestada FWD andmete analüüsimise kohustus.

Läti Maanteeameti inspektsiooni ja ekspertiiside osakond kasutab konkreetsetel juhtudel (nt vead uuel teekattel) FWD andmeid koos järgnevate andmetega:

- roopa sügavus,
- maaradari andmed,
- laserskanneri andmed.

Tavapäraselt kasutatakse FWD mõõtmistulemuste andmeid ilma parandusteta, kuid sellisel juhul on oluline järgida, et FWD mõõtmised teostatakse tulemuste võrreldavuse saavutamiseks samal päeval. Teekatendite üldiste elastsusmoodulite ning katendite erinevate ekvivalentsete sügavuste moodulite arvutamiseks kasutatakse Boussinesq võrrandeid. Sarnaste omadustega teelõikude määramiseks kasutatakse nn kumulatiivsummaarset meetodit.

Elastsusmoodulite arvutamisel Boussinesq võrranditega kasutatakse ainult FWD mõõtmistulemuste andmeid: pinge koormusplaadi all mõõtmise ajal, deformatsioonid ning deformatsiooni kaugus koormuskeskmest. Mõõtmiste teostamise aega ei arvestata.

Lätil pole määratletud meetodit teekatte materjalide elastsusmoodulite laboratoorseks määramiseks. Seetõttu kasutatakse eeldatavaid teekatendi materjalide moduleid. Nad ei püüdnud leida korrelatsiooni teoreetiliste ja mõõdetud elastsusmoodulite vahel, mistõttu otsustasid nad teise variandi kasuks. Nad kasutatavad katendiarvutuse meetodikat ainult teekatte kihtide paksuste saamiseks, kuid kõigi sidumata kihtide kandevõime kontroll põhineb Saksa nõuetel RStO 12 (Guidelines for the standardisation of pavement structures of traffic areas, Edition 2012).

Läti Maanteeameti inspektsiooni ja ekspertiisi osakond ei kasuta FWD vajumikausi parameetreid katendi ja aluspinnase seisukorra hindamiseks, vaid kasutab elastsusmooduli arvutamiseks teatud sügavusel katendi pinnast Boussinesq võrrandeid lähtudes FWD koormuskeskmest vastavalt teatud kaugusel asuvate deformatsiooniandurite mõõtmistulemusi.

## 4.2 Leedu kandevoime mõõtmiste praktika

Leedu vastused kandevoime mõõtmise praktika küsimustele on esitatud Lisas 8.

Leedu Vilniuse Gediminase Tehnikaülikooli (VGTU) teedelabor kasutab dünaamilist koormusseadet Primax 2500, millega on võimalik tekitada koormust kuni 250 kN. Sama koormusseadet on tutvustatud ka käesoleva töö peatükis 3.3. Leedus on ka teine organisatsioon (Kaunase Teede ja Transpordi Uurimise Instituut), mis kasutab käesoleval hetkel 20 aastat vana FWD Dynatest seadet, millega on võimalik tekitada kuni 150 kN koormus.

VGTU kasutab FWD-seadet ainult projekti tasandil. Varasemalt on neil olnud kaks projekti Vilniuses ja Šiaulias, kus viidi läbi tänavavõrgu katendikonstruktsioonide uuring nende struktuurinäitajate määramiseks. Viimase kahe aasta jooksul on teostatud mõõtmisi seadmetega FWD ja TSD (Traffic Speed Deflectometer, IBDiM). Mõõtmisi teostati nii uutel kui ka vanematel teedel.

Katendi üldise elastsusmooduli  $E_0$  arvutamiseks FWD mõõtmisandmete põhjal kasutatakse seost (4.1) vastavalt COST 336 *Falling Weight Deflectometer* (European co-operation in the field of scientific and technical Research, 2005) põhimõtetele:

$$E_0 = \frac{2(1-\nu^2)\sigma_0 a}{d_{0,n}}, \quad (4.1)$$

kus:  $\nu$  – Poissoni tegur;

$\sigma_0$  – taandatud koormus, (MPa);

$a$  – koormusplaadi diameeter;

$d_{0,n}$  – taandatud läbipaine koormusplaadi all.

Võrrandit (4.1) kasutatakse pärast deformatsioonide temperatuuri- ja koormustaandamist. Koormuse taandamiseks kasutatakse seost (4.2) vastavalt COST 336:

$$d_{0,n} = \frac{L_{norm}}{L_{applied}} d_0, \quad (4.2)$$

kus:  $L_{norm}$  – sihtkoormus (teedele tavaliselt 50KN);

$L_{applied}$  – tegelik koormus mõõtmise ajal (kN);

$d_0$  – tegelik mõõdetud läbipaine (mm).

Deformatsiooni taandamiseks temperatuurile 20 °C kasutatakse Leedus teostatud uuringutel põhinevat võrrandit [15].

$$t_k = 10^{-0,000221 \cdot h \cdot 1,02239 \cdot (T_A - 20)}, \quad (4.3)$$

kus:  $t_k$  – taandamistegur (deformatsioon taandatakse korrutades selle taandamisteguriga);

$h$  – asfaltkatte kogupaksus (mm);

$T_A$  – asfaltkatte tegelik temperatuur mõõtmise ajal (°C) (tavaliselt mõõdetakse keskmisel sügavusel).

Eraldi kihtide E-moodulite tagasiarvutamiseks kasutatakse FWD mõõteandmetel põhinevat spetsiaalset tarkvara nimega „Elmod“. Kui kihtide elastsusmoodulite tagasiarvutamiseks kasutatakse tarkvara Elmod ning aluspinnas on hüdrotermilise režiimi suhtes tundlik, hinnatakse seda sesoonsuse tegurite kaudu. Hüdrotermilise režiimi mõju täpsemaks hindamiseks vanemate katenditel teostatakse neil FWD mõõtmisi erinevatel aastaegadel. Alates aastast 2019 Leedu standardiseeritud katendikonstruktsioonide projekteerimisdokument KPT SDK 19 täpsustab, et külmatundlike aluspinnaste korral tuleb kasutada pinnase stabiliseerimist hüdraulilise sideainega, parendamist või muid lahendusi, tagamaks, et teekonstruktsiooni kandevõime vastab nõuetele kogu eluea vältel, mistõttu ei pea sesoonsust arvestama.

Leedu kogemus näitab, et staatilisel ja dünaamilisel E-moodulil on suur korrelatsioon (kui mõõdame elastsusmooduli asfaltkatte pinnal ja arvutame sidumata aluse kihi  $E_{v2}$ ). Täpse korrelatsiooni kindlakstegemiseks tuleb kõik saadaolevad mõõteandmed süstematiseerida ja analüüsida. Lisaks tuleb mainida, et hetkel pole neil andmeid vastvalminud teedelt. Lisaks peaksid 2020. aasta lõpuks valmima laboratoorsed uuringud, mis määravad asfaldikihtide E-moodulid.

Katendi projekteerimisel kasutatakse asfaldi väsimise hindamiseks dünaamilisi elastsusmooduleid. Sidumata kihtide ja aluspinnase püsivate deformatsioonide hindamisel kasutatakse staatilisi elastsusmooduleid. Sellisel juhul saab dünaamilise elastsusmooduli teisendada staatiliseks elastsusmooduliks vastavalt Saksamaa meetodikale FGSV-Nr.: 433 C 2.1 (AP Trag C 2.1: FWD, Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen, Teil C 2.1 Falling Weight Deflectometer (FWD): Auswertung und Bewertung – Asphaltbauweise).

Elastsusmoodulite tagasiarvutamiseks kasutatakse spetsiaalset tarkvara, mille sisendandmeteks on koormuse rakendamise keskpunktist erinevatel kaugustel olevad

deformatsioonid. Nagu alguses on mainitud, teostati varasemalt kaks projekti Vilniuses ja Šiauliais, kus viidi FWD seadmega läbi tänavavõrgustiku teekatendite konstruktsioonide uuringud, eesmärgiga määrata kindlaks nende struktuuri näitajad, kasutades nende arvutamiseks koormusplaadi keskpunktist teatud kaugusel mõõdetud deformatsioone vastavalt COST 336 põhimõtetele.

Lisaks on viimased kaks aastat arendatud katendikonstruktsiooni projekteerimismudelit ning tarkvara ViaStructura (vt Lisa 8).

### **4.3 Soome kandevõime mõõtmiste praktika**

Soome vastused kandevõime mõõtmise praktika küsimustele on esitatud Lisas 9.

Soomes on kõige populaarsemaks kandevõime seadmeks KUAB (50 kN), mida eelistati põhjusel, et tegemist on Dynatest-ist märgatavalt odavamal seadmega. Lisaks toodi eeliseks hoolduskeskuse ja esinduse asukohapõhine lähedus. Soome Transpordiametil puudub FWD seade. FWD seadmeid omab Destia, kuna Transpordiametist eraldati tootmisüksused.

Antud ajahetkel kasutatakse FWD seadmeid projekti tasemel ning kvaliteedijärelevalves ja TSD seadmeid teedevõrgu tasandil. Projekti tasandil soovitatakse punktide vahekaugust 20 meetrit, kuid kasutatakse ka vahekaugust 50 meetrit. Arutelu jätkub selle üle, kas mõõtmisi teostada malemustrina või ainult raske liiklusega rajal. Võrgu tasandil mõõdetakse PEHKO projektis deformatsioone iga 5 aasta tagant (<https://www.roadscanners.com/reference/pehko-pehko-2015-2025-2028/>), mis on soomlaste sõnul hea mõõtmisintervall. Suure probleemina tuuakse FWD kasutamise puhul välja see, et mõnikord mõõdetakse ainult „halb kohti“, mistõttu nende osakaal kasvab.

Teekatte elastsusmoodulit arvutatakse nõ keskmise elastsusmoodulina ( $E_2$ ), mis võeti kasutusele, kui staatilise koormusplaadi katse ja FWD pidid saama nõ „ühemõõdulisteks“.  $E_2$  puhul on tegu ebasobiva parameetriga, mis annab kaljualadel liialt kõrge tulemi ning turbale rajatud teedel liiga madala tulemi, mistõttu Soome ja Rootsi kaljupinnale ehitatud teedel tekivad kiiresti roopad.

Katendi elastsusmoodulit arvutatakse tagasiarvutusprogrammide abil. Soomes kasutusel olev Road Doctor programm võimaldab kasutada arvutusi Dynatest Elmod programmi vahendusel. Katendi moodulit saab arvutada ka USA FHWA

edasiarvutusalgorithmi (Forward Calculation algorithms) abil, mis põhineb ELMOD ja Modulus programmidega varasemalt arvatud erinevate konstruktsioonide ja deformatsioonide andmebaasidel.

Lisaks eeltoodule kasutatakse Soomes ka kandevõime indekseid (Bearing Capacity Indexes) "Strain", "SCI" ja "BCI", millest esimese arvutamiseks kasutatakse Rootsi Transpordiameti (Trafikverketi) valemit, mis on oma kasutatavust tõestanud. SCI arvutatakse FWD koormusplaadi keskmeest 0 ja 200 mm ja BCI 900 ja 1200 mm kaugusel olevate andurite mõõdetud deformatsioonide alusel. Rootsi valem arvutab ka aluspinnase mooduli, mille tagasiarvutamisel on selle määratlemine alati loterii (lineaarne elastsus vs mittelineaarne elastsus).

Mõnes Ely keskuses (elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus - majandusarengu, transpordi ja keskkonna keskus - riigiasutus, mis edendab regionaalarengut kohalikus omavalitsuses keskvalitsuse rakendus- ja arenguülesannete täitmisega) kasutatakse kevadisi mõõtmisi, kuid seda ei soovitata põhjusel, et külmumine aluspinnases või struktuuris mõjutab deformatsioone suurel määral, mistõttu saadakse valed tulemused. Seetõttu on parim ja usaldusväärsem aeg sügisene mõõtmine septembris või oktoobris.

E<sub>2</sub> mooduli väärtuse kasutamine kvaliteedikontrollis on ebaratsionaalne. Teisalt on problemaatiline ka hüstereesi nähtus, kus sidumata materjali kuivamisel võib selle elastsusmoodul osutada kuni 100 MPa suuremaks, kui sama märgunud materjali puhul – ehk see, millal mõõtmisi teostatakse, mõjutab tulemusi ja seda teati juba plaatkoormuskatsete teostamise ajast.

RoadScanner Oy kogemus on see, et kui projekteerimisel arvutatakse vana tee konstruktsiooni elastsusmoodul ja seejärel dimensioneeritakse sellele teele uus katendikonstruktsioon Odemarki valemiga (välja arvatud kõige jäigemad konstruktsioonid ja maksimaalsed liiklusmahud) ning seejärel arvutatakse Road Doctor'i tarkvara Odemark'i mooduliga FWD mõõtmistulemuste alusel uue katendi pinnal Odemark'i kandevõime, siis on elastsusmoodul katendi pinnal kavandatule üsna lähedal (kui tee ehitatakse vastavalt projekteeritule). Probleemiks võib olla, et näiteks on uue katte elastsusmoodul esimesel aastal projekteeritust väiksem ja siis võivad mõõdetud mooduli väärtused olla madalamad. Teiseks probleemiks on, et kui vanu jäiksid katteid segatakse freesimisega, langeb neil kandevõime sageli vanaga võrreldes. Neid probleeme tuleb arvestada.

FWD vajumikausi mõõteandmeid katendikihtide, muldkeha ja aluspinnase hindamiseks kasutatakse Soomes palju. Soomes käimas olev ROADEX projekt kirjeldab roobaste

tekkeriski klassifitseerimist, kasutades selleks FWD või TSD seadmete mõõtmistulemusi. Klassifikatsioonideks on:

- Teekatte väsimistugevus
- SCI tüüp I roopad
- BCI tüüp II roopad

Antud liigitust kasutatakse nii projekti kui ka võrgu tasandil. Soome teadurid on õpetanud nimetatud klassifitseerimist ka ülikoolides ja ka noored insenerid on selle omaks võtnud. Ka IRF-i (Maailma Teede Organisatsiooni) PMS-kursustel on sellesse päris positiivselt suhtunud.

TSD seadet on Soomes kasutatud enam kui 5 aastat ja tulemused on olnud suurepärased ning need korreleerusid „piisavalt hästi“ FWD mõõtmistega (ei võigi oletada, et saadakse täpselt samu tulemusi). 2020. aastal mõõdeti esmakordselt rehvi taga olevaid deformatsioone, mis suudavad anda täpsemat teavet selle kohta, kas katendi reaktsioon on täiesti lineaar-elastne või on seal olemas ka visko-elastne reaktsioon. Greenwoodi uudseimat TSD seadet katsetati 2020 juulis Muonio anduritega varustatud Aurora testsaidil (<https://www.tmf.fi/fi/road/aurora-intelligent-road-section-e8>) ja andurite reaktsioon võrreldes TSD mõõdetud väärtusega oli üllatavalt hea.

Lisas 8 on toodud Soomest Destia Oy TSD-seadme kasutuskogemuste kaks Powerpoint ettekannet, mille peamisi tulemusi on kirjeldatud Greenwood TSD seadme tutvustuse juures (p. 3.4).

## **4.4 Taani kandevõime mõõtmiste praktika**

Taani vastused kandevõime mõõtmise praktika küsimustele on esitatud Lisas 10.

Kandevõime mõõtmisi Taanis teostab Taani Maanteedirektoraadi (Vejdirektoratet).

Kuni käesoleva aastani (2020) teostati kandevõime mõõtmisi TSD seadmega. Mõõdeti umbes 1000 km teid mõlemas sõidusuunas (kokku seega ca 1900-2000 km). Taani Maanteedirektoraadi Korrashoiu Üksuse ülesandeks oli kindlaks määrata, millised teelõigud vajasisid kulumiskihi uuendamist, mida tehti tavaliselt visuaalse hinnangu alusel, kasutades lisaks tasasuse ja roopasügavuse mõõtmisandmeid. Samuti pidi Korrashoiu Üksus TSD mõõtetulemuste alusel kindlaks määrama puuduliku kandevõimega teelõigud, kuid seda tööd pole ilmselt kunagi tehtud, kuna seda tööd tuli teha käsitsi. FWD mõõtmisi on teostatud väga vähe, kui üldse.

Käesolevast aastast (2020) alates tegeletakse kulumiskihi taastamist vajavate lõikude valikuga TSD-ga mõõdetud kandevõime väärtustega komplekselt. TSD mõõtmistulemuste alusel otsustatakse, millistel valitud lõikudel tuleb teha täiendavaid FWD mõõtmisi.

FWD mõõtmisi katendi seisukorra täpsustamiseks hakatakse teostama ilmselt 100 m sammuga (mõõdetava lõigu pikkus umbes 300-4000 m). 100 m sammust peaks piisama, sest riigimaanteed on tavaliselt küllaltki ühtlase konstruktsiooniga. Katte/asfaldi paksuse määramise osas ei ole veel otsust, aga ilmselt puuritakse 5 cm diameetriga puuraugud iga 300 m tagant. Taanlastel on küllaltki hea katendikonstruktsioonide andmebaas, aga sageli asfaltkatte paksused ei ole seal õiged, sest freesimisi sageli andmebaasis ei kajastata, mistõttu asfaldikihi paksuse määramine puurimisega on vajalik (esialgne vana katte freesimine ja uus ülekate on sagedane katte taastamise tehnoloogia). Sidumata kihtide paksused saadakse andmebaasist või määratakse eksperthinnanguna.

Aluspinnase kandevõime määramiseks kasutatakse plaatkoormuskatset. Taani geoloogid ei usalda LWD (Light Weight Deflectometer) mõõtmistulemusi aluspinnase kandevõime hindamisel. LWD ei iseloomusta nii hästi aluspinnase omadusi kui plaatkoormuskatset, kuid see on kiire katse ja sellega on võimalik teostada palju mõõtmisi ja arvutada keskmine, mis on selle seadme positiivne omadus, seda eriti ehituse käigus, kui konstruktsiooni kihid on homogeensemad.

Mõõtmiste teostamiseks on Taanil 40 aastat vana standardne Dynatest FWD seade, aga nad planeerivad lähiajal osta selleks uue seadme (millise, ei ole täpsustatud).

Vajaliku ülekatte paksuse arvutamiseks on taanlastel oma tarkvara, aga nad mõtleavad ELMOD'i ostmisele, kuna see on selleks sobiv hea tarkvara.

Vajumikausi parameetreid (SCI, BDI, BCI) taanlased ei kasuta.

## **4.5 Lähiriikide kandevõime mõõtmiste praktika analüüs**

Käesolevas punktis võtame vaatluse alla Läti, Leedu, Taani ning Soome kandevõime mõõtmiste nii sarnasused kui ka erinevused. **Tabel 4.1** käsitleb pidepunkte, kus on esitatud põhilised osad kandevõime mõõtmiste teostamiseks ning arvutamiseks.

Nelja riigi võrdluses on tabelis 4.1 näha, et Dynatest (FWD) seadet kasutatakse nii Lätis, Taanis kui ka Leedus. Seevastu KUAB on ulatuslikult kasutuses Soomes, mida eelistati seadmete ostuperioodil põhjusel, et tegemist on Dynatest-ist märgatavalt soodsama seadmega. Lisaks oli suureks eeliseks hoolduskeskuse ja esinduse asukohapõhine lähedus. Leedu, Soome ja Taani ühiseks jooneks on võrgustiku tasandil Traffic Speed Deflectometer (TSD) kasutamine. Seade annab võimaluse andmeid koguda suurel hulgal ning seda lühikese ajaperioodiga, täpsem ülevaade TSD-seadmest on esitatud punktis 3.4.

**Tabel 4.1** Välisriikide kandevõime mõõtmise erisused

Parameeter	Läti	Leedu	Soome	Taani
Koormusseadme tüüp ning mudel	Dynatest-8002 (FWD)	Primax 2500 (HWD), Dynatest (FWD) ning Traffic Speed Deflectometer (TSD)	KUAB (FWD) ning Traffic Speed Deflectometer (TSD)	Dynatest (FWD) ning Traffic Speed Deflectometer (TSD)
Kandevõime mõõtmiste ulatus	Projekti ning teedevõrgu tasandil (HDM-4 sisendina); lisaks mõnede konkreetsete juhtumite tarbeks	Projekti tasandil (TSD-ga 100-200 km aastas)	Projekti tasandil FWD ning võrgustiku tasandil TSD (1000-2000 km aastas)	Projekti tasandil FWD ning võrgustiku tasandil TSD (1900-2000 km aastas)
Elastusmoodulite arvutamine	Arvutamiseks kasutatakse Boussinesq'i võrranditel põhinevaid valemeid	Arvutamiseks kasutatakse Boussinesq'i võrranditel põhinevaid valemeid	Arvutamiseks kasutatakse Rootsi Transpordiameti (Trafikverketi) valemit (Odemark + Road Doctor tarkvara)	Arvutamiseks kasutatakse Taani Maantee-direktoraadi (Vejdirekoratet) tarkvara + ostetakse ELMOD
Mõõtmise teostamise aja arvestamine arvutustes	Mõõtmise teostamise aega ei arvestata	Tulemused taandatakse temperatuurile 20 °C	Road Doctor tarkvaras arvestatakse bituumenisideainega seotud katte temperatuuri ja paksusega	Mõõtmise teostamise aega ei arvestata

Kõikides ülaltoodud riikides teostatakse mõõtmisi projekti tasandil (Taanis on küll see praktika alles juurutamisel). Lätis teostatakse mõõtmisi ka lisaks konkreetsetel juhtumitel, näiteks, kui uutel teekatetel tekivad probleemid. Samuti tehakse nii Lätis kui ka Soomes kandevõime mõõtmisi teedevõrgu tasandil. Sealjuures on ka Leedu viimase kahe aasta jooksul teostanud mõõtmisi nii uutel kui ka vanematel teedel, millest võib välja areneda suuremamahuline mõõtmine teedevõrgu tasandil.



Võttes vaatluse alla mõõtmiste teostamise aja arvestamise, näeme, et Lätis seda arvesse ei võeta. Leedus seevastu taandatakse FWD mõõtmistulemused temperatuurile 20 °C. Soome osas valitseb mõõtmiste aja arvestamise osas ebaselgus ega ole täpselt teada, kas RoadScanners Oy poolt välja töötatud Road Doctor tarkvara, milles on arvestatud bituumensideainega seotud katte kihtide temperatuur ja paksus. Soomes teostatakse enamus kandevõime mõõtmistest sügisel septembris-oktoobris, mis peaks tagama mõõtmistulemuste võrreldavuse. Taani, kes praktiliselt FWD mõõtmisi veel täna projekti tasandil ei teosta, ei võta arvesse ka siis otseselt mõõtmiste teostamise aega.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas diplomitöös selgus, et A. Aaviku poolt aastal 2003 leitud  $ETM_{2003}$  determinatsioonikordaja  $R^2$  väärtus oli väiksem võrreldes ETMH, ETMK ning ETMHK tulemitest (tabel 2.4). ETM korral oli determinatsioonikordaja väärtuseks 0,498 ning  $ETM_{2003}$  puhul 0,574. Antud tulemus oli aga oodatav, kuna arvutustesse kaasati märkimisväärselt suurem hulk mõõteandmeid. Jooniselt 2.2 on näha, et aastal 2003 tuletatud seose alusel arvutatud elastsusmoodulite väärtused ( $ETM_{2003}$ ) praktiliselt sama korrelatsiooni KAP väärtustega, kui käesolevas analüüsis leitud ETM seos (determinatsioonikordajad  $R^2$  vastavalt 0,654 ja 0,652). Seega võime teedevõrgu tasandil jätkata siiani kasutusel oleva FWD mõõtmisandmete alusel katendi üldise elastsusmooduli arvutamise empiiriliste konstantidega ( $ETM_{2003}$  veerg tabelis 2.4), et tagada Teeregistris olemas olevate elastsusmoodulite väärtuste võrreldavus uute mõõtmistulemustega.

Uuringu raames on leitud, et projekti tasandil FWD mõõtmisandmete töötlemisel on soovitatav kasutada ETMHK empiirilisi konstante (tabelis 2.4 empiirilised konstandid ETMHK veerus) (FWD mõõtetulemused E, asfaltkatte keskmine temperatuur T, mõõtmiste teostamise kuu M, seotud kihtide paksus FWD mõõtmiskohas H ning katte paksus FWD mõõtmiskohas K). Antud juhul oli seose determinatsioonikordaja  $R^2$  väärtus kõrgeim (0,819). Nimetatud meetodi elastsusmooduli väärtuse ja katendarvutamise programmi abil saadud väärtuse kattuvus oli samuti kõrge (joonis 2.2,  $R^2=0,796$ ), tõestades meetodi täpsust. Samas veidi nõrgema determinatsioonikordaja väärtuse (0,788, joonis 2.2) annab seos ETMK vs  $E_{KAP}$  ehk seos empiiriliste konstantidega, mis arvestavad katte asfaltkihtide paksust (tabelis 2.4 empiirilised konstandid ETMK veerus). Analüüsi käigus leiti, et katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks projekti tasandil on soovitatav FWD mõõtmistulemuste alusel seosega 2.6 kasutada tabelis 2.4 esitatud empiirilisi konstante kas ETMK või ETMHK veerust, sõltuvalt sellest, millised andmed meil olemasoleva katendi kohta kättesaadavad on (kas ainult asfaltkatte paksus K või siis lisaks ka kogu seotud kihtide paksus H FWD mõõtmiste teostamise kohas).

Teoreetiliselt peaks ajas katendi üldine elastsusmoodul vähenema, kuna katendi sidumata kihtides (eriti fraktsioneeritud killustikust aluse kihis) mineraalosakeste vaheline mehhaaniline nake liikluskoormuse mõjul väheneb (ja koos sellega ka elastsusmoodul). Nimetatud seose leidmiseks valiti neli kontrollpunkti, kus FWD mõõtmisi on teostatud perioodil 1999-2013 ning nende mõõtmistulemuste abil arvutati katendi iga-aastaste keskmiste üldiste elastsusmoodulite väärtused. Saadud

tulemustest me ei saa järeldada, et eksisteeriks mingi seos üldise elastsusmooduli ajas vähenemise hindamiseks (joonised 2.3 ja 2.4, tabel 2.6).

Kuu teguri  $M_i$  muutuse mõju seosega 2.6 arvatava elastsusmooduli väärtusele on lineaarne. Kõigil juhtudel (ETM, ETMH, ETMK, ETMHK, ETM<sub>2003</sub>) põhjustab kuu teguri 0,01 suurune muutus arvatud elastsusmoodulite 1 % väärtuse erinevuse. Kuu teguri  $M_i$  väärtuse mõju on arvatavale elastsusmooduli väärtusele suure osakaaluga (+10 kuni -19 %), mistõttu tuleks elastsusmoodulit arvutades alati arvesse võtta õige FWD mõõtmiste teostamise kuu tegur  $M_i$ .

Temperatuuri T väärtuse mõju seosega 2.6 arvatavale katendi üldise elastsusmooduli väärtusele on vastavalt arvutamiseks kasutatavatele empiirilistele konstantidele (ETM, ETMH, ETMK, ETMHK, ETM<sub>2003</sub>) erinev. Kõige rohkem on mõjutatud ETM<sub>2003</sub>, kus asfaltkatte keskmise temperatuuri tõusul +5 °C-lt +30 °C-le 19,2 %-line arvatud elastsusmooduli väärtuse muutus. Sellest lähtuvalt saame järeldada, et asfaltkatte keskmise temperatuuri T korrektne väärtus teostatud mõõtmistel võib oluliselt mõjutada ka seosega 2.6 arvatava elastsusmooduli väärtust ning korrektse asfaltkatte keskmise temperatuuri määramine FWD mõõtmiste teostamise ajal on oluline.

Töös võrreldi nelja dünaamilist koormusseadet (Dynatest, KUAB, Primax, Greenwood TSD), mida kasutatakse meie lähiriikides ning mis sobiksid kasutamiseks ka Eestis. Eesti tingimustesse kõige sobivamaks kandevõime mõõtmise seadmeks kujunes praegu kasutuses oleva Dynatest-seadme kõrval KUAB. Viimase eelisteks on tekitatava koormusimpulsi suurem sarnanemine liikuva sõiduki poolt katendile tekitatud mõjule ning deformatsiooniandurid, mis võimaldavad mõõta suuremat amplituudi. Suuremate mõõtemahtude puhul tuleks kaaluda pidevmeetodil mõõteseadme (näiteks Greenwood TSD) kasutamist. Soomlaste andmeil annab Greenwood TSD seade võrreldes KUAB-iga natuke väiksemaid (erinevatel mõõtmislõikudel 0,9-22,0 %) deformatsioonide mõõtmistulemusi. Samuti on võrreldes KUAB-iga väiksemad mõõtmistulemused (5-10 %) ka meil kasutataval Dynatest seadmel. Seega võime eeldada, et Greenwood TSD seadme mõõtmistulemused langevad Dynatest seadme mõõtmistulemustega suhteliselt hästi kokku.

Soetushinna poolest on tegemist tunduvalt kulukama seadmega, kuid suurte mõõtmismahtude puhul võib osutada mõistlikuks teenuse sisse ostmine. Probleem on seni olnud selles, et Maanteeameti hanke tingimused välistavad selle seadmega töö tegemise, seda nii nõutud seadme tehniliste tingimuste, mõõtmiste teostamise aja kui ka mõõtmismahtude tõttu.

Lähiriikide kandevõime mõõtmiste praktika analüüsis osalesid Läti, Leedu, Taani ning Soome. Selgus, et kõigis neljas riigis kasutatakse kandevõime mõõtmiseks erinevaid FWD seadmeid, kuid sealjuures nii Leedus, Soomes kui ka Taanis on pikemat aega kasutusel olnud sisse ostetud teenusena TSD seade, mis on ennast igati tõestanud. Kõikides ülaltoodud riikides teostatakse mõõtmisi projekti tasandil (Taanis on küll see praktika alles juurutamisel). Samuti tehakse nii Lätis, Taanis kui ka Soomes kandevõime mõõtmisi teedevõrgu tasandil. Lätis FWD mõõtmiste teostamise aega arvesse ei võeta. Leedus seevastu taandatakse FWD mõõtmistulemused temperatuurile 20 °C. Soomes on FWD seadmete mõõtmistulemuste analüüsimisel kasutusel RoadScanners Oy poolt välja töötatud Road Doctor tarkvara, milles on arvestatud bituumensideainega seotud katte kihtide temperatuur ja paksus. Soomes teostatakse enamuse kandevõime mõõtmistest sügisel septembris-oktoobris, mis peaks tagama mõõtmistulemuste võrreldavuse. Taani, kes praktiliselt FWD mõõtmisi projekti tasandil täna ei teosta, ei võta arvesse ka siis otseselt mõõtmiste teostamise aega. TSD-ga teostatakse projektitasandi mõõtmisi Leedus umbes 100-200 km/aastas ja võrgutasandi mõõtmisi Soomes ca 1000-2000 km/aastas ning Taanis ca 1900-2000 km/aastas.

Konkreetsed soovitusel edasiseks:

- Iga-aastaste mõõtmismahtude osas vältida suuri muutusi, olemasolevate andmete olem ja mõõtmisvajadused on üsna täpselt teada ja see võimaldab mõõtmisplaanide ja -vajaduste osas pikaajalisi plaane teha;
- FWD mõõtmisperioodi algus mitte enne juunit, kuna kevadisel perioodil on teekonstruktsiooni olukord väga kiiresti muutuv ja antud töös kasutatud andmestik (kontrollpunktid) ei kajasta viimastel aastatel toimunud kliimamuutusi, mistõttu uurimistöös toodud aprilli/mai päevakoeffitsiendid ei vasta tingimata tegelikele oludele;
- Teedevõrgu tasandil võib FWD mõõtmisandmete töötlemisel jätkata ETM<sub>2003</sub> seose empiiriliste konstantide kasutamist, samas on soovitatav alustada üleminekut selgelt paremate determinatsioonikordajatega seoste ETMHK (arvestab lisaks katendi seotud kihtide ja asfaltkatte paksuseid) või ETMK (arvestab lisaks asfaltkatte paksust) kasutamiseks;
- Projekteerimisobjektide ja uute katete objektide FWD mõõtmistulemuste töötlemisel on selge soovitus kasutada kas ETMHK või ETMK seoseid. Antud seoste jaoks vajalikke andmeid tegelike kihtide paksuste kohta (eriti projekteerimisobjektide puhul) on soovituslik mõõta GPR-seadmega. Sarnast

mõõtmispraktikat (katte kihi paksuse mõõtmist GPR-seadmega FWD mõõtmistulemuste analüüsiks) kasutab alates 2020 aastast Tallinna linn oma teede ja tänavate seisukorra analüüsimisel;

- FWD mõõtmiste hangete korraldamisel tuleks muuta hangete tehnilisi tingimusi selliselt, et oleks võimalik pakkuda mõõtmiste teostamist ka pidevmeetodiga mõõtmisseadmetega;
- Tulenevalt eelnevast soovitusel tuleks üle vaadata üldised teekonstruktsiooni kandevõime mõõtmispõhimõtted ja kaaluda võimalust alustada pidevmeetodiga mõõtmisseadme kasutamist esimeses lähenemist pilootprojektiga. Rahvusvaheliste kogemuste põhjal on see seade ennast õigustanud ja võimaldab teha mõõtmised lühikesel perioodil kiiresti ning suures mahus. Näiteks ühel aastal teha piisavalt suures mahus pidevmeetodiga seadmega teedevõrgu taseme mõõtmised ja järgneva(te)l aasta(te)l teha kontrollmõõtmised võimalikel leitud probleemsetel teelõikudel FWD seadmega;
- Teeregistrisse tuleb sisestada kõik erinevatel objektidel teostatud FWD mõõtmistulemused.

## SUMMARY

This diploma study showed that the value of  $ETM_{2003}$  determination coefficient  $R^2$  found by Aavik in 2003 was lower compared to ETMH, ETMK and ETMHK (Table 2.4). For ETM, the determination coefficient was 0,498 and 0,574 for  $ETM_{2003}$ . However, this result was expected as a significantly higher amount of measurement data was included in the calculations. Figure 2.2 shows that the values of the elasticity modulus ( $ETM_{2003}$ ) calculated in 2003 are virtually the same correlation with KAP values as the ETM relationship found in this analysis (determination coefficients  $R^2$  0,654 and 0,652 respectively). Therefore, at road network level, we can continue to calculate the overall modulus of elasticity of the pavement with empirical constants ( $ETM_{2003}$  column in table 2.4) based on the FWD measurement data used so far to ensure comparability of existing modulus of elasticity values with new measurements.

The study has found that it is recommended to use ETMHK empirical constants when processing FWD measurement data at project level (empirical constants in table 2.4 in the ETMHK column) (FWD measurements E, average asphalt coating temperature T, month of measurements M, thickness of bound layers at FWD measuring site H and pavement thickness at FWD measuring site K). In this case, the value of the correlation coefficient  $R^2$  of the relationship was the highest (0,819). The overlap between the elasticity module value of this method and the value obtained by the coating calculation program was also high (figure 2.2,  $R^2=0,796$ ), proving the accuracy of the method. However, the slightly weaker coefficient of determination (0,788, figure 2.2) is given by the relationship ETMK vs  $E_{KAP}$ , i.e. a relationship with empirical constants that takes into account the thickness of the asphalt layers of the coating (empirical constants in the ETMK column in table 2.4). The analysis found that to calculate the overall modulus of elasticity of the pavement at project level, it is recommended to use the empirical constants from either the ETMK or ETMHK column in table 2.4 on FWD measurements, depending on what data we have available for the existing pavement (either only the asphalt thickness K or in addition, the total thickness of the bound layers H at the place of FWD measurements).

In theory, the overall elasticity module of the pavement should decrease over time, as the mechanical adhesion between mineral particles in the unbound layers of the pavement (especially in the fractionated gravel base layer) decreases under traffic load (and with it the elasticity module). To find this relationship, four control points were selected, where FWD measurements were performed in the period 1999-2013 and the values of the annual average general modulus of elasticity of the pavement were calculated from these measurement results. From the results obtained, we cannot

conclude that there is any correlation to the assessment of the reduction of the overall elasticity module over time (figures 2.3 and 2.4, table 2.6).

The effect of the change in the monthly factor  $M_i$  on the value of the elasticity module calculated with the relationship 2.6 is linear. In all cases (ETM, ETMH, ETMK, ETMHK, ETM<sub>2003</sub>), a change of 0,01 of the monthly factor causes a 1 % difference in the value of the calculated elasticity modules. The effect of the value of the monthly factor  $M_i$  has a big impact for the value of the elasticity module (+10 to -19 %), therefore the monthly factor  $M_i$  should always be taken into account when calculating the modulus of elasticity.

The effect of the temperature  $T$  value on the overall elasticity module value of the pavement in relation to 2.6 is different according to the empirical constants used for the calculation (ETM, ETMH, ETMK, ETMHK, ETM<sub>2003</sub>). ETM<sub>2003</sub> is the most affected, with an increase in the average temperature of the asphalt pavement from +5 °C to +30 °C a 19,2 % change in the calculated elasticity module value. Based on this, we can conclude that the correct value of the average temperature of the asphalt pavement  $T$  in the performed measurements can significantly affect the value of the modulus of elasticity calculated with relation 2.6, and determining the correct average temperature of the asphalt pavement during FWD measurements is important.

The work compared four dynamic load devices (Dynatest, KUAB, Primax, Greenwood TSD) which are used in our nearby countries and which would be suitable for use in Estonia as well. The most suitable load-bearing device for Estonian conditions was KUAB, next to the Dynatest device currently in use. The advantages of the KUAB are that the load pulse generated is more similar to the effect caused by a moving vehicle on the pavement, and deformation sensors that make it possible to measure a larger amplitude. For larger measuring volumes, the use of a continuous measuring device (e.g. Greenwood TSD) should be considered. According to the Finns, the Greenwood TSD device gives slightly smaller (0.9-22.0% in different measurement sections) deformation measurement results compared to KUAB. Compared to KUAB, the Dynatest device we also use, has smaller measurement results (5-10%). Thus, we can assume that the measurement results of the Greenwood TSD device coincide relatively well with the measurement results of the Dynatest device.

In terms of the acquisition price, it is a much more expensive device, but for large measurements it may be reasonable to purchase the service. The problem so far has been that the procurement conditions of the Road Administration exclude the work with this device, due to the required technical conditions of the device and the time of performing measurements and the measurement volumes.

Latvia, Lithuania, Denmark and Finland participated in of the load-bearing capacity measurement practices in nearby countries. It turned out that different FWD devices are used to measure payload in all four countries, but in Lithuania, Finland and Denmark, a TSD device has long been used as a purchased service, which has proven itself in every way. In all of the above countries, measurements are carried out at project level (although in Denmark this practice is still in development). Load capacity measurements at the road network level are also carried out at road level in Latvia, Denmark and Finland. In Latvia, the time of FWD measurements are not been taken into account. In Lithuania FWD measurements are reduced to 20 °C. In Finland, Road Doctor software developed by RoadScanners Oy takes into account the temperature and thickness of the coating layers related to bituminous binders and analyzes the results of measurements of FWD devices. In Finland, most load capacity measurements are carried out in the autumn in September-October, which should ensure comparability of measurement results. Denmark, which practically does not carry out FWD measurements at project level today, does not take into account the time when the measurements are carried out. The project level measurements performed with TSD in Lithuania are about 100-200 km / year and the network level measurements in Finland are about 1000-2000 km / year and in Denmark about 1900-2000 km / year.

Specific recommendations for the future:

- In terms of annual measurement volumes, avoid major changes, the entity of the available data and the measurement needs are quite accurately known and this allows long-term plans to be made for measurement plans and needs;
- The start of the FWD measurement period should not be earlier than June, as the road construction situation changes very rapidly in the spring and the data used in this work (checkpoints) do not reflect climate change in recent years, so the April/May daily coefficients in the research do not necessarily correspond to the actual circumstances;
- At the network level, the empirical constants of the  $ETM_{2003}$  relationship may continue to be used for the processing of FWD measurement data, while it is recommended to start the use of ETMHK (taking into account pavement thicknesses and asphalt pavement thicknesses) or ETMK (taking into account asphalt pavement thickness) relationships with clearly better coefficients of determination;



- When processing FWD measurement results for design objects and new pavement objects, there is a clear recommendation to use either ETMHK or ETMK relationships. It is recommended to measure the data on the actual layer thicknesses required for these relations (especially in the case of design objects) with the GPR device. A similar measurement practice (measuring the thickness of the pavement layer with a GPR device for the analysis of FWD measurement results) has been used by the City of Tallinn since 2020 to analyze the condition of its roads and streets;
- Whereas the technical conditions for procurement of FWD measurements should be amended in such a way that measurements can also be offered by continuous measurement equipment;
- In the light of the previous recommendation, the general principles for measuring the load-bearing capacity of the road structures should be reviewed and consideration should be given to the possibility of starting the use of a continuous measurement device in the first approach to the pilot project. Based on international experience, this device has justified itself and allows measurements to be made quickly and on a large scale in the short term. For example, in one year, take measurements on the road network level with a sufficiently large continuous method device and, in the following year(s), carry out control measurements on any problematic road sections found with the FWD device;
- All FWD measurements performed on different objects must be entered in the road register.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] T. Kaal, A. Aavik, S. Sillamäe, J. Viljas ja L. Kaal, „Teekonstruksiooni kandevõime mõõtmis- ja arvutusmetoodika täiendamise uuring,“ [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 01 02 2021].
- [2] A. Aavik, *Methodical Basis for the Evaluation of Pavement Structural Strength in Estonian Pavement Management System (EPMS)*, Tallinn, 2003.
- [3] Dynatest International A/S, 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dynatest.com/fast-falling-weight-deflectometer>. [Kasutatud 26 09 2020].
- [4] Tallinna Tehnikaülikool, „Madalaklassiliste (kruusateede) remondi/uuendamise metoodika laiendamine kattega teedele,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/kergkatete\\_uuringu\\_aruanne.pdf](https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/kergkatete_uuringu_aruanne.pdf). [Kasutatud 05 10 2020].
- [5] B. Ö. Sveinsdóttir, „Pavement Behavior Evaluation during Spring Thaw based on the Falling Weight Deflectometer Method,“ 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:453256/FULLTEXT01.pdf>. [Kasutatud september 2020].
- [6] INOPAWE GROUP PTE LTD, „INOPAWE GROUP,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.innopave.com/en/pavement\\_fwd.asp](http://www.innopave.com/en/pavement_fwd.asp). [Kasutatud 26 september 2020].
- [7] Slovak Road Administration, „Slovenská správa ciest,“ 14 09 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cdb.sk/en/road-databank/data-collection/kuab-fwd-50.alej>. [Kasutatud 26 09 2020].
- [8] O. T. Bengt ja I. H. Hans, „Apparatus for bearing capacity measurement with a falling weight deflectometer“. Ameerika Ühendriigid Patent US4116041A, 18 08 1976.

- [9] D. J. White, „KUAB Model 150 2m Falling Weight Deflectometer,” 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ceer.iastate.edu/kuab-falling-weight-deflectometer/>. [Kasutatud 27 09 2020].
- [10] West Coast Road Masters Oy (Road Masters), „Pudotuspainolaite KUAB FWD 50,” 24 juuni 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cdb.sk/en/road-databank/data-collection/kuab-fwd-50.alej>. [Kasutatud 30 september 2020].
- [11] Engineering & Research International, Inc, „Engineering & Research International, Inc,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.erikuab.com/kuab-fwd-sales/>. [Kasutatud 26 09 2020].
- [12] Schiller Cla Ltda., „Falling Weight Deflectometers,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://schiller.com.ec/pdf/asfalto/>. [Kasutatud 20 10 2020].
- [13] Greenwood Engineering A/S, „Greenwood Engineering,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://greenwood.dk/road/tsd/>. [Kasutatud 20 10 2020].
- [14] Dynatest International A/S, „DYNATEST FWD/HWD - OWNER’S MANUAL Version 2.6.26,” 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.scribd.com/doc/316017091/Manual-deflectometro-dynatest>. [Kasutatud 26 09 2020].
- [15] A. Motiejūnas, M. Paliukaitė, A. Vaitkus, D. Čygas ja A. Laurinavičius, *SEARCH ON THE DEPENDENCE OF ASPHALT PAVEMENT STIFFNESS UPON THE TEMPERATURE OF PAVEMENT LAYERS*, Vilnius: THE BALTIC JOURNAL OF ROAD AND BRIDGE ENGINEERING, 2010, pp. 50-54.

# LISAD

## LISA 1 Kontrollpunktide geoloogia

KP nr	Niiskuspaikkond	h, cm	Materjal
1	II	6	Asfaltbetoon
		134	Killustik ja peasõelmed
		20	Turvas
		30	Saviliiv
2	I	14	Asfaltbetoon
		26	Killustik ja peasõelmed
		40	Saviliivmoreen
3	II	3,5	Asfaltbetoon
		16	Bituumen stabiliseeritud kiht
		50	Kruus
		40	Peenliiv
		50	Saviliiv
4	I	14,5	Asfaltbetoon
		31	Killustik ja peasõelmed
		95	Peenliiv
		20	Muld
		5	Saviliiv (rähkpinnas)
5	I	5	Asfaltbetoon
		11	Bituumen stabiliseeritud kiht
		8	Killustik
		26	Keskliiv (pr. 5)
		45	Kruusliiv
		10	Muld
6	II	45	Peenliiv
		3	Asfaltbetoon
		19	Bituumen stabiliseeritud kiht
		33	Kruusliiv (pr. 4)
		10	Peenliiv
		5	Muld
7	I	30	Peenliiv
		5	Asfaltbetoon
		10	Bituumen stabiliseeritud kiht
		15	Killustik
		25	Kruusliiv (pr. 3)
		90	Peenliiv
		5	Muld
8	II	50	Peenliiv
		3	Asfaltbetoon
		16	Bituumen stabiliseeritud kiht
		17	Killustik jäme
		34	Kruusliiv (pr. 1)
		20	Muld
		45	Peenliiv
10	Saviliiv (rähkpinnas)		

KP nr	Niiskuspaikkond	h, cm	Materjal
8a	II	3	Asfaltbetoon
		16	Bituumen stabiliseeritud kiht
		17	Killustik jäme
		34	Kruusliiv (pr. 1)
		20	Muld
		45	Peenliiv
		10	Saviliiv (rähkpinnas)
9	I	4,5	Asfaltbetoon
		19	Bituumen stabiliseeritud kiht
		116	Kruusliiv, mullane, peakivilahm
		15	Muld
		25	Saviliivmoreen
10	?	9	Mustkate
		41	Paesõelmed lubjakivikillustikuga
		95	Muld
		25	Tolmune saviliiv
11	I	13	Mustkate
		52	Paesõelmed segus lubjakivikillustikuga
		35	Muld, tihe, savine
		45	Peenliiva ja turbamulla segu
		40	Peenliiv vähese kruusa lisandiga
12	I	3	Asfaltbetoon
		8	Stabiliseeritud kiht, kõva
		14	Kruus
		45	Peenliiv
		20	Rähkpinnas kerge saviliiva täitega
13	II	3	Asfaltbetoon
		6	Stabiliseeritud kiht, pude
		31	Kruusliiv
14	I	4	Asfaltbetoon
		5	Stabiliseeritud kiht, pude
		8	Kruusa ja purustatud mustkatte segu
		18	Kruus
		45	Peenliiv
		20	Mullasegune liiv
15	I	3	Asfaltbetoon
		7	Stabiliseeritud kiht, pude
		30	Kruus
		30	Kruusliiv
		50	Saviliiv
		40	Peenliiv (looduslik)
16	I	4	Asfaltbetoon
		7	Stabiliseeritud kiht, pude
		34	Tolmune kruus
		45	Peenliiv
		40	Saviliivmoreen
17	II	13	Asfaltbetoon
		42	Tolmune kruus
		105	Peenliiv
		30	Saviliivmoreen

KP nr	Niiskuspaikkond	h, cm	Materjal
18	II	4	Asfaltbetoon
		6	Stabiliseeritud kiht, pude
		40	Tolmune kruus (pr. 7)
		250	Kruusliiv, mullasegune
		40	Turvas
		20	Saviliivmoreen
19	I	2	Asfaltbetoon
		8	Stabiliseeritud kiht, pude
		25	Kruus
		20	Tolmune kruus
		65	Tolmliiv (pr. 6)
		40	Saviliivmoreen
20	II	16	Asfaltbetoon
		8	Killustik 20-40 mm
		46	Kruusliiv (pr. 7)
		80	Kruusa ja liiva vahelduvad kihid
21	I	20	Asfaltbetoon
		80	Kruusliiv (pr. 6)
		45	Kruus
		25	Tolmliiv (pr. 6)
22	II	15	Asfaltbetoon
		7	Killustik 20-40 mm
		78	Kruusliiv (pr. 5)
		30	Rähkpinnas (saviliiv)
23	I	16	Asfaltbetoon
		4	Killustik 20-40 mm
		3	Paesõelmed
		117	Peenliiv (pr. 4)
		20	Mullasegune liiv
		30	Tolmliiv (pr. 6)
24	I	16	Asfaltbetoon (pr. 1)
		6	Killustik 20-40 mm
		18	Kruusliiv (pr. 2)
		70	Jäme kruus, munakad
		30	Keskliiv (pr. 3)
		40	Tolmne saviliivmoreen
25	I	21	Asfaltbetoon
		19	Killustik 20-40 mm
		20	Kruus
		10	Mullasegune liiv
		30	Keskliiv
26	II	3	Asfaltbetoon
		26	Bituumen stabiliseeritud kiht
		11	Peenliiv
		10	Kruus, savine
		30	Muld
		45	Rähkpinnas
27	II	4	Asfaltbetoon
		31	Bituumen stabiliseeritud kiht
		45	Kruusliiv
		80	Peenliiv

KP nr	Niiskuspaikkond	h, cm	Materjal
28	I	8	Mustkate
		87	Paesõelmed lubjakivikillustikuga (tehiskruus)
		20	Muld, kivine
		35	Peenliiva ja turbamulla segu
		65	Peenliiv
29	I	6	Mustkate
		8	Stabiliseeritud kiht
		41	Paesõelmed
		15	Muld, kivine
		20	Saviliivmoreen, rähkne
30	I	6	Mustkate
		10	Stabiliseeritud kiht
		14	Paesõelmed
		60	Kruus
31	I	17	Mustkate
		288	Paesõelmed
		50	Turvas
		20	Liivsavi, voolav
32	?	5	Asfaltbetoon
		13	Bituumen stabiliseeritud kiht
		14	Väga suure bituumensisaldusega kiht, pehme
		13	Kruus, savikas kruus
		85	Kruusliiv, munakad
		10	Muld
		30	Tolmliiv (pr. 6)
33	?	5	Asfaltbetoon
		22	Bituumen stabiliseeritud kiht
		43	Kruus, munakad
		70	Kruus munakate ja rahnudega
34	?	5	Asfaltbetoon
		20	Stabiliseeritud kiht
		57	Kruus, munakad / Savikas kruus
		18	Vana kate
		30	Kruusane tolmlüiv, mullasegune
		30	Tolmlüiv / möllikas peenliiv
		25	Kruusane tolmlüiv / Kruusaga mölline peenliiv
		35	Muld
		30	Peenliiv
35	I	17	Asfaltbetoon
		6	Stabiliseeritud kiht
		72	Kruusliiv / Rohke kruusaga möllikas liiv
		95	Kruusliiv, munakad / Rohke kruusaga liiv
		10	Turbamuld
		30	Tolmne kruusane saviliiv, plastne
36	I	10	Asfaltbetoon
		7	Stabiliseeritud kiht
		83	Jämelüiv (kruusa 16%)
		50	Kruusane saviliiv
		30	Turvas, tihe
		100	Kruusane peenliiv / kruusaga savikas peenliiv



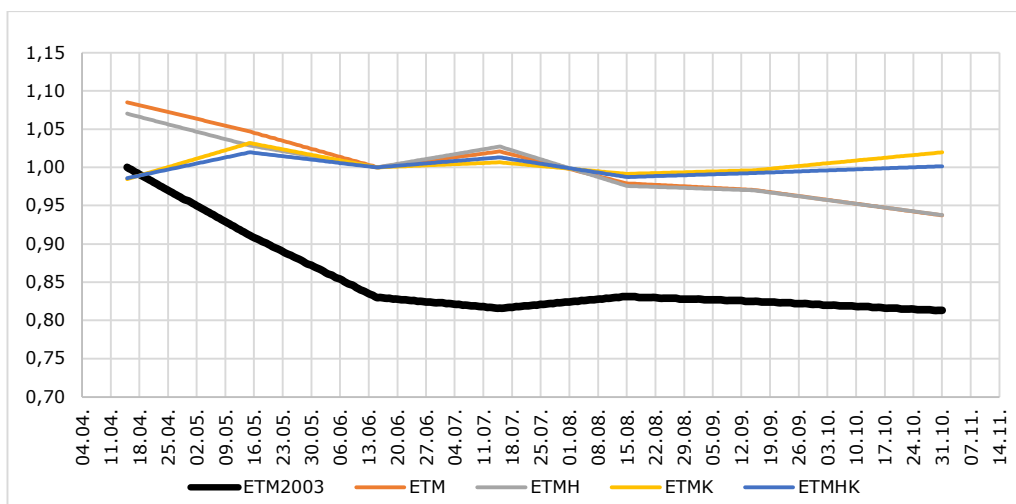
KP nr	Niiskuspaikkond	h, cm	Materjal
37	I	9	Asfaltbetoon
		11	Stabiliseeritud kiht
		125	Kruusliiv / savine liiv kruusaga
		60	Turvas, tihe
		25	Tolmne kruusane saviliiv
38	I	13	Asfaltbetoon
		11	Stabiliseeritud kiht
		66	Kruusliivast mulle / rohke kruusaga savikas liiv
		80	Tolmne kruusane saviliiv
39b	I	8	Mustkate
		12	Lubjakivikillustik bituumeniga
		35	Kruus, munakad
		100	Tolmne kruussaviliiv / Rohke liivaga mölline jämekruus
		10	Muld
		15	Tolmliiv, kihilise struktuuriga / rohke liivaga savimöll
40	?	8	Mustkate, pude
		14	Lubjakivikillustik bituumeniga
		188	Kruusliiv munakatega
		20	Muld
		45	Kruusane tolme saviliiv (moreen)
41	?	5	Mitmekordne pindamine
		40	Paesõelmed lubjakivikillustikuga (tehiskruus)
		35	Muld
		120	Tolmne kruussaviliiv (moreen), tihe, kõva
42	?	4	Mitmekordne pindamine
		46	Paesõelmed lubjakivikillustikuga (tehiskruus)
		35	Muld
		115	Tolmne kerge liivsave (moreen, tihe, kõva)
43	?	8	Asfaltbetoon (kaks kihti 3+5 cm)
		22	Stabiliseeritud kiht, pude
		50	Kruusliiv, suure tolmuühaldusega
		40	Rähasegune muld, tihe / rohke kruusaga savine liiv
		90	Kruusane tolmsaviliiv, roostevärvi, tihe, kuiv
44	I	9	Asfaltbetoon (kaks kihti 4+5 cm)
		21	Stabiliseeritud kiht
		45	Kruusliiv, suure tolmuühaldusega
		30	Keskliiv, kruusane / kruusaga mölline liiv
		75	Kruusliiv, suure tolmuühaldusega
		30	Turbamuld, keskmise tihedusega
45	I	40	Tolmne saviliiv
		13	Asfaltbetoon
		11	Stabiliseeritud kiht
		46	Kruus munakate ja veeristega
		130	Paesõelmed, osaliselt nõrgalt tsementeerunud
		25	Turvas
40	Tolmne kruusane saviliiv (moreen)		

KP nr	Niiskuspaikkond	h, cm	Materjal
46	?	9	Asfaltbetoon
		31	Stabiliseeritud kiht
		40	Kruusliiv / rohke kruusaga savine liiv
		20	Kruusane ja savine muld
		70	Jäme purdpinna saviliiva täitega (moreen)
47	?	12	Mustkate
		68	Kruusliiv / rohke kruusaga savine liiv
		40	Kruusane tolme saviliiv / kruusaga mölline keskliiv
		30	Muld
		40	Tolme kerge liivsavi / rohke liivaga möllsavi
48	?	15	Mustkate
		30	Kruusliiv / rohke kruusaga mölline liiv
		30	Kruusliiv / rohke kruusaga savine liiv
		40	Kruusliiv vähesese mulla lisandiga
		30	Muld
49	?	50	Jäme purdpinna saviliiva täitega (moreen)
		4	Asfaltbetoon
		16	Bituumen stabiliseeritud kiht
		50	Paesõelmed segus lubjakivikillustikuga (tehiskruus)
		30	Lubjakiviplaadid segus paesõelmete ja mullaga
50	?	40	Turbamuld, hästi lagunenu
		50	Peenliiv
		4	Asfaltbetoon
		7	Stabiliseeritud kiht
		9	Stabiliseeritud kiht (freesitud vana kate)
		80	Paesõelmed segus lubjakivikillustikuga (tehiskruus)
		20	Lubjakiviplaadid ja -lahmakad paesõelmetega
20	Muld		
121-129	I	90	Peenliiv
		16	Asfaltbetoon
		18	Lubjakivikillustik, valdavalt tolmune
		66	grSa, pruun
		185	A - grsiSa, hall, paiguti org ~2%; (vana mulle, tolme kruusliiv)
131-139	I	55	siSa, hall
		16	Asfaltbetoon
		17	Lubjakivikillustik, valdavalt tolmune
		137	grSa, pruun
171-179	I	190	A - grsiSa, hall, paiguti org ~2%; (vana mulle, tolme kruusliiv)
		17	Asfaltbetoon
		13	Lubjakivikillustik, valdavalt tolmune
		65	saGr, pruun
		30	Muld, kruusaga
191-199	I	145	D - grsiSa, beež
		20	Asfaltbetoon
		16	Lubjakivikillustik, valdavalt tolmune
		149	saGr, pruun
		25	Muld, kruusaga
		30	saGr, pruun

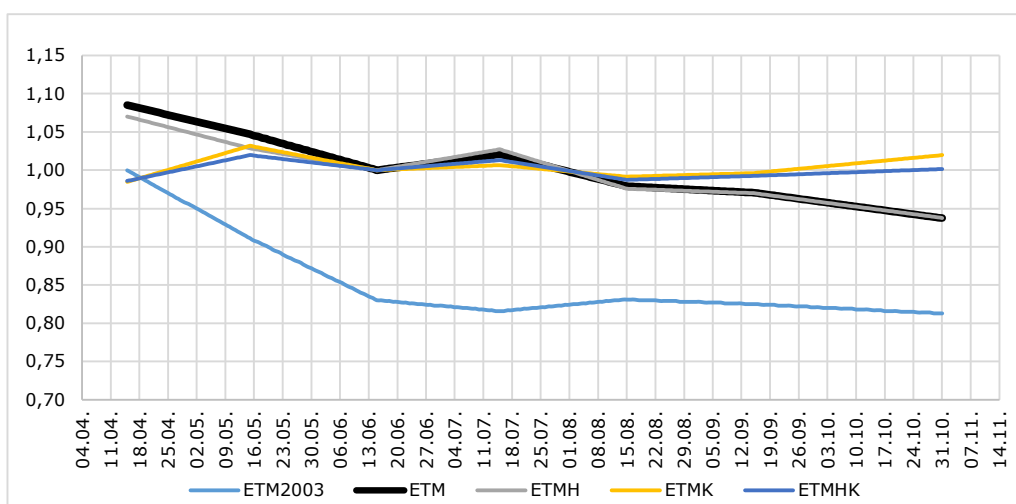
KP nr	Niiskuspaikkond	h, cm	Materjal
1001-1009	I	12	Asfalt
		18	Peakillustik
		40	Kruus
		30	Mullasegune peenliiv
		160	Peenliiv
		40	Kruus
2001-2009	I	20	Asfalt
		50	Savikas kruus
		20	Raske saviliiv, kõva
		190	Raske saviliivmoreen, kõva
3001-3009	I	10	Asfalt
		60	Kruus
		60	Kerge saviliiv, kõva
		30	Muld, tihenenud
		20	Peenkruus
		30	Kesk- ja peenliiv
5001-5009	I	6	Asfalt
		14	Killustik, liiv
		50	Kesk- ja jämeliiv, pruunikaskollane, keskmiselt tihenenud
		95	Peen- ja keskliiv, kollakaspruun, tihe, üksikute tardkivitükkidega
		85	Liivsavi, sinakashall, sitkeplastne, sügavusel 1,65-1,75m orgaanikaga

## LISA 2 Meetodile vastavad päevased tegurid

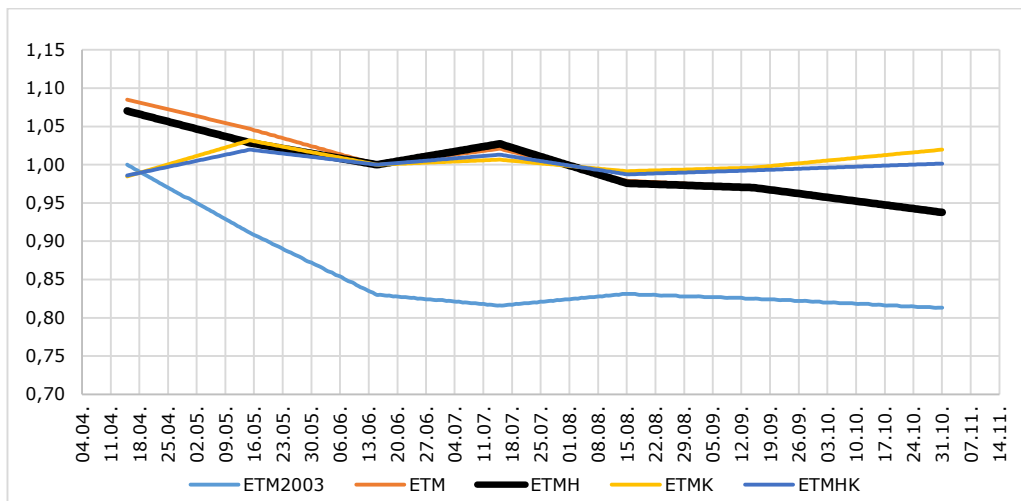
ETM2003 päevased tegurid													
M4 - Aprill		M5 - Mai		M6 - Juuni		M7 - Juuli		M8 - August		M9 - September		M10 - Oktoober	
kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur
1		1	0,953	1	0,867	1	0,823	1	0,824	1	0,828	1	0,821
2		2	0,950	2	0,864	2	0,822	2	0,825	2	0,828	2	0,820
3		3	0,947	3	0,861	3	0,822	3	0,825	3	0,827	3	0,820
4		4	0,944	4	0,859	4	0,821	4	0,826	4	0,827	4	0,820
5		5	0,941	5	0,856	5	0,821	5	0,826	5	0,827	5	0,820
6		6	0,938	6	0,854	6	0,820	6	0,827	6	0,827	6	0,819
7		7	0,935	7	0,851	7	0,820	7	0,827	7	0,827	7	0,819
8		8	0,932	8	0,848	8	0,819	8	0,828	8	0,826	8	0,819
9		9	0,929	9	0,846	9	0,819	9	0,828	9	0,826	9	0,819
10		10	0,926	10	0,843	10	0,818	10	0,829	10	0,826	10	0,818
11		11	0,923	11	0,840	11	0,818	11	0,829	11	0,826	11	0,818
12		12	0,920	12	0,838	12	0,817	12	0,830	12	0,826	12	0,818
13		13	0,917	13	0,835	13	0,817	13	0,830	13	0,825	13	0,818
14		14	0,914	14	0,833	14	0,816	14	0,831	14	0,825	14	0,817
15	<b>1</b>	15	<b>0,911</b>	15	<b>0,83</b>	15	<b>0,816</b>	15	<b>0,831</b>	15	<b>0,825</b>	15	<b>0,817</b>
16	0,997	16	0,908	16	0,830	16	0,816	16	0,831	16	0,825	16	0,817
17	0,994	17	0,906	17	0,829	17	0,817	17	0,831	17	0,824	17	0,816
18	0,991	18	0,903	18	0,829	18	0,817	18	0,830	18	0,824	18	0,816
19	0,988	19	0,901	19	0,828	19	0,818	19	0,830	19	0,824	19	0,816
20	0,985	20	0,898	20	0,828	20	0,818	20	0,830	20	0,824	20	0,816
21	0,982	21	0,895	21	0,827	21	0,819	21	0,830	21	0,823	21	0,815
22	0,979	22	0,893	22	0,827	22	0,819	22	0,830	22	0,823	22	0,815
23	0,976	23	0,890	23	0,826	23	0,820	23	0,829	23	0,823	23	0,815
24	0,973	24	0,887	24	0,826	24	0,820	24	0,829	24	0,823	24	0,815
25	0,970	25	0,885	25	0,825	25	0,821	25	0,829	25	0,822	25	0,814
26	0,967	26	0,882	26	0,825	26	0,821	26	0,829	26	0,822	26	0,814
27	0,964	27	0,880	27	0,824	27	0,822	27	0,829	27	0,822	27	0,814
28	0,961	28	0,877	28	0,824	28	0,822	28	0,828	28	0,822	28	0,814
29	0,958	29	0,874	29	0,823	29	0,823	29	0,828	29	0,821	29	0,813
30	0,956	30	0,872	30	0,823	30	0,823	30	0,828	30	0,821	30	0,813
		31	0,869			31	0,824	31	0,828			31	0,813



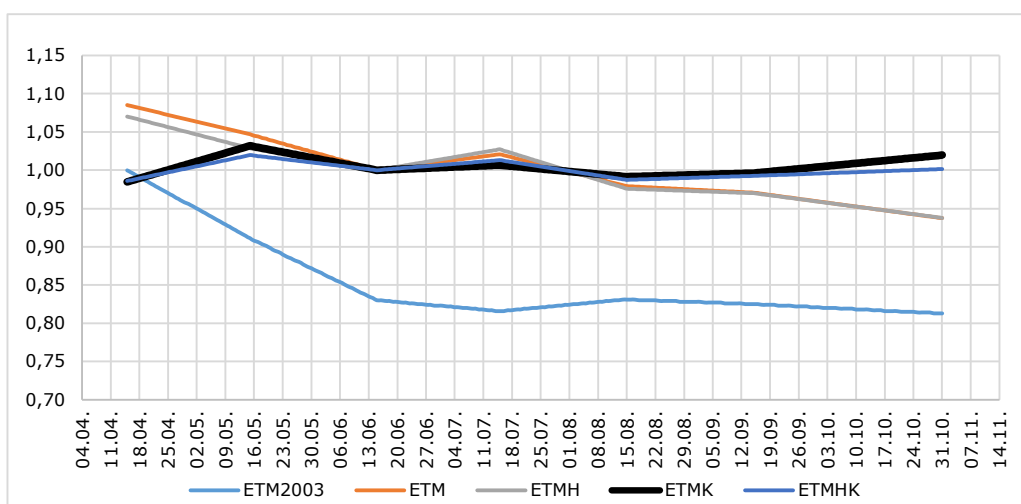
ETM päevased tegurid													
M4 - Aprill		M5 - Mai		M6 - Juuni		M7 - Juuli		M8 - August		M9 - September		M10 - Oktoober	
kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur
1		1	1,089	1	1,021	1	1,0111	1	0,9979	1	0,9744	1	0,9590
2		2	1,086	2	1,020	2	1,0118	2	0,9966	2	0,9742	2	0,9583
3		3	1,083	3	1,018	3	1,0125	3	0,9952	3	0,9739	3	0,9576
4		4	1,080	4	1,017	4	1,0132	4	0,9939	4	0,9736	4	0,9569
5		5	1,077	5	1,015	5	1,0139	5	0,9926	5	0,9733	5	0,9561
6		6	1,074	6	1,014	6	1,0146	6	0,9912	6	0,9731	6	0,9554
7		7	1,071	7	1,012	7	1,0153	7	0,9899	7	0,9728	7	0,9547
8		8	1,068	8	1,011	8	1,0159	8	0,9885	8	0,9725	8	0,9540
9		9	1,065	9	1,009	9	1,0166	9	0,9872	9	0,9722	9	0,9532
10		10	1,062	10	1,008	10	1,0173	10	0,9858	10	0,9720	10	0,9525
11		11	1,059	11	1,006	11	1,0180	11	0,9845	11	0,9717	11	0,9518
12		12	1,056	12	1,005	12	1,0187	12	0,9831	12	0,9714	12	0,9511
13		13	1,053	13	1,003	13	1,0194	13	0,9818	13	0,9711	13	0,9503
14		14	1,050	14	1,002	14	1,0201	14	0,9804	14	0,9709	14	0,9496
15	<b>1,085</b>	15	<b>1,047</b>	15	<b>1,000</b>	15	<b>1,0208</b>	15	<b>0,9791</b>	15	<b>0,9706</b>	15	<b>0,9489</b>
16	1,133	16	1,045	16	1,0007	16	1,0195	16	0,9788	16	0,9699	16	0,9482
17	1,130	17	1,044	17	1,0014	17	1,0181	17	0,9786	17	0,9692	17	0,9475
18	1,127	18	1,042	18	1,0021	18	1,0168	18	0,9783	18	0,9684	18	0,9467
19	1,124	19	1,041	19	1,0028	19	1,0154	19	0,9780	19	0,9677	19	0,9460
20	1,121	20	1,039	20	1,0035	20	1,0141	20	0,9777	20	0,9670	20	0,9453
21	1,118	21	1,038	21	1,0042	21	1,0127	21	0,9775	21	0,9663	21	0,9446
22	1,115	22	1,036	22	1,0049	22	1,0114	22	0,9772	22	0,9655	22	0,9438
23	1,112	23	1,035	23	1,0055	23	1,0100	23	0,9769	23	0,9648	23	0,9431
24	1,109	24	1,033	24	1,0062	24	1,0087	24	0,9766	24	0,9641	24	0,9424
25	1,106	25	1,032	25	1,0069	25	1,0073	25	0,9764	25	0,9634	25	0,9417
26	1,103	26	1,030	26	1,0076	26	1,0060	26	0,9761	26	0,9626	26	0,9409
27	1,100	27	1,029	27	1,0083	27	1,0047	27	0,9758	27	0,9619	27	0,9402
28	1,097	28	1,027	28	1,0090	28	1,0033	28	0,9755	28	0,9612	28	0,9395
29	1,094	29	1,026	29	1,0097	29	1,0020	29	0,9753	29	0,9605	29	0,9388
30	1,092	30	1,024	30	1,0104	30	1,0006	30	0,9750	30	0,9597	30	0,9381
		31	1,023			31	0,9993	31	0,9747			31	0,9373



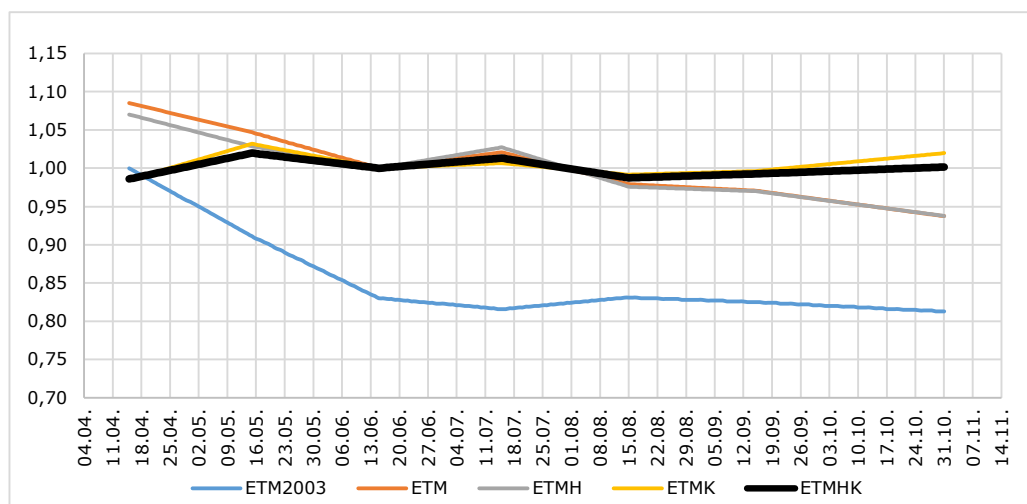
ETMH päevased tegurid													
M4 - Aprill		M5 - Mai		M6 - Juuni		M7 - Juuli		M8 - August		M9 - September		M10 - Oktoober	
kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur
1		1	1,0701	1	1,0129	1	1,0145	1	0,9990	1	0,9726	1	0,9587
2		2	1,0672	2	1,0120	2	1,0154	2	0,9974	2	0,9724	2	0,9580
3		3	1,0642	3	1,0111	3	1,0163	3	0,9957	3	0,9722	3	0,9573
4		4	1,0612	4	1,0101	4	1,0172	4	0,9940	4	0,9721	4	0,9566
5		5	1,0583	5	1,0092	5	1,0181	5	0,9924	5	0,9719	5	0,9559
6		6	1,0553	6	1,0083	6	1,0190	6	0,9907	6	0,9717	6	0,9552
7		7	1,0523	7	1,0074	7	1,0199	7	0,9891	7	0,9715	7	0,9545
8		8	1,0494	8	1,0065	8	1,0209	8	0,9874	8	0,9713	8	0,9538
9		9	1,0464	9	1,0055	9	1,0218	9	0,9857	9	0,9711	9	0,9531
10		10	1,0434	10	1,0046	10	1,0227	10	0,9841	10	0,9709	10	0,9524
11		11	1,0405	11	1,0037	11	1,0236	11	0,9824	11	0,9707	11	0,9517
12		12	1,0375	12	1,0028	12	1,0245	12	0,9808	12	0,9706	12	0,9510
13		13	1,0345	13	1,0018	13	1,0254	13	0,9791	13	0,9704	13	0,9503
14		14	1,0316	14	1,0009	14	1,0263	14	0,9775	14	0,9702	14	0,9496
15	<b>1,0702</b>	15	<b>1,0286</b>	15	<b>1,000</b>	15	<b>1,0272</b>	15	<b>0,9758</b>	15	<b>0,9700</b>	15	<b>0,9489</b>
16	1,1146	16	1,0277	16	1,0009	16	1,0255	16	0,9756	16	0,9693	16	0,9482
17	1,1117	17	1,0268	17	1,0018	17	1,0239	17	0,9754	17	0,9686	17	0,9475
18	1,1087	18	1,0258	18	1,0027	18	1,0222	18	0,9752	18	0,9679	18	0,9468
19	1,1057	19	1,0249	19	1,0036	19	1,0206	19	0,9751	19	0,9672	19	0,9461
20	1,1028	20	1,0240	20	1,0045	20	1,0189	20	0,9749	20	0,9665	20	0,9454
21	1,0998	21	1,0231	21	1,0054	21	1,0173	21	0,9747	21	0,9658	21	0,9447
22	1,0968	22	1,0221	22	1,0063	22	1,0156	22	0,9745	22	0,9651	22	0,9440
23	1,0939	23	1,0212	23	1,0073	23	1,0139	23	0,9743	23	0,9644	23	0,9433
24	1,0909	24	1,0203	24	1,0082	24	1,0123	24	0,9741	24	0,9637	24	0,9426
25	1,0879	25	1,0194	25	1,0091	25	1,0106	25	0,9739	25	0,9630	25	0,9419
26	1,0850	26	1,0185	26	1,0100	26	1,0090	26	0,9737	26	0,9623	26	0,9412
27	1,0820	27	1,0175	27	1,0109	27	1,0073	27	0,9736	27	0,9616	27	0,9405
28	1,0790	28	1,0166	28	1,0118	28	1,0056	28	0,9734	28	0,9609	28	0,9398
29	1,0761	29	1,0157	29	1,0127	29	1,0040	29	0,9732	29	0,9602	29	0,9391
30	1,0731	30	1,0148	30	1,0136	30	1,0023	30	0,9730	30	0,9594	30	0,9384
		31	1,0138			31	1,0007	31	0,9728			31	0,9376



ETMK päevased tegurid													
M4 - Aprill		M5 - Mai		M6 - Juuni		M7 - Juuli		M8 - August		M9 - September		M10 - Oktoober	
kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur
1		1	1,0733	1	1,0144	1	1,0035	1	0,9983	1	0,9941	1	1,0044
2		2	1,0704	2	1,0133	2	1,0037	2	0,9978	2	0,9942	2	1,0049
3		3	1,0674	3	1,0123	3	1,0040	3	0,9973	3	0,9944	3	1,0054
4		4	1,0644	4	1,0113	4	1,0042	4	0,9969	4	0,9945	4	1,0059
5		5	1,0615	5	1,0103	5	1,0044	5	0,9964	5	0,9947	5	1,0064
6		6	1,0585	6	1,0092	6	1,0046	6	0,9959	6	0,9948	6	1,0069
7		7	1,0555	7	1,0082	7	1,0048	7	0,9954	7	0,9950	7	1,0074
8		8	1,0526	8	1,0072	8	1,0051	8	0,9949	8	0,9951	8	1,0079
9		9	1,0496	9	1,0062	9	1,0053	9	0,9944	9	0,9953	9	1,0084
10		10	1,0466	10	1,0051	10	1,0055	10	0,9939	10	0,9954	10	1,0090
11		11	1,0437	11	1,0041	11	1,0057	11	0,9934	11	0,9956	11	1,0095
12		12	1,0407	12	1,0031	12	1,0059	12	0,9930	12	0,9957	12	1,0100
13		13	1,0377	13	1,0021	13	1,0062	13	0,9925	13	0,9959	13	1,0105
14		14	1,0348	14	1,0010	14	1,0064	14	0,9920	14	0,9960	14	1,0110
15	<b>0,9847</b>	15	<b>1,0318</b>	15	<b>1,0000</b>	15	<b>1,0066</b>	15	<b>0,9915</b>	15	<b>0,9962</b>	15	<b>1,0115</b>
16	1,1178	16	1,0308	16	1,0002	16	1,0061	16	0,9917	16	0,9967	16	1,0120
17	1,1149	17	1,0297	17	1,0004	17	1,0056	17	0,9918	17	0,9972	17	1,0125
18	1,1119	18	1,0287	18	1,0007	18	1,0051	18	0,9920	18	0,9977	18	1,0130
19	1,1089	19	1,0277	19	1,0009	19	1,0047	19	0,9921	19	0,9982	19	1,0135
20	1,1060	20	1,0267	20	1,0011	20	1,0042	20	0,9923	20	0,9988	20	1,0141
21	1,1030	21	1,0256	21	1,0013	21	1,0037	21	0,9924	21	0,9993	21	1,0146
22	1,1000	22	1,0246	22	1,0015	22	1,0032	22	0,9926	22	0,9998	22	1,0151
23	1,0971	23	1,0236	23	1,0018	23	1,0027	23	0,9927	23	1,0003	23	1,0156
24	1,0941	24	1,0226	24	1,0020	24	1,0022	24	0,9929	24	1,0008	24	1,0161
25	1,0911	25	1,0215	25	1,0022	25	1,0017	25	0,9930	25	1,0013	25	1,0166
26	1,0882	26	1,0205	26	1,0024	26	1,0012	26	0,9932	26	1,0018	26	1,0171
27	1,0852	27	1,0195	27	1,0026	27	1,0008	27	0,9933	27	1,0023	27	1,0176
28	1,0822	28	1,0185	28	1,0029	28	1,0003	28	0,9935	28	1,0028	28	1,0181
29	1,0793	29	1,0174	29	1,0031	29	0,9998	29	0,9936	29	1,0033	29	1,0186
30	1,0763	30	1,0164	30	1,0033	30	0,9993	30	0,9938	30	1,0039	30	1,0192
		31	1,0154			31	0,9988	31	0,9939			31	1,0197



ETMHK päevased tegurid													
M4 - Aprill		M5 - Mai		M6 - Juuni		M7 - Juuli		M8 - August		M9 - September		M10 - Oktoober	
kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur	kp	tegur
1		1	1,0612	1	1,0089	1	1,0070	1	0,9990	1	0,9903	1	0,9957
2		2	1,0583	2	1,0083	2	1,0074	2	0,9982	2	0,9904	2	0,9959
3		3	1,0553	3	1,0076	3	1,0079	3	0,9973	3	0,9906	3	0,9961
4		4	1,0523	4	1,0070	4	1,0083	4	0,9965	4	0,9908	4	0,9963
5		5	1,0494	5	1,0064	5	1,0087	5	0,9957	5	0,9909	5	0,9965
6		6	1,0464	6	1,0057	6	1,0092	6	0,9949	6	0,9911	6	0,9967
7		7	1,0434	7	1,0051	7	1,0096	7	0,9940	7	0,9913	7	0,9969
8		8	1,0405	8	1,0044	8	1,0100	8	0,9932	8	0,9914	8	0,9970
9		9	1,0375	9	1,0038	9	1,0105	9	0,9924	9	0,9916	9	0,9972
10		10	1,0345	10	1,0032	10	1,0109	10	0,9915	10	0,9918	10	0,9974
11		11	1,0316	11	1,0025	11	1,0114	11	0,9907	11	0,9919	11	0,9976
12		12	1,0286	12	1,0019	12	1,0118	12	0,9899	12	0,9921	12	0,9978
13		13	1,0256	13	1,0013	13	1,0122	13	0,9891	13	0,9923	13	0,9980
14		14	1,0227	14	1,0006	14	1,0127	14	0,9882	14	0,9924	14	0,9982
15	<b>0,9859</b>	15	<b>1,0197</b>	15	<b>1,000</b>	15	<b>1,0131</b>	15	<b>0,9874</b>	15	<b>0,9926</b>	15	<b>0,9984</b>
16	1,1057	16	1,0191	16	1,0004	16	1,0123	16	0,9876	16	0,9928	16	0,9986
17	1,1028	17	1,0184	17	1,0009	17	1,0114	17	0,9877	17	0,9930	17	0,9988
18	1,0998	18	1,0178	18	1,0013	18	1,0106	18	0,9879	18	0,9932	18	0,9990
19	1,0968	19	1,0172	19	1,0017	19	1,0098	19	0,9881	19	0,9934	19	0,9992
20	1,0939	20	1,0165	20	1,0022	20	1,0090	20	0,9882	20	0,9936	20	0,9994
21	1,0909	21	1,0159	21	1,0026	21	1,0081	21	0,9884	21	0,9938	21	0,9996
22	1,0879	22	1,0153	22	1,0031	22	1,0073	22	0,9886	22	0,9940	22	0,9998
23	1,0850	23	1,0146	23	1,0035	23	1,0065	23	0,9887	23	0,9941	23	0,9999
24	1,0820	24	1,0140	24	1,0039	24	1,0056	24	0,9889	24	0,9943	24	1,0001
25	1,0790	25	1,0133	25	1,0044	25	1,0048	25	0,9891	25	0,9945	25	1,0003
26	1,0761	26	1,0127	26	1,0048	26	1,0040	26	0,9892	26	0,9947	26	1,0005
27	1,0731	27	1,0121	27	1,0052	27	1,0032	27	0,9894	27	0,9949	27	1,0007
28	1,0701	28	1,0114	28	1,0057	28	1,0023	28	0,9896	28	0,9951	28	1,0009
29	1,0672	29	1,0108	29	1,0061	29	1,0015	29	0,9897	29	0,9953	29	1,0011
30	1,0642	30	1,0102	30	1,0066	30	1,0007	30	0,9899	30	0,9955	30	1,0013
		31	1,0095			31	0,9998	31	0,9901			31	1,0015





### LISA 3 Kontrollpunktide keskmised elastsusmooduli väärtused

Kontrollpunktide keskmised elastsusmooduli väärtused, MPa						
KP nr	E <sub>KAP</sub>	ETM <sub>2003</sub>	ETM	ETMH	ETMK	ETMHK
1	168	178	161	125	182	147
2	210	335	281	263	334	311
3	214	200	178	211	161	186
4	321	286	245	240	313	299
5	209	293	250	253	220	226
6	226	166	151	195	139	170
7	231	267	230	198	211	190
8	189	253	219	245	172	193
9	189	202	179	228	176	212
10	118	201	179	158	219	195
11	240	198	177	181	245	240
12	154	280	240	212	182	171
13	161	239	208	177	167	151
14	157	283	241	198	200	176
15	168	317	268	222	193	174
16	161	299	254	222	206	191
17	246	278	238	225	295	276
18	183	342	286	234	221	196
19	131	278	238	203	157	147
20	437	426	347	326	391	367
21	378	353	294	313	383	389
22	314	366	304	287	355	334
23	260	264	228	237	306	304
24	393	392	323	308	377	356
25	434	324	272	300	373	387
26	205	199	177	244	152	198
27	306	182	164	247	161	221
28	397	165	151	135	191	170
29	179	317	267	251	244	235
30	259	392	323	306	272	267
31	282	390	321	312	380	365
32	334	422	347	422	270	323
33	403	346	289	346	240	281
34	253	380	315	384	251	301
35	367	314	265	306	336	364
36	257	227	199	218	244	255
37	275	247	215	245	246	268
38	266	259	224	270	283	318
39	191	214	190	224	220	245
40	270	244	213	253	234	264
41	94	153	142	109	159	128

<b>Kontrollpunktide keskmised elastsusmooduli väärtused, MPa</b>						
<b>KP nr</b>	<b>E<sub>KAP</sub></b>	<b>ETM<sub>2003</sub></b>	<b>ETM</b>	<b>ETMH</b>	<b>ETMK</b>	<b>ETMHK</b>
42	113	115	110	80	127	98
43	346	390	322	384	298	345
44	354	356	296	366	296	348
45	385	392	324	359	356	380
46	412	343	287	397	293	374
47	226	197	175	176	239	231
48	263	262	225	228	297	290
49	266	276	237	264	200	221
50	266	266	230	258	196	218
121	391	423	349	327	397	372
122	391	423	349	327	397	372
123	391	413	342	322	393	369
124	391	407	337	318	389	366
125	391	384	320	306	378	358
126	391	403	335	317	388	365
127	391	368	309	298	370	352
128	391	374	313	301	373	354
129	391	424	350	327	398	372
131	387	398	330	313	385	363
132	387	394	328	312	383	362
133	387	393	327	311	383	361
134	387	388	324	309	380	360
135	387	378	316	303	375	356
136	387	412	341	321	392	368
137	387	347	293	286	359	344
138	387	364	305	295	368	351
139	387	383	319	305	377	358
141	346	426	351	418	315	365
142	346	452	370	435	324	373
143	346	430	354	421	316	366
144	346	406	337	405	307	358
145	346	424	349	416	313	363
146	346	428	352	419	315	365
147	346	423	348	415	313	363
148	346	398	330	399	304	354
149	346	393	327	396	302	353
151	354	370	310	380	304	356
152	354	369	309	379	304	356
153	354	368	308	379	304	356
154	354	378	315	385	308	360
155	354	364	306	376	302	355
156	354	359	302	373	300	353
157	354	337	285	357	290	344

<b>Kontrollpunktide keskmised elastsusmooduli väärtused, MPa</b>						
<b>KP nr</b>	<b>E<sub>KAP</sub></b>	<b>ETM<sub>2003</sub></b>	<b>ETM</b>	<b>ETMH</b>	<b>ETMK</b>	<b>ETMHK</b>
158	354	346	292	363	294	348
159	354	366	307	378	303	356
161	154	326	277	237	197	183
162	154	317	270	233	194	181
163	154	339	286	244	201	186
164	154	298	256	224	188	176
165	154	259	226	204	176	167
166	154	257	225	203	175	167
167	154	285	246	217	184	173
168	154	293	252	221	187	175
169	154	334	283	242	200	185
171	414	422	348	332	398	379
172	414	415	343	330	400	381
173	414	378	315	310	381	367
174	414	439	360	343	411	390
175	414	433	356	340	408	388
176	414	431	354	339	408	387
177	414	420	346	333	402	383
178	414	439	360	343	411	390
179	414	430	354	338	407	387
181	161	248	218	183	172	155
182	161	253	221	186	173	156
183	161	243	214	181	170	154
184	161	225	200	172	164	149
185	161	256	224	187	174	157
186	161	312	266	214	193	170
187	161	262	228	190	176	158
188	161	241	212	180	169	153
189	161	238	210	179	168	153
191	472	608	481	454	513	488
192	472	593	470	447	507	483
193	472	598	473	449	509	485
194	472	506	408	401	467	454
195	472	496	401	396	462	450
196	472	539	432	419	483	465
197	472	552	441	426	489	470
198	472	553	442	426	489	470
199	472	553	442	426	489	470
1001	301	272	224	215	253	242
1002	301	263	218	210	248	238
1003	301	261	216	207	246	236
1004	301	217	183	184	226	221
1005	301	253	210	205	244	235

<b>Kontrollpunktide keskmised elastsusmooduli väärtused, MPa</b>						
<b>KP nr</b>	<b>E<sub>KAP</sub></b>	<b>ETM<sub>2003</sub></b>	<b>ETM</b>	<b>ETMH</b>	<b>ETMK</b>	<b>ETMHK</b>
1006	301	292	239	225	263	248
1007	301	308	251	234	270	254
1008	301	323	261	241	277	259
1009	301	358	286	258	292	269
2001	134	183	158	200	246	280
2002	134	226	190	230	274	304
2003	134	211	179	220	265	296
2004	134	201	172	213	259	290
2005	134	173	151	193	240	274
2006	134	144	128	170	218	255
2007	134	141	125	168	216	252
2008	134	147	130	172	220	256
2009	134	124	112	154	202	240
3001	188	178	154	149	194	185
3002	188	176	152	148	193	184
3003	188	164	143	141	186	179
3004	188	159	139	138	183	177
3005	188	174	150	147	192	183
3006	188	187	160	154	199	188
3007	188	198	169	160	205	192
3008	188	203	172	163	208	194
3009	188	202	172	163	207	194
5001	181	285	235	172	204	163
5002	181	290	239	174	206	165
5003	181	294	241	176	207	166
5004	181	289	237	173	205	164
5005	181	283	233	171	203	163
5006	181	276	228	168	201	161
5007	181	282	232	171	203	163
5008	181	285	234	172	203	163
5009	181	280	231	170	202	162

**LISA 4 Elastusmoodulid ja nende erinevused erinevate kuu tegurite  $M_i$  väärtuste juures**

Kuu tegur $M_i$	Elastusmoodulid (MPa) ja nende erinevused erinevate kuu tegurite $M_i$ väärtuste juures														
	ETM			ETMH			ETMK			ETMHK			ETM <sub>2003</sub>		
	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %
1,1	179,0	16,3	10,0	136,4	12,4	10,0	206,8	18,8	10,0	165,1	15,0	10,0			
1,09	177,4	14,6	9,0	135,2	11,2	9,0	204,9	16,9	9,0	163,6	13,5	9,0			
1,08	175,7	13,0	8,0	134,0	9,9	8,0	203,0	15,0	8,0	162,1	12,0	8,0			
1,07	174,1	11,4	7,0	132,7	8,7	7,0	201,1	13,2	7,0	160,6	10,5	7,0			
1,06	172,5	9,8	6,0	131,5	7,4	6,0	199,2	11,3	6,0	159,1	9,0	6,0			
1,05	170,8	8,1	5,0	130,2	6,2	5,0	197,4	9,4	5,0	157,6	7,5	5,0			
1,04	169,2	6,5	4,0	129,0	5,0	4,0	195,5	7,5	4,0	156,1	6,0	4,0			
1,03	167,6	4,9	3,0	127,8	3,7	3,0	193,6	5,6	3,0	154,6	4,5	3,0			
1,02	166,0	3,3	2,0	126,5	2,5	2,0	191,7	3,8	2,0	153,1	3,0	2,0			
1,01	164,3	1,6	1,0	125,3	1,2	1,0	189,8	1,9	1,0	151,6	1,5	1,0			
<b>1</b>	<b>162,7</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>124,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>188,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>150,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>211,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
0,99	161,1	-1,6	-1,0	122,8	-1,2	-1,0	186,1	-1,9	-1,0	148,6	-1,5	-1,0	209,0	-2,1	-1,0
0,98	159,5	-3,3	-2,0	121,6	-2,5	-2,0	184,2	-3,8	-2,0	147,1	-3,0	-2,0	206,9	-4,2	-2,0
0,97	157,8	-4,9	-3,0	120,3	-3,7	-3,0	182,3	-5,6	-3,0	145,6	-4,5	-3,0	204,8	-6,3	-3,0
0,96	156,2	-6,5	-4,0	119,1	-5,0	-4,0	180,4	-7,5	-4,0	144,1	-6,0	-4,0	202,7	-8,4	-4,0
0,95													200,6	-10,6	-5,0
0,94													198,5	-12,7	-6,0
0,93													196,3	-14,8	-7,0
0,92													194,2	-16,9	-8,0
0,91													192,1	-19,0	-9,0
0,9													190,0	-21,1	-10,0
0,89													187,9	-23,2	-11,0
0,88													185,8	-25,3	-12,0
0,87													183,7	-27,4	-13,0
0,86													181,6	-29,6	-14,0
0,85													179,5	-31,7	-15,0
0,84													177,3	-33,8	-16,0
0,83													175,2	-35,9	-17,0
0,82													173,1	-38,0	-18,0
0,81													171,0	-40,1	-19,0

Kuu tegur Mi	Elastsusmoodulid (MPa) ja nende erinevused erinevate kuu tegurite Mi väärtuste juures														
	ETM			ETMH			ETMK			ETMHK			ETM <sub>2003</sub>		
	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %
1,1	311,8	28,3	10,0	287,9	26,2	10,0	378,4	34,4	10,0	347,8	31,6	10,0			
1,09	308,9	25,5	9,0	285,3	23,6	9,0	375,0	31,0	9,0	344,7	28,5	9,0			
1,08	306,1	22,7	8,0	282,6	20,9	8,0	371,5	27,5	8,0	341,5	25,3	8,0			
1,07	303,3	19,8	7,0	280,0	18,3	7,0	368,1	24,1	7,0	338,3	22,1	7,0			
1,06	300,4	17,0	6,0	277,4	15,7	6,0	364,6	20,6	6,0	335,2	19,0	6,0			
1,05	297,6	14,2	5,0	274,8	13,1	5,0	361,2	17,2	5,0	332,0	15,8	5,0			
1,04	294,8	11,3	4,0	272,2	10,5	4,0	357,8	13,8	4,0	328,8	12,6	4,0			
1,03	291,9	8,5	3,0	269,6	7,9	3,0	354,3	10,3	3,0	325,7	9,5	3,0			
1,02	289,1	5,7	2,0	266,9	5,2	2,0	350,9	6,9	2,0	322,5	6,3	2,0			
1,01	286,3	2,8	1,0	264,3	2,6	1,0	347,4	3,4	1,0	319,4	3,2	1,0			
<b>1</b>	<b>283,4</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>261,7</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>344,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>316,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>395,6</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
0,99	280,6	-2,8	-1,0	259,1	-2,6	-1,0	340,6	-3,4	-1,0	313,0	-3,2	-1,0	391,7	-4,0	-1,0
0,98	277,8	-5,7	-2,0	256,5	-5,2	-2,0	337,1	-6,9	-2,0	309,9	-6,3	-2,0	387,7	-7,9	-2,0
0,97	274,9	-8,5	-3,0	253,9	-7,9	-3,0	333,7	-10,3	-3,0	306,7	-9,5	-3,0	383,8	-11,9	-3,0
0,96	272,1	-11,3	-4,0	251,2	-10,5	-4,0	330,2	-13,8	-4,0	303,6	-12,6	-4,0	379,8	-15,8	-4,0
0,95													375,9	-19,8	-5,0
0,94													371,9	-23,7	-6,0
0,93													367,9	-27,7	-7,0
0,92													364,0	-31,7	-8,0
0,91													360,0	-35,6	-9,0
0,9													356,1	-39,6	-10,0
0,89													352,1	-43,5	-11,0
0,88													348,2	-47,5	-12,0
0,87													344,2	-51,4	-13,0
0,86													340,3	-55,4	-14,0
0,85													336,3	-59,3	-15,0
0,84													332,3	-63,3	-16,0
0,83													328,4	-67,3	-17,0
0,82													324,4	-71,2	-18,0
0,81													320,5	-75,2	-19,0

Kuu tegur Mi	Elastusmoodulid (MPa) ja nende erinevused erinevate kuu tegurite Mi väärtuste juures														
	ETM			ETMH			ETMK			ETMHK			ETM <sub>2003</sub>		
	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %
1,1	105,3	9,6	10,0	80,2	7,3	10,0	127,3	11,6	10,0	101,0	9,2	10,0			
1,09	104,4	8,6	9,0	79,4	6,6	9,0	126,2	10,4	9,0	100,1	8,3	9,0			
1,08	103,4	7,7	8,0	78,7	5,8	8,0	125,0	9,3	8,0	99,2	7,3	8,0			
1,07	102,5	6,7	7,0	78,0	5,1	7,0	123,9	8,1	7,0	98,3	6,4	7,0			
1,06	101,5	5,7	6,0	77,3	4,4	6,0	122,7	6,9	6,0	97,3	5,5	6,0			
1,05	100,6	4,8	5,0	76,5	3,6	5,0	121,6	5,8	5,0	96,4	4,6	5,0			
1,04	99,6	3,8	4,0	75,8	2,9	4,0	120,4	4,6	4,0	95,5	3,7	4,0			
1,03	98,6	2,9	3,0	75,1	2,2	3,0	119,2	3,5	3,0	94,6	2,8	3,0			
1,02	97,7	1,9	2,0	74,3	1,5	2,0	118,1	2,3	2,0	93,7	1,8	2,0			
1,01	96,7	1,0	1,0	73,6	0,7	1,0	116,9	1,2	1,0	92,8	0,9	1,0			
<b>1</b>	<b>95,8</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>72,9</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>115,8</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>91,8</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>114,3</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
0,99	94,8	-1,0	-1,0	72,2	-0,7	-1,0	114,6	-1,2	-1,0	90,9	-0,9	-1,0	113,1	-1,1	-1,0
0,98	93,9	-1,9	-2,0	71,4	-1,5	-2,0	113,5	-2,3	-2,0	90,0	-1,8	-2,0	112,0	-2,3	-2,0
0,97	92,9	-2,9	-3,0	70,7	-2,2	-3,0	112,3	-3,5	-3,0	89,1	-2,8	-3,0	110,8	-3,4	-3,0
0,96	91,9	-3,8	-4,0	70,0	-2,9	-4,0	111,1	-4,6	-4,0	88,2	-3,7	-4,0	109,7	-4,6	-4,0
0,95													108,5	-5,7	-5,0
0,94													107,4	-6,9	-6,0
0,93													106,3	-8,0	-7,0
0,92													105,1	-9,1	-8,0
0,91													104,0	-10,3	-9,0
0,9													102,8	-11,4	-10,0
0,89													101,7	-12,6	-11,0
0,88													100,5	-13,7	-12,0
0,87													99,4	-14,9	-13,0
0,86													98,3	-16,0	-14,0
0,85													97,1	-17,1	-15,0
0,84													96,0	-18,3	-16,0
0,83													94,8	-19,4	-17,0
0,82													93,7	-20,6	-18,0
0,81													92,5	-21,7	-19,0

## LISA 5 Elastusmoodulid ja nende erinevused erinevate temperatuuri T väärtuste juures

Temperatuur T	Elastusmoodulid (MPa) ja nende erinevused erinevate temperatuuri T väärtuste juures														
	ETM			ETMH			ETMK			ETMHK			ETM <sub>2003</sub>		
	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %
30	163,1	20,2	14,1	124,2	6,2	5,2	188,5	27,1	16,8	150,4	13,0	9,5	211,8	34,1	19,2
29	162,7	19,8	13,8	124,0	6,1	5,1	188,0	26,5	16,4	150,1	12,8	9,3	211,1	33,4	18,8
28	162,3	19,3	13,5	123,9	5,9	5,0	187,4	26,0	16,1	149,8	12,5	9,1	210,4	32,7	18,4
27	161,9	18,9	13,2	123,8	5,8	4,9	186,8	25,4	15,7	149,6	12,2	8,9	209,6	31,9	18,0
26	161,4	18,5	12,9	123,6	5,7	4,8	186,2	24,8	15,3	149,3	11,9	8,7	208,9	31,2	17,5
25	160,9	18,0	12,6	123,5	5,5	4,7	185,6	24,1	15,0	149,0	11,6	8,5	208,1	30,4	17,1
24	160,5	17,5	12,2	123,4	5,4	4,6	184,9	23,5	14,5	148,7	11,3	8,3	207,2	29,5	16,6
23	160,0	17,0	11,9	123,2	5,2	4,5	184,2	22,8	14,1	148,4	11,0	8,0	206,4	28,7	16,1
22	159,4	16,5	11,5	123,1	5,1	4,3	183,5	22,1	13,7	148,0	10,7	7,8	205,5	27,8	15,6
21	158,9	15,9	11,1	122,9	4,9	4,2	182,8	21,4	13,2	147,7	10,3	7,5	204,5	26,8	15,1
20	158,3	15,4	10,7	122,7	4,8	4,0	182,0	20,6	12,8	147,3	10,0	7,3	203,6	25,9	14,6
19	157,7	14,8	10,3	122,5	4,6	3,9	181,2	19,8	12,3	146,9	9,6	7,0	202,5	24,8	14,0
18	157,1	14,1	9,9	122,4	4,4	3,7	180,4	18,9	11,7	146,5	9,2	6,7	201,5	23,8	13,4
17	156,4	13,5	9,4	122,2	4,2	3,6	179,5	18,0	11,2	146,1	8,8	6,4	200,4	22,6	12,7
16	155,7	12,8	8,9	121,9	4,0	3,4	178,5	17,1	10,6	145,7	8,3	6,1	199,2	21,5	12,1
15	155,0	12,0	8,4	121,7	3,8	3,2	177,5	16,1	10,0	145,2	7,8	5,7	197,9	20,2	11,4
14	154,2	11,3	7,9	121,5	3,5	3,0	176,5	15,1	9,3	144,7	7,3	5,3	196,6	18,9	10,6
13	153,4	10,4	7,3	121,2	3,3	2,8	175,3	13,9	8,6	144,1	6,8	4,9	195,2	17,4	9,8
12	152,5	9,5	6,7	120,9	3,0	2,5	174,1	12,7	7,9	143,6	6,2	4,5	193,6	15,9	9,0
11	151,5	8,5	6,0	120,6	2,7	2,3	172,8	11,4	7,1	142,9	5,6	4,1	192,0	14,3	8,0
10	150,4	7,5	5,2	120,3	2,4	2,0	171,4	10,0	6,2	142,2	4,9	3,6	190,2	12,5	7,0
9	149,3	6,3	4,4	120,0	2,0	1,7	169,8	8,4	5,2	141,5	4,1	3,0	188,2	10,5	5,9
8	148,0	5,0	3,5	119,6	1,6	1,4	168,1	6,7	4,2	140,6	3,3	2,4	186,1	8,4	4,7
7	146,5	3,6	2,5	119,1	1,1	1,0	166,2	4,8	3,0	139,7	2,4	1,7	183,7	6,0	3,4
6	144,9	1,9	1,4	118,6	0,6	0,5	164,0	2,6	1,6	138,6	1,3	0,9	180,9	3,2	1,8
5	143,0	0,0	0,0	118,0	0,0	0,0	161,4	0,0	0,0	137,3	0,0	0,0	177,7	0,0	0,0



Temperatuur T	Elastsusmoodulid (MPa) ja nende erinevused erinevate temperatuuri T väärtuste juures														
	ETM			ETMH			ETMK			ETMHK			ETM <sub>2003</sub>		
	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %
30	284,1	35,1	14,1	262,0	13,1	5,2	345,0	49,6	16,8	316,7	27,4	9,5	397,0	63,9	19,2
29	283,4	34,4	13,8	261,7	12,8	5,1	344,0	48,6	16,4	316,2	26,9	9,3	395,6	62,6	18,8
28	282,7	33,7	13,5	261,4	12,5	5,0	343,0	47,5	16,1	315,6	26,3	9,1	394,3	61,3	18,4
27	281,9	32,9	13,2	261,2	12,3	4,9	341,9	46,5	15,7	315,1	25,7	8,9	392,9	59,8	18,0
26	281,2	32,1	12,9	260,9	12,0	4,8	340,8	45,3	15,3	314,5	25,1	8,7	391,4	58,4	17,5
25	280,3	31,3	12,6	260,6	11,7	4,7	339,6	44,2	15,0	313,8	24,5	8,5	389,9	56,9	17,1
24	279,5	30,5	12,2	260,3	11,4	4,6	338,4	43,0	14,5	313,2	23,9	8,3	388,4	55,3	16,6
23	278,6	29,6	11,9	260,0	11,1	4,5	337,2	41,7	14,1	312,5	23,2	8,0	386,8	53,7	16,1
22	277,7	28,7	11,5	259,6	10,7	4,3	335,9	40,4	13,7	311,8	22,5	7,8	385,1	52,0	15,6
21	276,8	27,8	11,1	259,3	10,4	4,2	334,5	39,1	13,2	311,1	21,8	7,5	383,3	50,3	15,1
20	275,8	26,8	10,7	258,9	10,0	4,0	333,1	37,7	12,8	310,3	21,0	7,3	381,5	48,5	14,6
19	274,7	25,7	10,3	258,6	9,7	3,9	331,6	36,2	12,3	309,5	20,2	7,0	379,6	46,5	14,0
18	273,6	24,6	9,9	258,2	9,3	3,7	330,1	34,7	11,7	308,7	19,4	6,7	377,6	44,5	13,4
17	272,5	23,5	9,4	257,7	8,8	3,6	328,4	33,0	11,2	307,8	18,5	6,4	375,5	42,4	12,7
16	271,3	22,3	8,9	257,3	8,4	3,4	326,7	31,3	10,6	306,8	17,5	6,1	373,2	40,2	12,1
15	270,0	21,0	8,4	256,8	7,9	3,2	324,9	29,5	10,0	305,8	16,5	5,7	370,9	37,9	11,4
14	268,6	19,6	7,9	256,3	7,4	3,0	323,0	27,5	9,3	304,8	15,5	5,3	368,4	35,4	10,6
13	267,2	18,2	7,3	255,8	6,9	2,8	320,9	25,5	8,6	303,6	14,3	4,9	365,7	32,7	9,8
12	265,6	16,6	6,7	255,2	6,3	2,5	318,7	23,3	7,9	302,4	13,1	4,5	362,9	29,8	9,0
11	263,9	14,9	6,0	254,6	5,7	2,3	316,3	20,9	7,1	301,1	11,8	4,1	359,8	26,8	8,0
10	262,0	13,0	5,2	253,9	5,0	2,0	313,7	18,3	6,2	299,6	10,3	3,6	356,4	23,4	7,0
9	260,0	11,0	4,4	253,1	4,2	1,7	310,8	15,4	5,2	298,0	8,7	3,0	352,8	19,7	5,9
8	257,8	8,8	3,5	252,3	3,4	1,4	307,7	12,3	4,2	296,3	7,0	2,4	348,7	15,7	4,7
7	255,3	6,2	2,5	251,3	2,4	1,0	304,2	8,7	3,0	294,3	5,0	1,7	344,2	11,2	3,4
6	252,4	3,4	1,4	250,2	1,3	0,5	300,1	4,7	1,6	292,0	2,7	0,9	339,0	6,0	1,8
5	249,0	0,0	0,0	248,9	0,0	0,0	295,4	0,0	0,0	289,3	0,0	0,0	333,0	0,0	0,0

Temperatuur T	Elastusmoodulid (MPa) ja nende erinevused erinevate temperatuuri T väärtuste juures														
	ETM			ETMH			ETMK			ETMHK			ETM <sub>2003</sub>		
	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %	Moodul	erinevus, MPa	erinevus, %
30	103,1	12,7	14,1	75,0	3,7	5,2	126,3	18,1	16,8	96,6	8,4	9,5	126,1	20,3	19,2
29	102,9	12,5	13,8	74,9	3,7	5,1	125,9	17,8	16,4	96,4	8,2	9,3	125,6	19,9	18,8
28	102,6	12,2	13,5	74,8	3,6	5,0	125,5	17,4	16,1	96,3	8,0	9,1	125,2	19,5	18,4
27	102,3	12,0	13,2	74,8	3,5	4,9	125,1	17,0	15,7	96,1	7,9	8,9	124,8	19,0	18,0
26	102,0	11,7	12,9	74,7	3,4	4,8	124,7	16,6	15,3	95,9	7,7	8,7	124,3	18,5	17,5
25	101,7	11,4	12,6	74,6	3,3	4,7	124,3	16,2	15,0	95,7	7,5	8,5	123,8	18,1	17,1
24	101,4	11,1	12,2	74,5	3,3	4,6	123,9	15,7	14,5	95,5	7,3	8,3	123,3	17,6	16,6
23	101,1	10,7	11,9	74,4	3,2	4,5	123,4	15,3	14,1	95,3	7,1	8,0	122,8	17,1	16,1
22	100,8	10,4	11,5	74,3	3,1	4,3	122,9	14,8	13,7	95,1	6,9	7,8	122,3	16,5	15,6
21	100,4	10,1	11,1	74,2	3,0	4,2	122,4	14,3	13,2	94,9	6,6	7,5	121,7	16,0	15,1
20	100,1	9,7	10,7	74,1	2,9	4,0	121,9	13,8	12,8	94,7	6,4	7,3	121,1	15,4	14,6
19	99,7	9,3	10,3	74,0	2,8	3,9	121,4	13,3	12,3	94,4	6,2	7,0	120,5	14,8	14,0
18	99,3	8,9	9,9	73,9	2,7	3,7	120,8	12,7	11,7	94,1	5,9	6,7	119,9	14,1	13,4
17	98,9	8,5	9,4	73,8	2,5	3,6	120,2	12,1	11,2	93,9	5,6	6,4	119,2	13,5	12,7
16	98,5	8,1	8,9	73,7	2,4	3,4	119,6	11,5	10,6	93,6	5,3	6,1	118,5	12,8	12,1
15	98,0	7,6	8,4	73,5	2,3	3,2	118,9	10,8	10,0	93,3	5,0	5,7	117,8	12,0	11,4
14	97,5	7,1	7,9	73,4	2,1	3,0	118,2	10,1	9,3	93,0	4,7	5,3	117,0	11,2	10,6
13	97,0	6,6	7,3	73,2	2,0	2,8	117,5	9,3	8,6	92,6	4,4	4,9	116,1	10,4	9,8
12	96,4	6,0	6,7	73,1	1,8	2,5	116,6	8,5	7,9	92,2	4,0	4,5	115,2	9,5	9,0
11	95,8	5,4	6,0	72,9	1,6	2,3	115,8	7,6	7,1	91,8	3,6	4,1	114,3	8,5	8,0
10	95,1	4,7	5,2	72,7	1,4	2,0	114,8	6,7	6,2	91,4	3,1	3,6	113,2	7,4	7,0
9	94,4	4,0	4,4	72,5	1,2	1,7	113,8	5,6	5,2	90,9	2,7	3,0	112,0	6,3	5,9
8	93,6	3,2	3,5	72,2	1,0	1,4	112,6	4,5	4,2	90,4	2,1	2,4	110,7	5,0	4,7
7	92,6	2,3	2,5	71,9	0,7	1,0	111,3	3,2	3,0	89,8	1,5	1,7	109,3	3,5	3,4
6	91,6	1,2	1,4	71,6	0,4	0,5	109,9	1,7	1,6	89,1	0,8	0,9	107,7	1,9	1,8
5	90,4	0,0	0,0	71,3	0,0	0,0	108,1	0,0	0,0	88,2	0,0	0,0	105,8	0,0	0,0

## LISA 6 KUAB ja Dynatest FWD-seadmete võrdlus

Aruandest *Madalaklassiliste (kruusateede) remondi/uuendamise metoodika laiendamise kattega teedele*, Maanteeamet, 2019, lk 24-40

[https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/kerkakatete\\_uuringu\\_aruanne.pdf](https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/kerkakatete_uuringu_aruanne.pdf)

### Teoreetiline taust

FWD ehk *Falling Weight Deflectometer* on mittepurustav mõõteseade, millega hinnatakse teekatendi füüsilisi omadusi, kuid seadet kasutatakse ka raudteede ja lennuväljadega seonduvalt, kui ka muudes sarnastes valdkondades. Seadme põhimõte on, et teatud raskusega koormus kukutatakse koormusplaadile mõõtes samaaegselt koormuse suurust ja selle põhjustatud läbipainet. Tüüpiliselt kasutatakse koormust 50 kN, mis tekitab koormusplaadi alla 707 kPa kontaktpinge, kuid koormuse suuruse ja seega ka kontaktpingega saab varieerida. Iga mõõtepunkti juures mõõdetakse koormust eraldi, mis võetakse kandevõime väärtuse arvutamisel aluseks. Lennuväljadel kasutatakse reeglina suuremaid koormusi (kuni 300 kN) koos 450 mm läbimõõduga koormusplaadiga. Koormuse mõjuaeg on sõltuvalt seadmest 20...60 ms.

Tuntumad FWD tootjad on Dynatest, Sweco (toodetava seadme tänane nimi on PRIMAX, varasemalt Carl Pro ja Phoenix), Jils, PaveTesting ja KUAB. Nimetatutest viimane ehk KUAB töötati välja Rootsisis aastaks 1976, kui oli käimas programm kruusateede tolmuva katte alla viimise osas. Siis avastati, et ühemassilised ja kiirendusanduritel põhinevad FWD-d ei sobitu kuigi hästi kruusateede mõõtmisteks, kuna võivad anda tegelikkuses kõrgemaid kandevõimeid, mis viib katendi aladimensioonimiseni [info KUABi algusest pärineb Sven Sillamäe suulisest vestlusest seadme autori Olle Tholen'iga aastal 2015].

Artiklis [4] kirjutatakse, et kui nii Dynatesti kui KUABi FWD-seadmed arvestatakse olevat piisavalt täpsed testimaks suhteliselt paksu asfaltkatte ja tasase pinnaga teekatendit, siis KUABi seade arvatakse olevat parem nõrgemate teekatendite mõõtmiseks tänu üksteisest sõltumatutesse sektsioonidesse jaotatud koormusplaadile ja siirdeandurite suuremale mõõtevahemikule, mistõttu avaldatud koormus jaotub mõõdetavale pinnale ühtlasemalt ning ei teki probleeme kiirendusanduri (ing. *geophone*) väiksema mõõtevahemikuga (kuni 2 mm).

Kirjandusest leidub väga vähe informatsiooni, mis käsitleb KUABi ja Dynatesti omavahelist võrdlust. Konkreetsed võrdlusemõõtmised (hea kandevõimega teedel) esitati juba viidatud artiklis [4], milles leiti, et seadmete mõõtetulemused küll erinesid üksteisest mõnevõrra, kuid erinevused jäid veenvalt nendesse piiridesse, mis arvatud elastsusmoodulid oleksid pidanud olema (ing. *„the differences noted were well within the range of confidence typically applied to moduli determined solely on surface deflections for simple two-layered systems“*). KUABi tulemuste põhjal saadi tagasiarvutusega teekattele (nii asfalt- kui tsementbetoon) umbes 19% väiksemad elastsusmoodulid kui Dynatestiga ning aluspinnase puhul umbes 5% kõrgemad väärtused. Artikli autor leidis siiski, et mõlemad seadmed võimaldavad anda piisavalt täpseid ja järjepidevaid mõõtmistulemusi tingimusel, kui mõõdetava pinna deformatsioonid jäävad anduri mõõtmispiirkonda.

Analüüsidest täpsemalt artiklis [4] esitatud andmeid FWD-mõõtmistest ning arvutades artikli tabelites 2 ja 3 leitavad väärtused ümber elastsusmooduliteks, saab näha, et

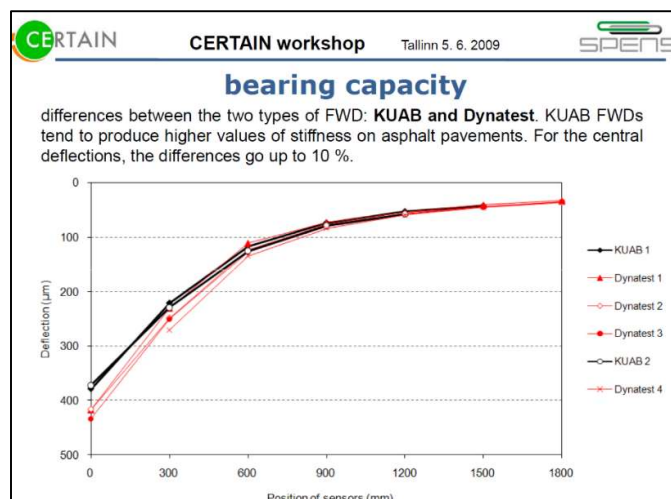
Illinoisi osariigis tehtud mõõtmiste osas andis Dynatest esimeses punktis 3.7%, teises 6.3% ja kolmandas 2.5% kõrgema kandevõime kui KUAB. Saudi Araabias tehtud mõõtmiste puhul andis esimeses punktis KUAB 1.5% ja kolmandas 3.7% kõrgema kandevõime kui Dynatest ning teise punkti puhul saadi Dynatestiga 2.4% kõrgem väärtus. Arvutused olid tehtud taandades läbipainded 50 kN koormusele ehk eeldades 707 kPa kontaktpinget. Seega võib esitatud võrdlusest järeldada, et seadmed annavad suhteliselt sarnase kandevõime ning kinnitada sellega artikli autori järeldust, et mõlemad on edukalt mõõtmisteks kasutatavad.

Nii nagu ühemassilised FWD-d, sobib ka kahemassiline seade püsikatendite mõõtmiseks. KUABi kahemassilised seadmed on laialt levinud USAs (seda kasutab muuhulgas ka riiklik lennundusamet, foto 3.1), Jaapanis (samuti mitmetel lennuväljadel), Soomes ja Rootsis, kuid neid leidub üle kogu maailma (seadmete levik on näidatud [www.erikuab.com](http://www.erikuab.com)).



Foto 3.1. KUABi põhiseade ehk kahemassiline FWD. Foto allikast: U.S Department of Transportation. Federal Aviation Administration, [5]

Joonisel 3.1 on esitatud väljavõtte allikast [6], mille alusel nähtub, et KUABi seade annab asfaltkatete puhul tulemuseks kuni 10% suurema jäikuse võrreldes Dynatesti seadmega. Joonisel on esitatud KUABi seadmega saadud läbipaindeks ca 380  $\mu\text{m}$  ning Dynatestil ca 420  $\mu\text{m}$ . Oletades, et mõõtmistingimused on olnud identsed (707 kPa kontaktpinge, asfaltkatte temperatuur 15°C, mõõtmiskuu aprill), tähendavad need allikas [2] toodud valemiga arvatult kandevõimeid vastavalt 307 MPa ja 284 MPa ehk tulemused erinevad ca 8%.



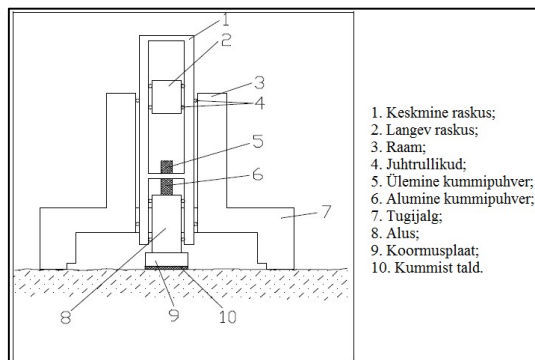
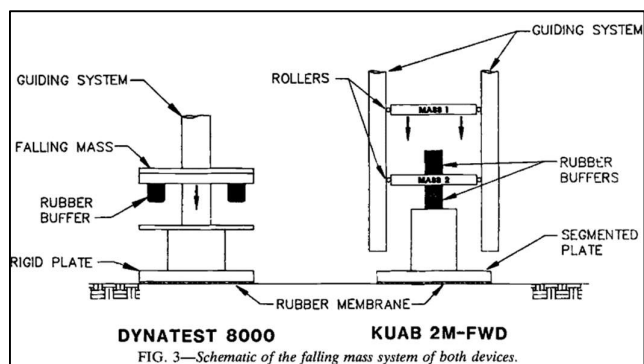
Joonis 3.1. Euroopas tehtud võrdlusmõõtmised KUABi ja Dynatesti vahel, väljavõtte allikast [6]

KUABi kahemassilise seadme peamiseks erinevusteks võrreldes teiste tootjate seadmetega on koormussüsteem, kasutatavad siirdeandurid ja segmenteeritud koormusplaat. KUAB kasutab põhiseadmes (standardmudelil) kahemassilist süsteemi ja vajumianduritena seisumomeetreid. Kõikides ülejäänud FWD-seadmetes (sh ka KUABi soodsamates mudelites) kasutatakse ühemassilist koormussüsteemi ja anduritena kiirendusandureid (ing. *geophone*).

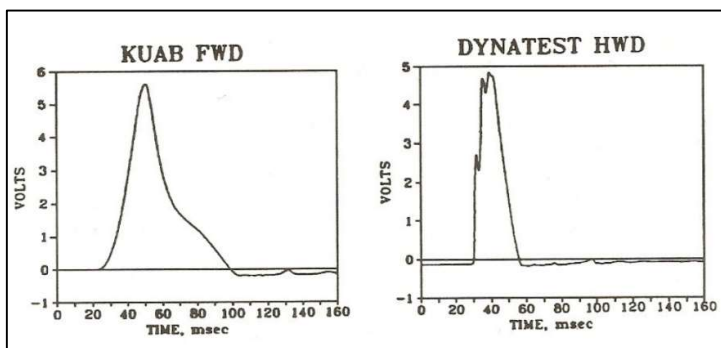
**Kahemassiline süsteem** võrdluses ühemassilisega on esitatud joonisel 3.2 ning täpsem skeem joonisel 3.3. Kahemassilise süsteemi eelis on see, kuidas koormus mõõdetavale pinnale langevast raskusest tulenevalt jaotub: see võimaldab tekitada pehmema koormusimpulsi avaldumise nagu nähtub joonisel 3.4.

FWD seadmega mõõdetakse iga anduri juures maksimaalset läbipainet, mille alusel joonistub välja vajumikauss. Vajumikausi analüüsil arvestatakse nõ statsionaarse või staatilise „kausiga“, kuid seoses sellega tuleb sisse viga, kuna andurite maksimaalsed läbipainded ei toimu samaaegselt, vaid vastavalt koormusimpulsi jaotumisele mõõdetavas konstruktsioonis. KUABi kahemassilise süsteemi puhul on seda vea komponenti vähendatud, kuna koormuse tõusu aeg on pikem, mis on sarnasem liikuva sõiduki poolt tekitatud mõjule. Kasutades piisavalt pikka koormuse tõusu aega, viiakse andurite maksimaalsete lugemite ajaline erinevus minimaalseks [8]. Taoline nüanss on eelkõige oluline kihilise süsteemi eluea hindamisel.

KUABi tootja väitel on kahemassilisel süsteemil parem korratavus ja annab täpsemaid tulemusi eriti siis, kui mõõdetava pinna läbipaine on suur (s.t kandevõime madal), mis teeb kahemassilise süsteemiga FWD kruusateedel eelistavamaks. Ühemassilise koormussüsteemi puhul olla koormuse impulss häiritud seoses sellega, kui üks mass kukub kummipuhvrile tekitades kõrge sagedusega võnkumise põhjustades madalama korratavusega maksimaalseid koormusi ja koormuse suurenemise aegu. Kasutades lühikesi koormusimpulsi aegu, võib kandevõime suurema läbipaindega kohtades olla ülehinnatud. Kogu koormusimpulsi kestvus ühemassilise süsteemiga seadmetel on olenevalt tootjast vahemikus 22...28 ms, kuid KUAB kahemassilisel on see 55 ms ja koormuse tõusu aeg on ca 22 ms.



Joonised 3.2 ja 3.3. Võrdlus Dynatesti ja KUABi koormussüsteemide vahel ning kahemassilise süsteemi detailsem skeem. Joonised pärinevad allikatest [4] ja [7]



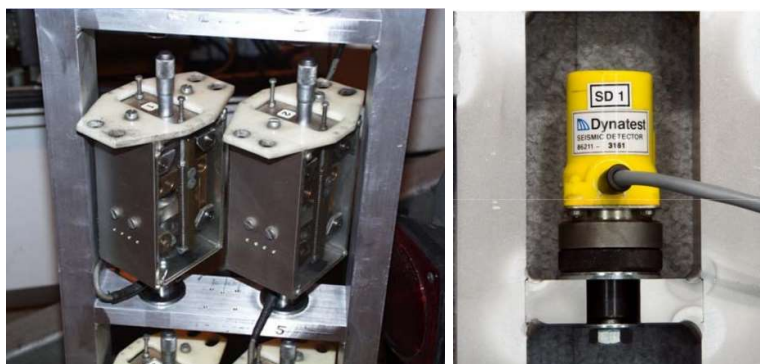
Joonis 3.4. Koormuse avaldumise ajaline graafik KUAB vs Dynatest [9]

**Kasutatavad siirdeandurid.** KUABi kahemassilises seadmes on kasutusel seismomeetrid (fotod 3.2 ja 3.4), muudes seadmetes kiirendusandurid (fotod 3.3 ja 3.5). Seismomeetrid kasutavad referentspunktina vedrusüsteemi ja vajum mõõdetakse siirde-, mitte kiirendusanduriga, nagu muudel FWD seadmetel. Kasutusel olevad seismomeetrid võimaldavad etteantud täpsuse piires ( $\pm 1 \mu\text{m} \pm 2\%$ ) mõõta 5 mm vajumit (50 kN koormuse juures E-moodul ca 30 MPa), kuid maksimaalne võimalik mõõdetav vajum on kuni 15 mm. Enamasti on kiirendusandureid kasutatavate FWD-seadmete puhul maksimaalse vajumise piiriks antud 2 mm, kuigi ka nende puhul on võimalik mõõta natukene suuremaid läbipaindeid, kuid siiski mitte rohkem, kui ca 3,5 mm.

Nõrga kandevõime puhul võib juhtuda, kui koormamise tagajärjel ei jõua koormustalla all olev andur suure läbipainde tõttu tagasi nullasendisse registreerides väiksema läbipainde, kui sellele järgnev andur. Seetõttu on SCI väärtused negatiivsed. Taolisel

olukorral tuleb vähendada langeva koormuse suurust, kuid siis ei ole koormus enam vastavuses normteljele ja koormuse mõju on vertikaalis allapoole liikudes väiksem. Allika [10] alusel on see probleem, kuna koormuse ja deformatsiooni suhe on teekatendite puhul tihti mittelineaarne. Kui kandevõime on mõõdetud madalama koormuse juures ning tulemust on seejärel ekstrapoleeritud suuremale koormusele, võivad sisse tulla tõsised vead.

Hindamaks seega täpselt vaadeldava katendi või konstruktsiooni vastupanuvõimet projektsele koormusele, peaks ka FWD seadmega mõõtes kasutama sarnast koormust (kui normtelg on 10t, millest pool kandub ühele telje poolele, tuleks ka FWD-ga mõõtes kasutada 5t ehk 50 kN koormust). Ka allikas [9] rõhutatakse, et väikese koormusega mõõtmisega võidakse saada väga eksitavaid tulemusi, kui seeläbi üritatakse hinnata katendi toimivust vastavuses kõrgele koormusele.



Fotod 3.2 ja 3.3. KUABi seismomeetrid ja Dynatesti andur kalibreerimiseks ette nähtud rakises. Fotod pärinevad vastavalt allikatest [11] ja [12].

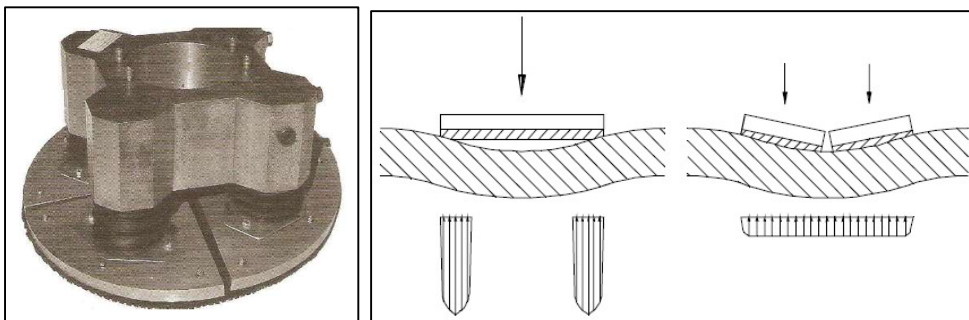


Fotod 3.4 ja 3.5. KUABi sisemus, kus on näha kahemassilist koosmussüsteemi ja seismomeetreid võrdluses Dynatesti anduritega [fotod: Sven Sillamäe]

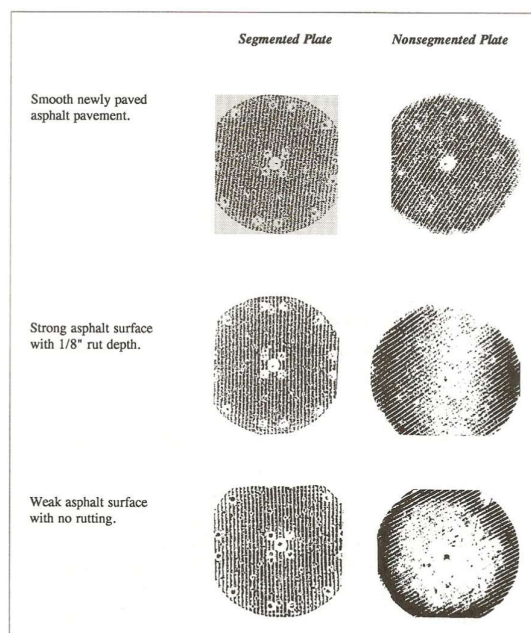
**Koormusplaat.** KUABi koormusplaat on parema pingajaotuse huvides jaotatud nelja sektsiooni (joonis 3.5), muudel seadmetel kasutatakse enamasti kas jäika või pooleks jaotatud plaati.

FWDga mõõtmisel on oluline, et koormus jagatakse koormusplaadilt mõõdetavale pinnale ühtlaselt, s.t koosmussplaadi talle ja mõõdetava pinna vahel oleks ühtlane kontakt, nagu näiteks mõõtes heas korras maanteed või lennurada. Kui mõõdetav pind ei ole ühtlane (nagu kulunud asfaltkate) ja/või kui pind lahtine ja/või pehme (nagu kruusateel), tekivad jäiga plaadi all erineva pingekonsentratsiooniga kohad (joonised

3.6 ja 3.7), mis annab mõõtetulemuste kasutamisel analüüsiprogrammides väärased tulemusi, kuna eeldatakse pingete ühtlast jagunemist koormusplaadi all. Seetõttu on kruusateede mõõtmisel oluline, et koormusplaat suudaks „muganduda“ mõõdetava pinnaga (joonis 3.6), mistõttu on eelistatavam kasutada jäiga plaadi asemel nelja võrdsesse sektsiooni jaotatud plaati.



Joonised 3.5 ja 3.6. KUABi nelja sektsiooni jagatud koormusplaat [9], mille eelis on mugandumine mõõdetava pinnaga, mistõttu koormusjaotus on ühtlasem [7]



Joonis 3.7. Väljavõtte allikas [13] esitatud mõõtmistulemustest pingajaotuse jagunemisest koormusplaadi all olenevalt mõõdetava pinna seisukorrast.

### Mõõtmisandmete võrdlus

Käesoleva projekti raames oli võimalus võrrelda KUABi kahemassilist FWD-d (KUAB FWD 50) Dynatest FWD 8002-ga. Mõõtmised teostati Rae vallas asuvatel valla haldusalasse kuuluvatel teedel, mis olid nii kruus-, kerg- kui asfaltkattega. Kruuskattega teed olid Tankisilla ja Veskitaguse tee (mõned punktid mõõdeti ka kergkattelt), kergkattega oli Pajupea tee (millelt mõõdeti ka peatükis 2 käsitletud taseasust ja põikkallet) ning asfaltkattega oli Vesiroosi tee. Kõik mõõtmistulemused on esitatud lisas 2.

Võrdlusmõõtmiste põhjal nähti, et seadmed annavad mõnevõrra erinevaid tulemusi. KUAB kipub suuremate kandevõimete korral näitama kõrgemaid, kuid väiksemate



puhul madalamaid väärtusi kui Dynatest. Tulemused on tõenäoliselt mingil määral mõjutatud sellest, et kandevõimeid ei õnnestunud mõõta samal päeval, vaid mõõtmiste vahele jäi nädal. KUABiga mõõdeti 13.10.19 (pühapäeval vahemikus kell 18...21), kusjuures etteteatamisaeg oli üks päev (antud sügis oli Soomes erakordselt pingeline mõõtmisperiood, mistõttu oli sobilikku aega raske leida ning ette kokku leppida). Dynatestiga õnnestus mõõta alles 22.10.19 ennelõunat. Ilmastikutingimused enne mõõtmisi ning mõõtmiste ajal olid väga sarnased – eelnevatel päevadel oli olnud vihmasadu, 13.10 mõõtmise ajal olid õhutemperatuurid vahemikus 5...8 kraadi, 22.10 ca 9 kraadi, kuid sellegipoolest võisid teede kandevõimed olla sellest ajalisest erinevusest mõjutatud.

Mõõtepunktide asukohad on esitatud joonistel 3.8 ning mõningad iseloomulikud pildid teedest fotodel 3.6...3.11. Üldiselt olid teekatted halvas seisukorras ning nõrga kandevõimega, mis võimaldas täita lepingu lähteülesandes nõutut.



Joonis 3.8. Kandevõimemõõtmiste võrdlusena kasutatud teelõikude asukohad.



Fotod 3.6 ja 3.7. Pajupea tee külmakerkeline seksioon. Vesiroosi teel leidus hulgaliselt võrkpragusid.



Fotod 3.8 ja 3.9. Tankisilla tee oli nõrga kandevõimega kruusatee.



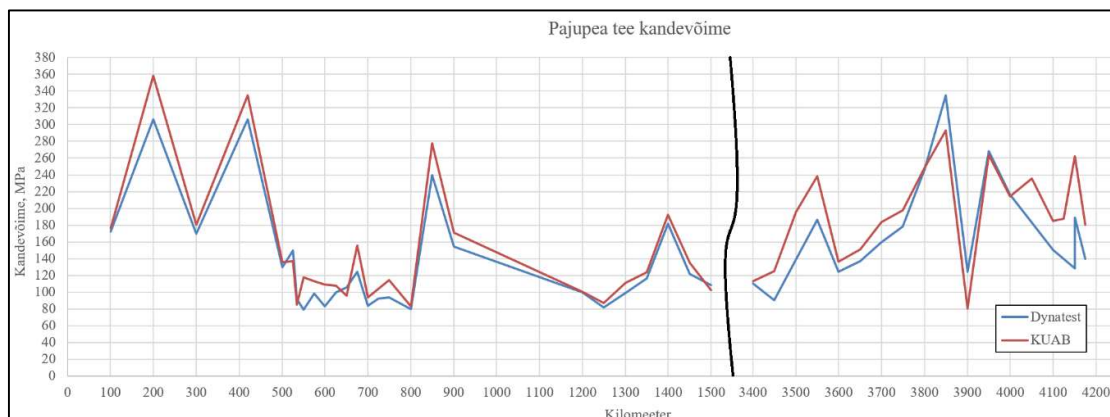
Fotod 3.10 ja 3.11. Veskitaguse tee oli nõrga kandevõimega kruusatee, mille katteks oli freespuru. Mõned mõõtepunktid võeti ka pinnatud seksioonidelt.

Mõõtetulemused on esitatud joonistel 3.9...3.12, kus kandevõime on arvatud allika [1] valemi 1 abil nii kruus- kui kergkattega teede puhul. Kergkatete puhul mõõtmistulemustele temperatuuriparandust ei tehtud, kuna eri seadmetega tehtud mõõtmiste ajal olid õhu- ja kattetemperatuurid olid pea võrdsed.

Joonisel 3.9 on esitatud kergkattega (freespuru + pindamine) Pajupea tee külmakerkeliste seksioonide kandevõimed:

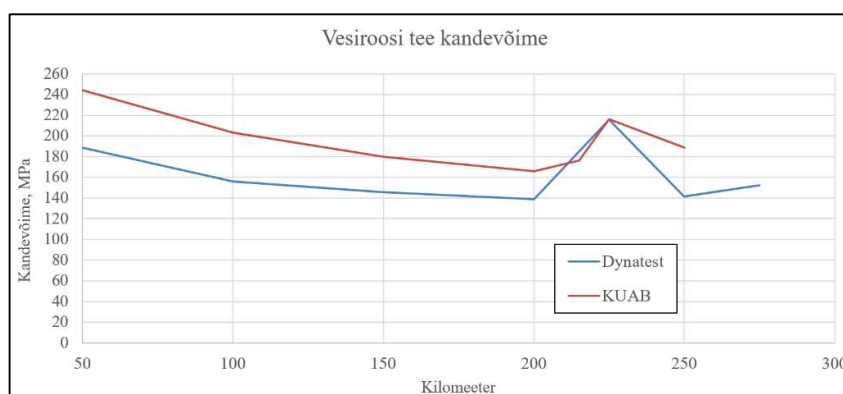
- keskmine kandevõime (44 punkti) Dynatestiga 150 MPa, KUABiga 167 MPa (erinevus ca 10%);
- minimaalne kandevõime Dynatestiga 79 MPa, KUABiga 81 MPa;
- kõrgeim kandevõime Dynatestiga 335 MPa, KUABiga 385 MPa.

Graafikud on vägagi võrreldavad, kõik kõrgema ja nõrgema kandevõimega kohad tulid välja, kuigi kohati olid erinevused oodatust suuremad. Antud mõõtmistega saadi KUABiga keskmiselt veidi kõrgemad väärtused (ca 10%), kuigi tulemused on igati võrreldavad.



Joonis 3.9. Pajupea tee kandevõimemõõtmise võrdlustulemused.

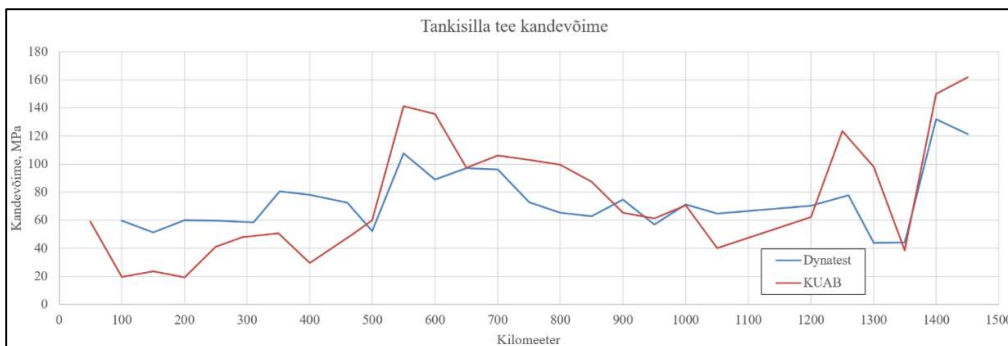
Joonisel 3.10 on esitatud võrkpragudega asfaltkattega Vesiroosi tee kandevõimed, mille tulemused on mõnevõrra vastuolulised. Alguses on kandevõimete erinevus olnud märkimisväärne, kuid lõpus pea identne. Võimalik, et põhjus peitub selles, et kuni kilomeetrini „200“ (ehk 200 m teelõigu algusest) oli tegemist asfaltkattega, kuid sealt edasi lühike geovõrguga armeeritud katselõik. Mõõtmistulemuste erinevus asfaltkattega lõigult on ebaloogiliselt kõrge (ca 20 %), mille põhjus võib olla selles, et mõõtmisi ei saanud teostada samaaegselt. Teisalt on ka mõõtepunkte antud teel võrdluse tegemiseks liiga vähe (7 tk), mistõttu ei saa nende põhjal teha esinduslikke järeldusi.



Joonis 3.10. Vesiroosi tee kandevõimemõõtmise võrdlustulemused.

Joonisel 3.11 on esitatud kruuskattega Tankisilla tee kandevõimed, millest nähtub, et KUABiga saadakse madalamate kandevõimega kohtades väiksemad, kuid suurema kandevõimega paremad väärtused. Kandevõime mõõdeti iga 50 m tagant:

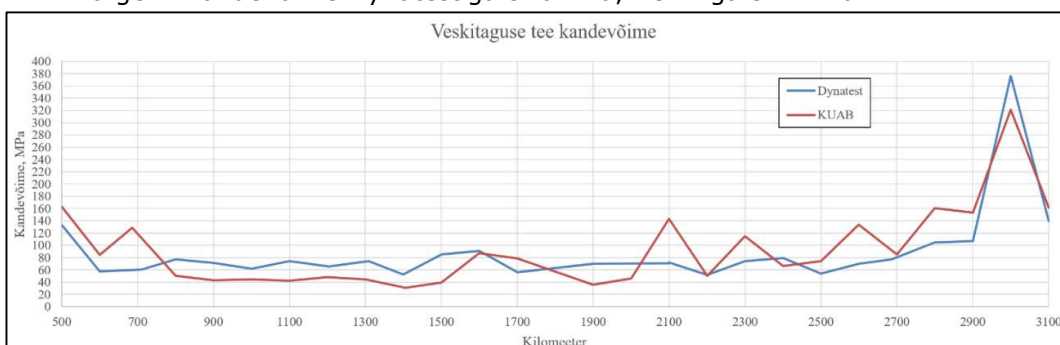
- keskmine kandevõime (27 punkti) Dynatestiga 74 MPa, KUABiga 76 MPa;
- minimaalne kandevõime Dynatestiga 44 MPa, KUABiga 19 MPa;
- kõrgeim kandevõime Dynatestiga 132 MPa, KUABiga 162 MPa.



Joonis 3.11. Tankisilla tee kandevõimemõõtmise võrdlustulemused.

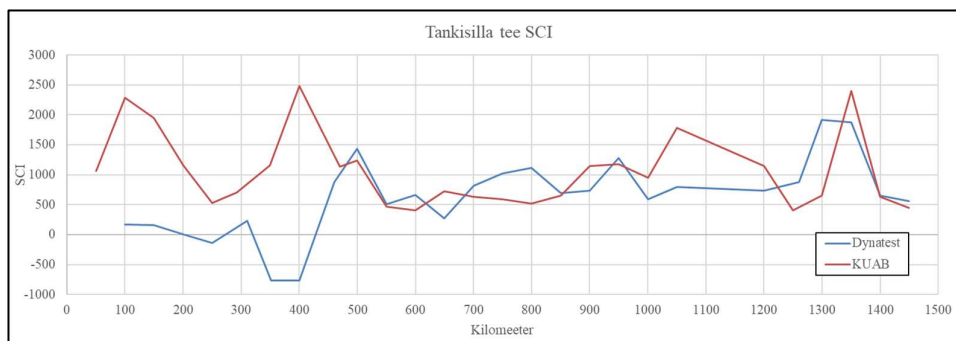
Joonisel 3.12 on esitatud freespurukattega Veskitaguse tee kandevõimed, millest nähtub, et sarnaselt Tankisilla teele saadakse KUABiga madalamate kandevõimega kohtades väiksemad, kuid suurema kandevõimega paremad väärtused. Kandevõime mõõdeti iga 100 m tagant:

- keskmine kandevõime (26 punkti) Dynatestiga 89 MPa, KUABiga 94 MPa;
- minimaalne kandevõime Dynatestiga 52 MPa, KUABiga 30 MPa;
- kõrgeim kandevõime Dynatestiga 376 MPa, KUABiga 321 MPa.

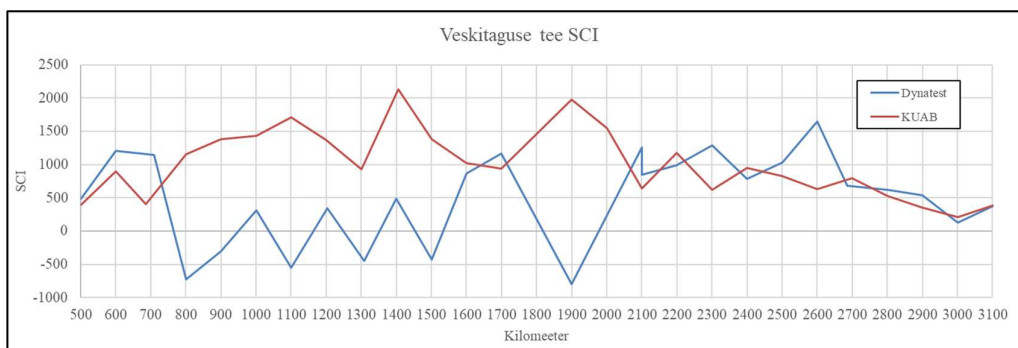


Joonis 3.12. Veskitaguse tee kandevõimemõõtmise võrdlustulemused.

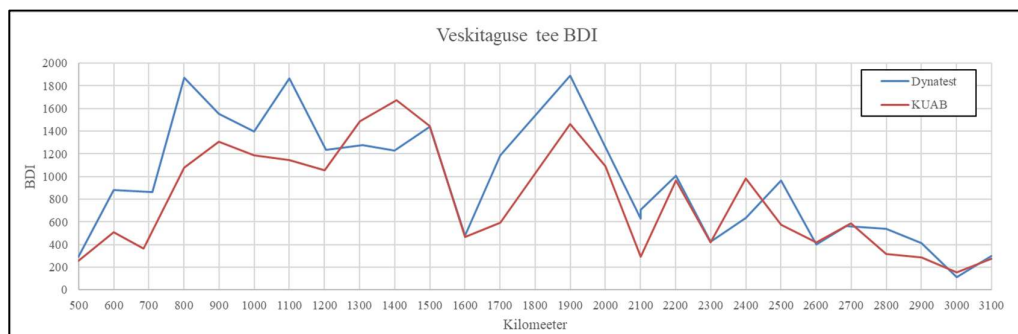
Vaadates nii Tankisilla tee kui Veskitaguse tee SCI väärtusi joonistel 3.13 ja 3.14 nähtuvad nendelt piirkonnad, kus mõõtmise ajal oli Dynatesti seadmel ületatud D0 anduri mõõtepiirkond ning kus saadi 300 mm anduriga D0 anduri näidule mittevastav tulemus: esimesel puhul võib selleks hinnata esimest 400 m, teisel puhul vahemikku 500...2000 m. Muud vajumikausi parameetrid (vahemik 300...600 mm ehk BDI ja 1200...1500 mm ehk BCI) on omavahel paremini võrreldavad ning on üpriski heas korrelatsioonis (joonised 3.15 ja 3.16).



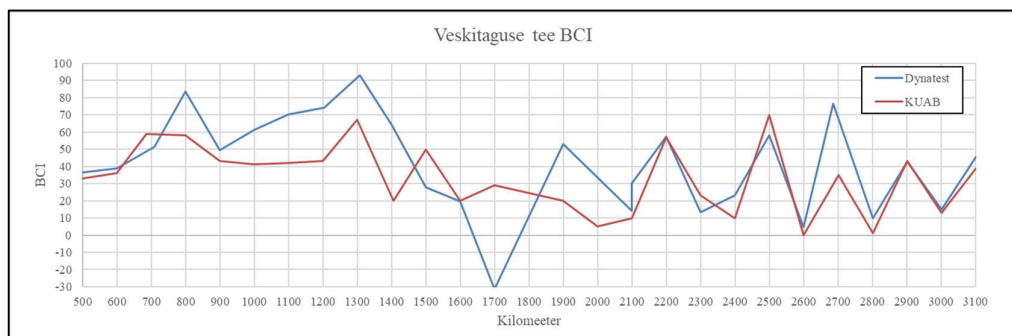
Joonis 3.13. Tankisilla tee SCI väärtuste võrdlus.



Joonis 3.14. Veskitaguse tee SCI väärtuste võrdlus.

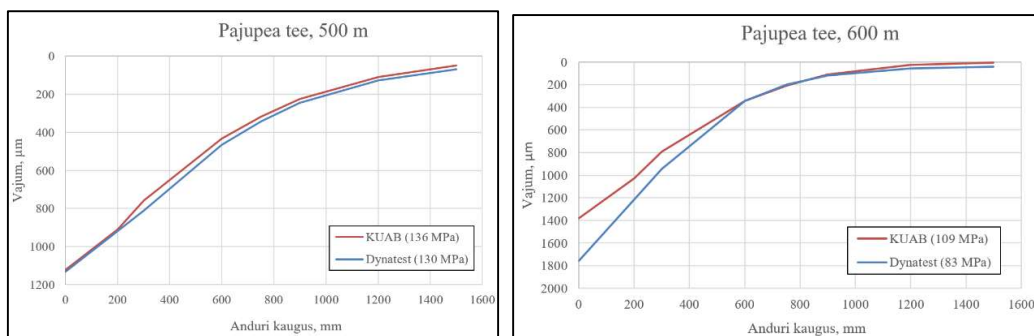


Joonis 3.15. Veskitaguse tee BDI väärtuste võrdlus.



Joonis 3.16. Veskitaguse tee BCI väärtuste võrdlus.

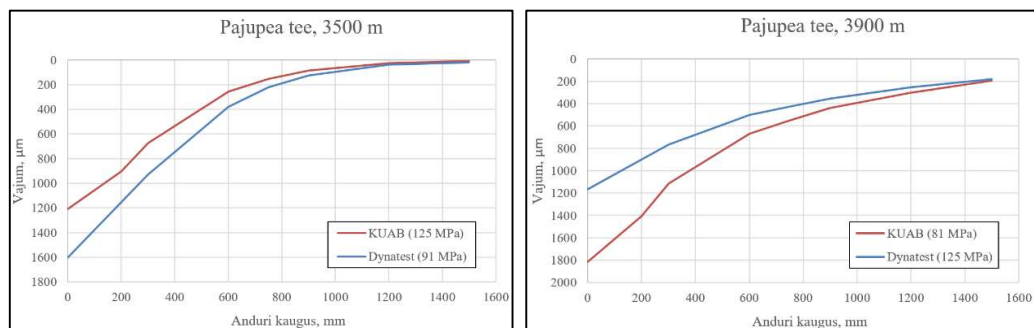
Hindamaks mõõtmistulemusi detailsemalt ning võrdlemaks seadmeid täpsemalt, saab vaadata erinevate individuaalsete mõõtmispunktide juures vajumikaussi, s.t seda, mis väärtusi andurid on näidanud. Joonisel 3.17 on esitatud Pajupea tee vajumikausside võrdlused asukohtades 500 m (KUAB 136 MPa, Dynatest 130 MPa) ja 600 m (KUAB 109 MPa, Dynatest 83 MPa). Punktis „500 m“ on vajumikaussid sisuliselt identsed ning punktis „600 m“ on andurite näidud alates 600 mm juures pea samad. Seega võib järeldada, et seadmete tulemused on omavahel vägagi võrreldavad, kuid erinevuse on tõenäoliselt tinginud teekatendi ülemise osa seisukord.



Joonis 3.17. Seadmete vajumikausside võrdlused Pajupea tee punktides „500 m” ja „600 m”.

Pajupea tee teises pooles tekkis mõõdetud kandevõimetes sisse suurem erinevus, kus KUABiga saadi enamasti kõrgemad kandevõimed, kuid mitte alati. Nt punktis „3500 m” saadi KUABiga 125 MPa, Dynatestiga 91 MPa, kuid punktis „3900 m” vastavalt 81 MPa ja 125 MPa (joonis 3.18). Viimases punktis on näha, et tagumiste andurite (1200 ja 1500 mm) näidud on väga kõrged, mis näitab, et kogu teekatend koos aluspinnasega on olnud liigniiske koosnedes niiskustundlikest materjalidest.

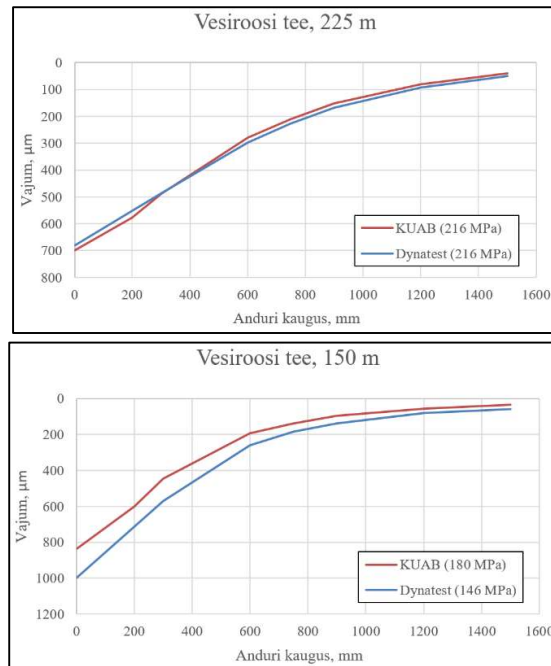
Kui enamasti saadi Pajupea teel KUABiga mõõtes kõrgemad kandevõimed, siis punktides 525, 1500, 3900, 3950 ja 4000 m oli tulemus vastupidine. Kõikide nende punktide ühisnimetajaks on väga kõrge 1500 mm juures oleva anduri väärtus (vahemikus 81...194 µm) ehk olukord, kus aluspinnas on nõrk. Kui viidatud punktid välja arvata, oli 1500 mm anduri keskmine näit KUABiga 27 µm ja Dynatestiga 45 µm, mis teiselt poolt näitab, et ühe nädalaga oli pinnaste veesisaldus tõusnud, mis on järelikult viinud ka madalama kandevõimeni nagu seda Dynatestiga ka mõõdeti.



Joonis 3.18. Seadmete vajumikausside võrdlused Pajupea tee punktides „3500 m” ja „3900 m”.

Pajupea tee mõõtmistulemuste erinevused joonisel 3.9 on pidanud tulenema sellest, et mõõdetud punktide asukohad tõenäoliselt ei klappinud 100% ning et kahe mõõtmise vahele jäi nädalane periood. Võrreldes erinevate punktide vajumikausse omavahel saab järeldada, et seadmed on üksteisega suhteliselt hästi võrreldavad ning mõlemad on edukalt kasutatavad nii teedevõrgu kui projektide tasemel kandevõimemõõtmisteks.

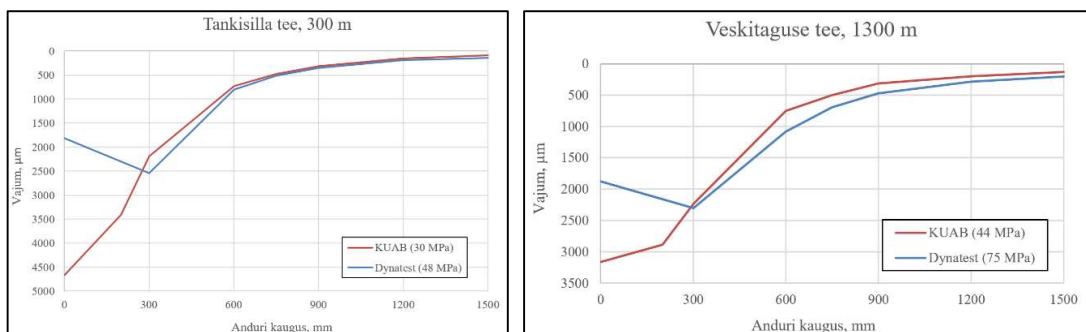
Pajupea tee vajumikaussidest tulnud järeldusi toetavad ka Vesiroosi tee tulemused. Joonisel 3.19 on võrreldud punkte „225 m”, kus kandevõimed on olnud identsed ja „150 m”, kus KUABiga on saadud väiksemad vajumid, aga kus vajumikauss viitab, et hilisema mõõtmise korral on pinnas pidanud olema suurema niiskussisaldusega, s.t väiksema kandevõimega.



Joonis 3.19. Seadmete vajumikausside võrdlused Vesiroosi tee punktides „225 m” ja „150 m”.

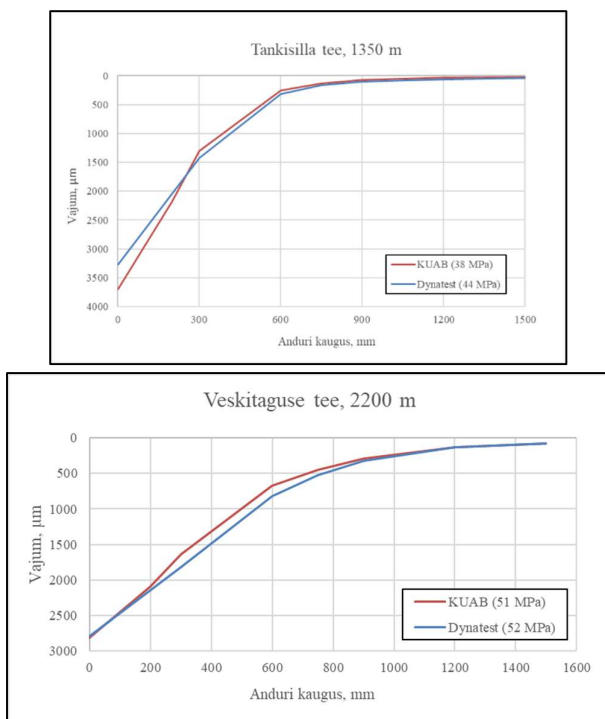
Põhimõttelised ja suured erinevused seadmete vahel ilmnevad, kui vaadata Tankisilla tee ja Veskitaguse tee madala kandevõimega punkte (alla 50 MPa). Joonise 3.20 vasakpoolisel graafikul on kujutatud Tankisilla tee punkt „300 m”, kus KUABi alusel saadakse kandevõimeks 30 MPa, kuid Dynatestiga 48 MPa ning joonise 3.20 parempoolisel graafikul Veskisilla tee punkt „1300 m”, kus tulemused on vastavalt 44 ja 75 MPa.

Allikas [14] toodi välja, et kandevõime alla 30 MPa on väga nõrk, 30...60 MPa nõrk ning 60...80 MPa rahuldav ehk antud mõõtmistulemuste näol on tegemist suure erinevusega. Ka Dynatestiga oleks saanud sarnase tulemuse kui KUABiga, kuid seda takistas kasutatava siirdeanduri liiga väike amplituud, mistõttu vaadates lihtsalt kandevõime numbrilist väärtust saab ette vale kujutelma, et olukord ei olegi „väga nõrk” või et see on „rahuldav”, kuigi peaks olema „nõrk”. Kui Dynatesti mõõtetulemuste põhjal joonistada välja vajumikauss, selgub hoopis teine olukord, mille põhjal saab anda ka adekvaatsema tulemuse. KUABi siirdeandurite pikem amplituud võimaldab probleemideta mõõta ka nõrkasid katendeid (kruusateed, metsateed) 50 kN koormusega, kuid Dynatesti kasutamisel peaks seal koormust vähendama või üritama järeltötluse käigus D0 anduri näitu ekstrapoleerida.



Joonis 3.20. Seadmete vajumikausside võrdlused Tankisilla tee punktist „300 m” ja Veskitaguse tee punktist „1300 m”.

Nii Tankisilla kui Veskitaguse teedel leidis punkte, mille vajumikaussid on sisuliselt identsed, nt joonis 3.21, mis olid Dynatestiga mõõtes madalaima võimaliku kandevõimega ilma, et vajumikauss oleks sees anomaaliaid. Tankisilla teel saadi Dynatestiga 44 MPa (millele puhul 49.5 kN juures  $D_0 = 3722 \mu\text{m}$ ), KUABiga 38 MPa (48.7 kN juures  $D_0 = 3701 \mu\text{m}$ ), Veskitaguse teel saadi Dynatestiga 52 MPa (49.13 kN juures  $D_0 = 2790 \mu\text{m}$ ), KUABiga 51 MPa (48.7 kN juures  $D_0 = 2871 \mu\text{m}$ ). Nendest andmetest järeldub, et normkoormusega 50 ( $\pm 2$ ) kN mõõtes on minimaalne kandevõime, mida Dynatestiga mõõta saab, 45...50 MPa. See ei tähenda, et Dynatesti ei oleks võimalik kruusateedel üldse kasutada, kuid see nõuab tulemuste hindamisel kas järeltöötlust või mõõtmise ajal koormuse vähendamist.



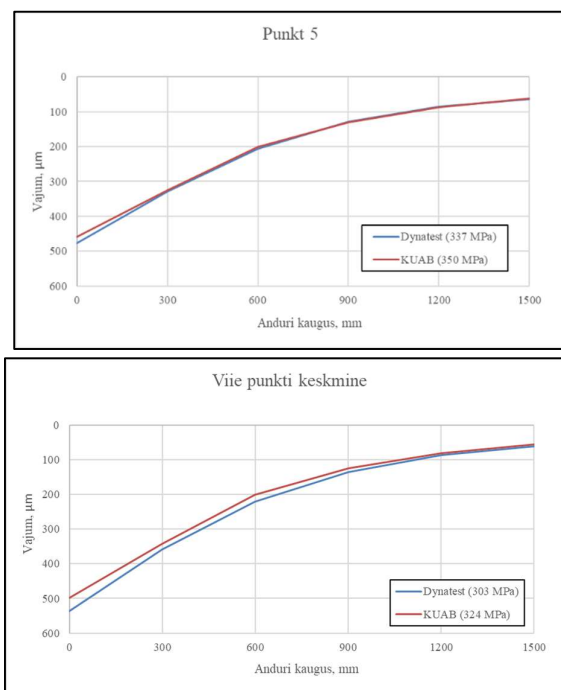
Joonis 3.21. Tankisilla teel punktis 1350 m ja Veskitaguse teel punktis 2200 m olid seadmete vajumikaussid sisuliselt identsed.

Lisaks eelnevalt analüüsitud võrdlusmõõtmistele, on võimalik võrdluseks kasutada veel ka viite mõõtepunkti ühelt Viljandi tänavalt 2017. a kevadest. KUABiga tehti mõõtmised 12.04.17 Dynatestiga võrreldes sarnase õhutemperatuuri juures enam-vähem



samadest punktidest. Tegemist ei ole küll konkreetselt võrdlusmõõtmistega ning neid ei tehtud kontrollitult samadest punktidest, kuid teatud ülevaate võimaldavad tulemused anda. Mõõteväärtused on võrdsustatud omavahel kasutades allikas [15] toodud aluseid (temperatuuriparandused ning elastsusmoodul). Arvutatud elastsusmoodulid võrdluspunktide kaupa on esitatud tabelis 3.1.

Võrdlusest nähtub, et keskmine esinevus mõõtetulemuste osas on umbes 7%, kuid viimase punkti (punkt 5) vajumikauss oli pea identne (joonis 3.22 vasakpoolne graafik). Joonise 3.22 parempoolsel graafikul on esitatud viie punkti keskmised vajumikausside väärtused, millest nähtub, et KUAB kipub näitama veidi kõrgemat kandevõimet, kuid erinevus on väike.

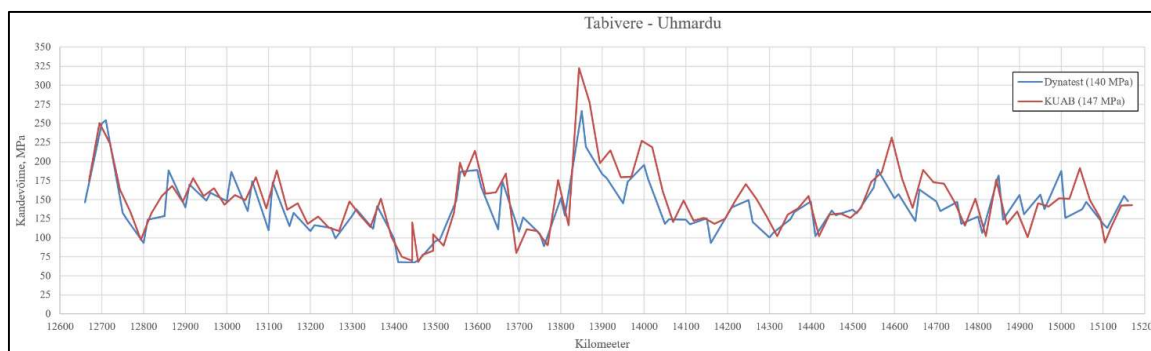


Joonis 3.22. Vajumikausside võrdlus Viljandi tänaval, esimene joonis võrdleb punkti 5, mis on pea identne ning teine viie punkti keskmisi väärtusi, kus kandevõime erinevus on ca 7%.

Tabel 3.1. Viljandi tänaval saadud mõõtmistulemused

Punkti nr	Seade	Jõud	D0	D30	D60	D90	D120	D150	E-moodul	Erinevus,%
1	KUAB	50.2	585	365	195	117	76	52	273	7
	Dynatest	50.7	635	395	220	127	81	60	254	
2	KUAB	50.5	470	307	166	93	56	38	342	10
	Dynatest	50.7	524	331	187	106	65	44	308	
3	KUAB	50.7	469	326	191	115	71	48	344	10
	Dynatest	50.4	514	348	215	133	86	59	312	
4	KUAB	50.1	510	384	253	166	110	76	313	3
	Dynatest	50.5	528	392	273	180	116	80	305	
5	KUAB	50.5	459	325	201	130	88	62	350	4
	Dynatest	50.5	477	328	205	129	86	64	337	
<b>Keskmine erinevus: ca 7%</b>										

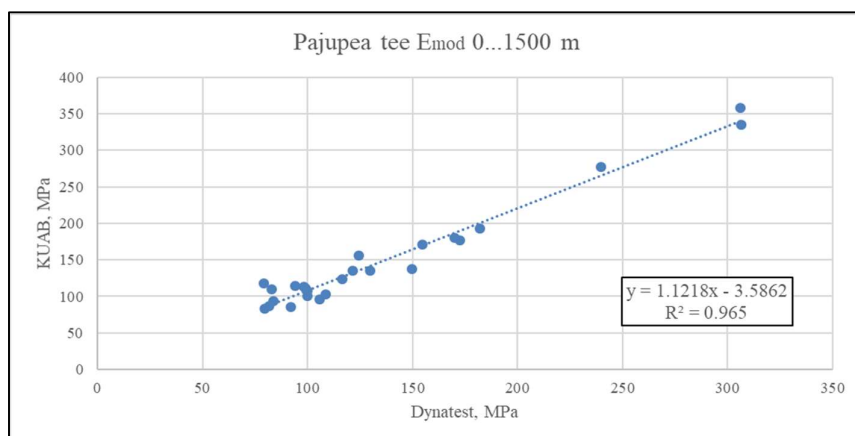
Veel ühe võrdlusena saab kasutada riigitee nr 14209 Tabivere – Uhmardu km 12.6...15.2 mõõtmistulemusi, kus KUABiga mõõdeti kuupäeval 12.05.2016 ja Dynatestiga 13.05.2016. Kandevõime võrdlustulemused on esitatud joonisel 3.24. KUABi tulemustest arvatatud keskmine kandevõime oli 147 MPa ja Dynatestil 140 MPa ehk erinevuseks ca 5%. Ka nendest andmetest on näha, et KUAB kipub näitama veidi kõrgemaid kandevõimeid, antud teel ühtegi väga nõrka punkti ei olnud, mistõttu seda võrdlust teha ei saa.



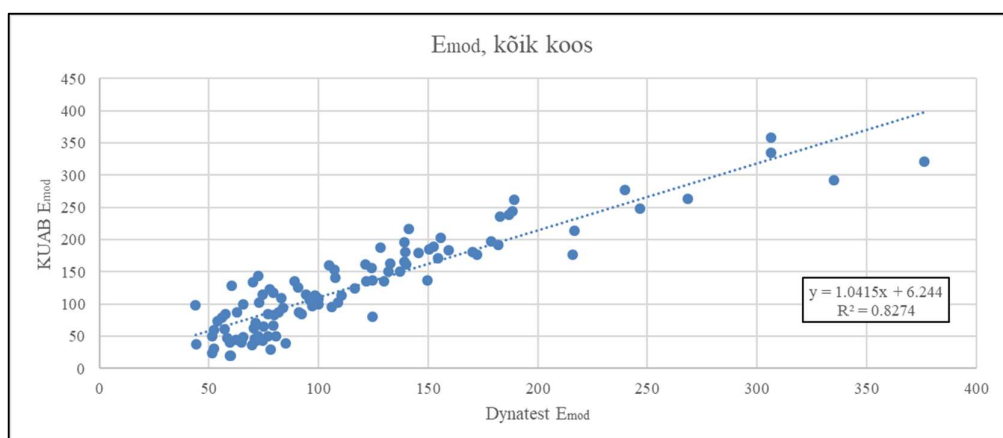
Joonis 3.24. Kandevõimemõõtmiste võrdlus riigiteel nr 14209 Tabivere – Uhmardu km 12.6...15.2.

Lisaks eelnevale saab seadmete omavahelise võrdluse esitada ka punkt-punkti kaupa, mis võimaldab koostada sõltuvusgraafikud ja -valemid. Kõige kõrgem korrelatsioon ilmneb Pajupea tee vahemikus 0...1500 m, kus  $R^2 = 0,965$  (joonis 3.25) ning kõige madalam Vesiroosi teel, kus  $R^2 = 0.03$ . Tankisilla ja Veskitaguse tee kandevõimeid ei saa taoliselt võrrelda, kuna D0 anduri siirded ületasid väga mitmest punktis Dynatesti mõõtepiirkonna, kuid kui sellest hoolimata siiski arvestada võrdluses kõikide Rae vallas

mõõdetud teede punktidega, saadakse  $R^2 = 0.83$ , mis on hea korrelatsioon (joonis 3.26).

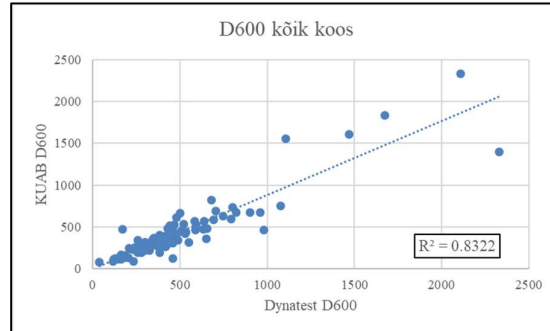
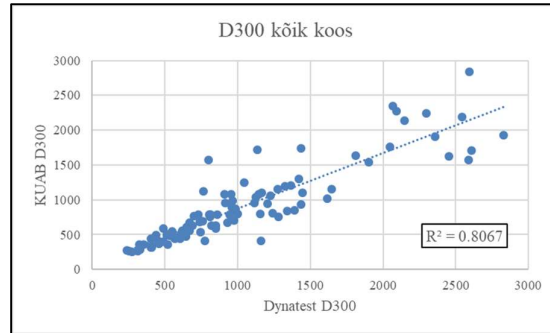


Joonis 3.25. Pajupea tee punktide 0...1500 m kandevõime (MPa) Dynatest vs KUAB võrdlus.

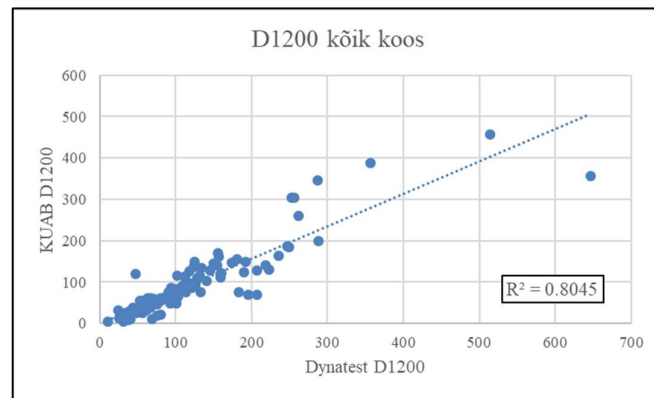


Joonis 3.26. Rae valla teedel mõõdetud kandevõime (MPa) Dynatest vs KUAB võrdlus.

Arvestades seda, et suuremate läbipainete puhul ületati Dynatesti D0 anduri mõõtepiirkond, saaks teha võrdlust kogu andmehulgaga alates andurist D300. Joonistel 3.27...3.29 on esitatud korrelatsioonigraafikud anduritele D300 (võrdlusest on eemaldatud punktid, kus KUAB registreeris siirde üle 3000  $\mu\text{m}$ ), D600 ja D1200, mille puhul nähtub, et  $R^2$  ületab kõigil juhtudel 0.8 ehk korrelatsioon on hea.



Joonised 3.27 ja 3.28. Rae valla teede D300 ja D600 anduri mõõtepunktide omavaheline võrdlus.



Joonis 3.29. Rae valla teede D1200 anduri mõõtepunktide omavaheline võrdlus.

#### Kokkuvõtte Dyantesti ja KUABiga tehtud võrdlustest

Nii kirjandusest leiduva info põhjal, varasemalt Eestis kui käesoleva projekti tarbeks tehtud mõõtmiste põhjal saab järeldada, et mõlemad seadmed on kandevõimemõõtmisteks sobilikud, kuid KUAB kipub andma kõrgemaid väärtusi (keskmiselt 5...10% rohkem). Selle põhjuseks peab olema kahemassilise süsteemi eripära, mistõttu koormuse avaldumise ajaline kestvus on võrreldes ühemassilise süsteemiga pikem. Mõõtmistulemuste erinevused jäävad siiski mõõtevea piiridesse (kui nii võib väljendada) või teisiti öeldes on mõlemad piisavalt täpsed võimaldamaks hinnata teekatendi kandevõimet ja selle struktuurset seisukorda.

Kevadisel või sügisel ajal, kui kruuskattega teede katted on märjemad ning kandevõimed madalamad, on KUAB mõõtmiseks sobilikum peamiselt seoses kasutatavate siirdeandurite pikema amplituudiga, mis võimaldab normkoormuse ( $50 \pm 2$  kN) juures mõõta oluliselt madalamaid kandevõimeid. Dynatestil tuleb „piir“ ette ca

45...50 MPa juures, mil deformatsioon ületab anduri võimalikku piiri. Siiski ka sellisel juhul on võimalik tuletada tegelikult toimunud vajumit, kuid selleks tuleb välja joonistada vajumikauss ning ekstrapoleerida koormustalla all oleva anduri näit. Dynatesti anduri probleemi on võimalik lahendada, kui mõõtmise ajal vähendatakse kasutatavat koormust selliselt, et tekkiv deformatsioon jääks anduri mõõtepiirkonda.

KUABi peamine eelis on kasutusel olevad siirdeandurid, mis võimaldavad mõõta suuremat amplituuti, kuid lisaks ei ole need ka nii tundlikud mõõdetava pinna ebatasasusele. Täiendav väike eelis on KUABi puhul ka sektsioonidesse jagatud koormustald, mis mugandub ebatasasema mõõtepinnaga paremini.

## **KASUTATUD ALLIKAD**

1. Kruusateede remondi projekteerimise juhised (MA kavand 2019);
2. Riigiteede pealiskatete vastuvõtukatsetel teostatavate teekatete omaduste mõõtmise metoodika ning mõõteseadmetele esitatavad nõuded. MA 2016-015;
3. Madala liikluskagedusega teedele katendi projekteerimise juhendi loomine lähtuvalt tee tegelikust olukorrast III osa. Metoodika täiendamine ja testimine teeobjektidel. Lõpparuanne. Tallinna Tehnikakõrgkool, Tallinn 2019;
4. Croveti, J. A., Shahin, M. Y., and Touma, B. E., "Comparison of Two Falling Weight Deflectometer Devices, Dynatest 8000 and KUAB 2M-FWD," Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1026, A. J. Bush III and G. Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 59-69;
5. [Võrgumaterjal]  
[https://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Pavement/Non-destructive Testing-Technologies/FWD-Testing-Evaluation](https://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Pavement/Non-destructive-Testing-Technologies/FWD-Testing-Evaluation)  
(kasutatud 08.11.19);
6. Stryk, J., Pospisil, K. Non-destructive testing of pavement conditions. Presentatsioon CERTAIN workshop, Tallinn 05.06.2009;
7. Technical Description of Heavy Weight Deflectometer KUAB 150. KUAB;
8. Royal Institute of Technology, 1980, Testing Different FWD Loading Times, Bulletin 1980:8, Department of Highway Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm;
9. Shahin, M.Y., 1994, Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots, Chapman & Hall, New York;
10. Federal Aviation Administration (FAA), 2004, Use of Nondestructive Testing Devices in the Evaluation of Airport Pavements, Advisory Circular No. 150/5370-11A, Federal Aviation Administration, Washington, D.C;
11. Lynne H. Irwin presentatsioon 6th ALACPA Meeting Sao Paulo, Brazil, October 28, 2009 „FWD Calibration Centers: Equipment, Software, and Protocol“;
12. FWD Calibration Center and Operational Improvements: Final Report. U.S Department of Transportation. Federal Highway Administration;
13. Touma, B.E., Croveti, J., and Shahin, M.Y., 1990, "The effect of various load distributions on the back calculated moduli values in flexible pavements", Transportation

Research Board No. 1293, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 31-41;

14. Teeleht, sügis 2019/nr 97 „Uus lähenemine kruusateede remondile“;

15. Pudoituspainolaitemittaus (PPL-mittaus). TPPT Menetelmäkuvaus. VTT Yhdyskuntatekniikka, Espoo 2000.

## LISA 7 Läti vastused FWD kasutamiseiga seotud küsimustele

**Subject:**RE: FWD measurements in Latvia?

**Date:**Thu, 24 Sep 2020 10:40:11 +0000

**From:**Andrejs Taranovs <[Andrejs.Taranovs@lvceli.lv](mailto:Andrejs.Taranovs@lvceli.lv)>

1. Dynatest Model 8002 FWD
2. Latvian State Roads done measurement by FWD for network level, road reconstruction design and some specific cases.
  - 2.1.Strategy department of Latvian State Roads are using HDM-4 road management software. FWD central deflection D1 data is one of many inputs for HDM-4 software.
  - 2.2.Latvian State Roads provides road reconstruction designers with fresh FWD data. As far as I know designers don't use data. We plan to introduce a mandatory requirement for the designers to analyze FWD data.
  - 2.3.Road Inspection and Expertise Department of Latvian State roads in specific cases (for example defects on new road) are using FWD data in combination with other data like rut depth, GPR and laser scanner data. We usually use FWD data without any correction, but it is important that data for analyses was measured in the same day. We use Boussinesq's equations for calculating E-moduli of road pavement and surface moduli in different equivalent depth of the pavement. We use Cumulative-sum method with FWD data for identification of uniform road sections.
3. We use Boussinesq's equations for calculating E-modulus of road pavement and surface modulus in different equivalent depth of pavement.
  - 3.1.FWD data only (stress, deflection, deflection distance from load center)
  - 3.2.We usually use FWD data without any correction.
4. We don't have any probated method to test road pavement materials moduli , therefore our road pavement methodology material moduli are assumptions. We didn't try to find correlation of something theoretic and measured, but we went other way. We use road pavement methodology only to get thicknesses of road pavement layers, but quality control of all unbound layers bearing capacity is based on German RStO 2012.
5. Road Inspection and Expertise Department of Latvian State roads is using Boussinesq's equations for calculating surface modulus approximate under road pavement. We have done it only in specific cases.

Best regards

AndrejsTaranovs

Expert of Road Inspection and Expertise Department

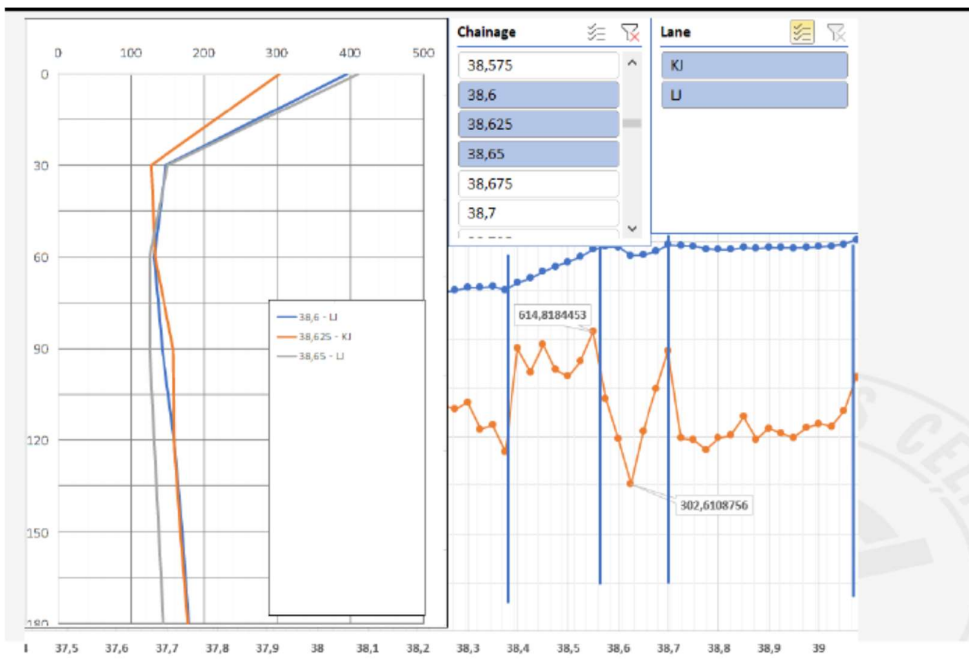
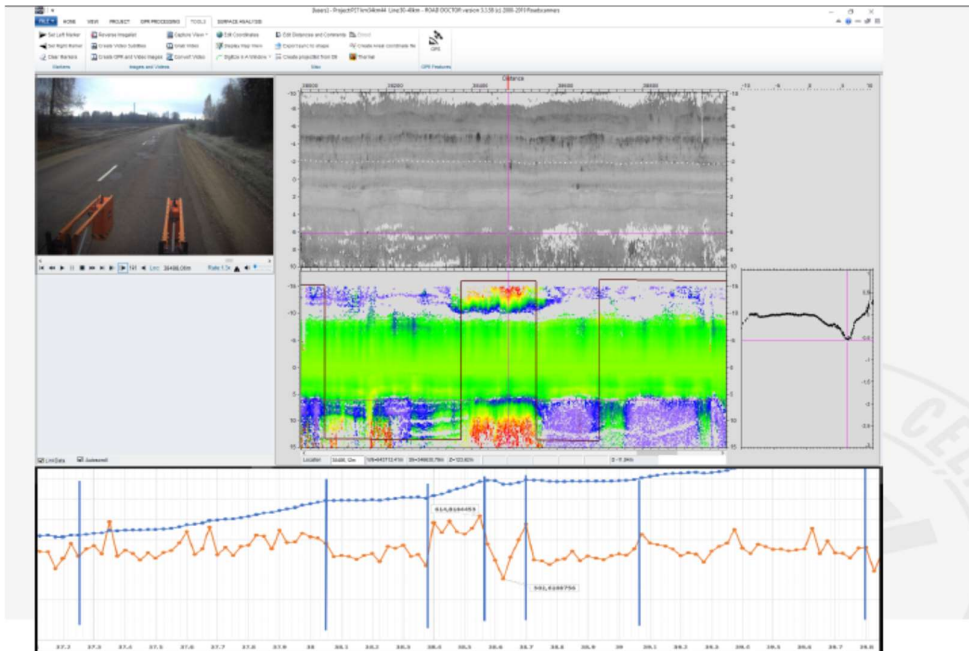
Road Competence Centre

Latvian State Roads

# FWD DATA

Speed (km/h)	Lane	Start and Time	Channel	Struc	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Location	Longitude	Height	Comment	Asphalt	Surface	As	Surf	Pathname
35.875	LI	35.875	702	227.8	188.1	138.7	86.1	75.1	74.2	42.8	31.23802	26.55162	127.021	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	704	712.1	232.4	158.4	98.2	78.1	78.1	47.4	31.23803	26.55218	128.304	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	706	716.7	238.1	167.1	98.7	78.9	87.9	48.8	31.23809	26.55303	129.686	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	708	721.3	243.8	173.8	101.7	80.1	88.1	49.8	31.23811	26.55359	131.068	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	710	725.9	249.5	180.5	104.5	80.9	88.9	49.7	31.23813	26.55415	132.450	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	712	730.5	255.2	187.2	107.2	81.2	89.2	49.6	31.23815	26.55471	133.832	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	714	735.1	260.9	193.9	110.2	81.9	89.9	49.5	31.23817	26.55527	135.214	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	716	739.7	266.6	200.6	113.2	82.6	90.6	49.4	31.23819	26.55583	136.596	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	718	744.3	272.3	207.3	116.2	83.3	90.3	49.3	31.23821	26.55639	137.978	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	720	748.9	278.0	214.0	119.2	84.0	90.0	49.2	31.23823	26.55695	139.360	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	722	753.5	283.7	220.7	122.2	84.7	90.7	49.1	31.23825	26.55751	140.742	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	724	758.1	289.4	227.4	125.2	85.4	90.4	49.0	31.23827	26.55807	142.124	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	726	762.7	295.1	234.1	128.2	86.1	90.1	48.9	31.23829	26.55863	143.506	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	728	767.3	300.8	240.8	131.2	86.8	90.8	48.8	31.23831	26.55919	144.888	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	730	771.9	306.5	247.5	134.2	87.5	90.5	48.7	31.23833	26.55975	146.270	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	732	776.5	312.2	254.2	137.2	88.2	90.2	48.6	31.23835	26.56031	147.652	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	734	781.1	317.9	260.9	140.2	88.9	90.9	48.5	31.23837	26.56087	149.034	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	736	785.7	323.6	267.6	143.2	89.6	90.6	48.4	31.23839	26.56143	150.416	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	738	790.3	329.3	274.3	146.2	90.3	90.3	48.3	31.23841	26.56199	151.798	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	740	794.9	335.0	281.0	149.2	91.0	90.0	48.2	31.23843	26.56255	153.180	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	742	800.0	340.7	287.7	152.2	91.7	90.7	48.1	31.23845	26.56311	154.562	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	744	805.1	346.4	294.4	155.2	92.4	90.4	48.0	31.23847	26.56367	155.944	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	746	810.2	352.1	301.1	158.2	93.1	90.1	47.9	31.23849	26.56423	157.326	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	748	815.3	357.8	307.8	161.2	93.8	90.8	47.8	31.23851	26.56479	158.708	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	750	820.4	363.5	314.5	164.2	94.5	90.5	47.7	31.23853	26.56535	160.090	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	752	825.5	369.2	321.2	167.2	95.2	90.2	47.6	31.23855	26.56591	161.472	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	754	830.6	374.9	327.9	170.2	95.9	90.9	47.5	31.23857	26.56647	162.854	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	756	835.7	380.6	334.6	173.2	96.6	90.6	47.4	31.23859	26.56703	164.236	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	758	840.8	386.3	341.3	176.2	97.3	90.3	47.3	31.23861	26.56759	165.618	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	760	845.9	392.0	348.0	179.2	98.0	90.0	47.2	31.23863	26.56815	167.000	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	762	851.0	397.7	354.7	182.2	98.7	90.7	47.1	31.23865	26.56871	168.382	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	764	856.1	403.4	361.4	185.2	99.4	90.4	47.0	31.23867	26.56927	169.764	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	766	861.2	409.1	368.1	188.2	100.1	90.1	46.9	31.23869	26.56983	171.146	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	768	866.3	414.8	374.8	191.2	100.8	90.8	46.8	31.23871	26.57039	172.528	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	770	871.4	420.5	381.5	194.2	101.5	90.5	46.7	31.23873	26.57095	173.910	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	772	876.5	426.2	388.2	197.2	102.2	90.2	46.6	31.23875	26.57151	175.292	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	774	881.6	431.9	394.9	200.2	102.9	90.9	46.5	31.23877	26.57207	176.674	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	776	886.7	437.6	401.6	203.2	103.6	90.6	46.4	31.23879	26.57263	178.056	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	778	891.8	443.3	408.3	206.2	104.3	90.3	46.3	31.23881	26.57319	179.438	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	780	896.9	449.0	415.0	209.2	105.0	90.0	46.2	31.23883	26.57375	180.820	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	782	902.0	454.7	421.7	212.2	105.7	90.7	46.1	31.23885	26.57431	182.202	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	784	907.1	460.4	428.4	215.2	106.4	90.4	46.0	31.23887	26.57487	183.584	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	786	912.2	466.1	435.1	218.2	107.1	90.1	45.9	31.23889	26.57543	184.966	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	788	917.3	471.8	441.8	221.2	107.8	90.8	45.8	31.23891	26.57599	186.348	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	790	922.4	477.5	448.5	224.2	108.5	90.5	45.7	31.23893	26.57655	187.730	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	792	927.5	483.2	455.2	227.2	109.2	90.2	45.6	31.23895	26.57711	189.112	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	794	932.6	488.9	461.9	230.2	109.9	90.9	45.5	31.23897	26.57767	190.494	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	796	937.7	494.6	468.6	233.2	110.6	90.6	45.4	31.23899	26.57823	191.876	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	798	942.8	500.3	475.3	236.2	111.3	90.3	45.3	31.23901	26.57879	193.258	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	800	947.9	506.0	482.0	239.2	112.0	90.0	45.2	31.23903	26.57935	194.640	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	802	953.0	511.7	488.7	242.2	112.7	90.7	45.1	31.23905	26.57991	196.022	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	804	958.1	517.4	495.4	245.2	113.4	90.4	45.0	31.23907	26.58047	197.404	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	806	963.2	523.1	502.1	248.2	114.1	90.1	44.9	31.23909	26.58103	198.786	penetration per 10 mm	31	10.01		802	F07 2310 U (.msh)	
35.875	LI	35.875	808	968.3	528.8	508.8	251.2	114.8	90.8	44.8	31.23911	26.58159	200.168	penetration per 10 mm	31	10.01				





## LISA 8 Leedu vastused FWD kasutamise seotud küsimustele

**From:** Audrius Vaitkus [mailto:audrius.vaitkus@vgtu.lt]

**Sent:** 15 October, 2020 9:24

**Subject:** RE: FWD measurements in Lithuania?

1. We are using FWD „Primax 2500“ with the possibility of applying a load of up to 250 kN. There is also another institution in Lithuania that has almost 20 year old FWD „Dynatest“ with the possibility of applying a load of up to 150 kN.

2. VGTU uses FWD exclusively at the project level. However, we have previously had two projects in Vilnius and Šiauliai, where we conducted research of street network pavement structures with FWD to determine structural indicators. Also, for the last two years, we have been conducting measurements with FWD and TSD (IBDiM) on roads of different service ages and on newly built roads.

3. For calculation of the surface modulus  $E_0$  based on the FWD measurement data we are using equation below with accordance to COST 336 (European Commission and Directorate General Transport 2005):

$$E_0 = \frac{2(1-\nu^2)\sigma_0 a}{d_{0,n}}$$

where:  $\nu$  – Poisson ratio;  $\sigma_0$  – normalized load [MPa];  $a$  – diameter of load plate;  $d_{0,n}$  – normalized deflection under the load plate.

The equation above is used after temperature and load normalization of deflection. For load normalization we are using equation below with accordance to COST 336 (European Commission and Directorate General Transport 2005):

$$d_{0,n} = \frac{L_{norm}}{L_{applied}} d_0;$$

where:  $L_{norm}$  – target load (normally 50 kN for roads);  $L_{applied}$  – actual load during the measurement [kN];  $d_0$  – actual measured deflection [mm].

For the normalization of deflection to the temperature of 20 °C we are using equation, based on research conducted in Lithuania (A. Motiejūnas, M. Paliukaitė, A. Vaitkus, D. Čygas, and A. Laurinavičius. 2010. “Research on the Dependence of Asphalt Pavement Stiffness Upon the Temperature of Pavement Layers.” *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5 (1): 50–54):

$$t_k = 10^{-0,000221 \cdot h - 1,02239 \cdot (T_A - 20)}$$

where:  $t_k$  – normalization factor (deflection is normalized by multiplying by normalization factor);  $h$  – total thickness of asphalt pavement [mm];  $T_A$  – actual temperature of the asphalt pavement during the measurement [°C] (normally measured in the mid-depth).

For the backcalculation of separate layers E-modules, based on FWD measurements we are using specialized software “Elmod”.

If the subgrade soils are found to be sensitive to the hydrothermal mode, it is estimated through seasonality factors if software “Elmod” is used for backcalculation of layers E-modules. For the most accurate estimation of hydrothermal mode influence to the older structures we performing FWD measurements at the different seasons of the year. From 2019, Lithuanian document for design of standardized pavement structures KPT SDK 19 specify that in case of frost-sensitive subgrade soils, soil hydraulic stabilization, improvement or other solutions must be applied to ensure that the bearing capacity of the pavement structure meets the requirements throughout the entire service life. Thus, seasonality does not need to be taken into account.

4. Our experience shows that the static and dynamic E-modulus has strong correlation (when measuring E-modulus on asphalt pavement surface and calculating  $E_{v2}$  of unbound base layer), however, all available measurement data should be systematized and analyzed to determine the exact correlation. It should also be

mentioned that so far we have not had data from newly built roads. We should also carry out laboratory tests to determine the E-modules of asphalt layers by the end of this year.

For the pavement design we are using dynamic E-modules for the asphalt fatigue evaluation while for the unbound layers and subgrade permanent deformation evaluation we are using static E-modules. In this case dynamic E-modulus can be converted to static E-modulus in accordance with German methodology FGSV 433 C 2.1.

5. Deflections at different distances from the load center are used as input data for backcalculation of layers E-modules when specialized software is used. Also, we have previously had two projects in Vilnius and Šiauliai, where we conducted research of street network pavement structures with FWD to determine structural indicators, which are calculated directly from deflections at different distances from the load center in accordance with COST 336 (European Commission and Directorate General Transport 2005).

We would like to note that we have spent the last 2 years developing the pavement structure design model and software ViaStructura. Please see the presentation attached.



# VIASTRUCTURA



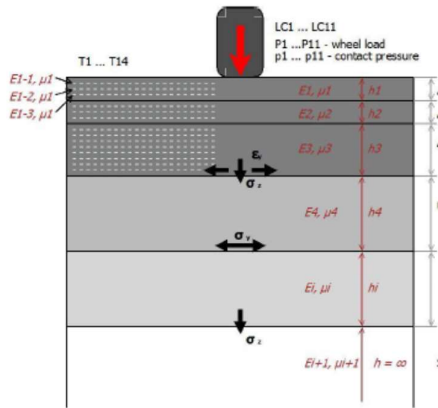
VILNIAUS GEDIMINO  
TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS  
KELIŲ TYRIMO INSTITUTAS



## ASPHALT PAVEMENT STRUCTURE DESIGN MODEL AND SOFTWARE ViaStructura

### DESIGN CONCEPT

- Only flexible pavement structures
- Mechanistical-Empirical method (major characteristics – Stiffness and Fatigue)
- Multilayer, isotropic, linear elastic structure on infinite subgrade
- Boussinesq's equations (Stress, strain and displacement under a point load)
- Odemark's method (of equivalent thickness)
- Miner's Rule (cumulative damage model)



## MAYOR COMPONENTS

- Each layer stiffness modulus (for asphalt temperature and speed dependant)
- Each layer thickness
- Each layer Poisson's Ratio
- 2-22 t point load
- „-17,5°C“ ... „47,5°C“ asphalt temperatures
- Stress – asphalt bottom, hydraulically bound, unbound base, subbase and sugrade

## ASPHALT FATIGUE

- Bound layers (asphalt) – based on Austrian pavement structure design methodology RVS 03.08.68:

$$Nrib_{i-j} = \frac{k_1(T)}{F_{(\epsilon 6)}} \cdot \left( \frac{S_{mix}(T)}{\sigma_{v,i-j} \cdot \gamma_{AC}} \right)^{k_2(T)}$$

- $S_{mix}(T)$  – temperature-dependent stiffness modulus of asphalt mix (MN/m<sup>2</sup>);
- $\sigma_{v,i-j}$  – vertical stress under load level  $i$  and temperature range  $j$  (MN/m<sup>2</sup>);
- $\gamma_{AC}$  – safety factor;
- $F_{(\epsilon 6)}$  – fatigue factor depending on type of binder and strain of the asphalt layer at 10<sup>6</sup> load cycles (μm/m) determined by a four-point bending test according to LST EN 12697-24;
- $k_1(T), k_2(T)$  – temperature factors.

## BOUND BASE FATIGUE

- Bound (concrete) – based on German pavement structure design methodology RDO Asphalt 09:

$$Nrib_{i-j} = 10^{\frac{1}{5} \left( 84 - \frac{100 \cdot \gamma \cdot \sigma_{zz,i-j}}{\beta_{Bz}} \right)}$$

- $\sigma_{zz,i-j}$  – vertical stress under load level  $i$  and temperature range  $j$  (MN/m<sup>2</sup>);
- $\gamma$  – safety factor;
- $\beta_{Bz}$  – the flexural strength of the hydraulically bound layer (MPa).

## PERMANENT DEFORMATION OF UNBOUND LAYERS AND SUBGRADE

- Unbound – based on German pavement

structure design methodology RDO Asphalt 09 :

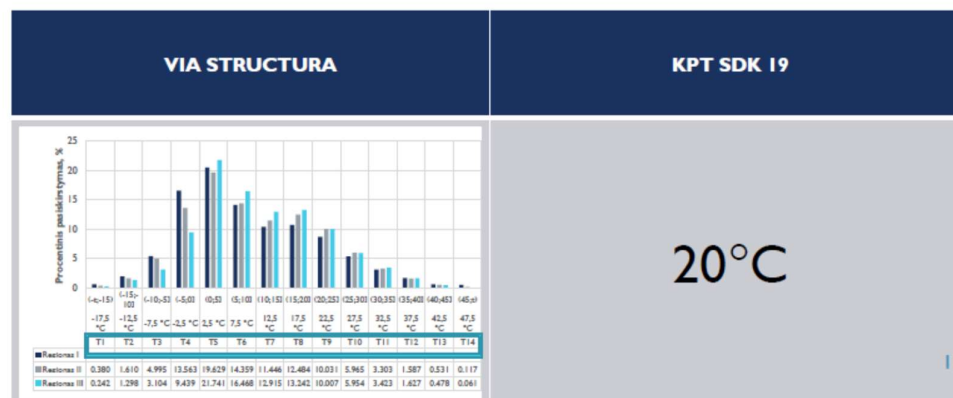
$$N_{rib,i-j} = 10^{\frac{1}{0.7} \left( \frac{0.00875 \cdot E_{p2}}{\sigma_{zz,i-j} \cdot \gamma} \right)}$$

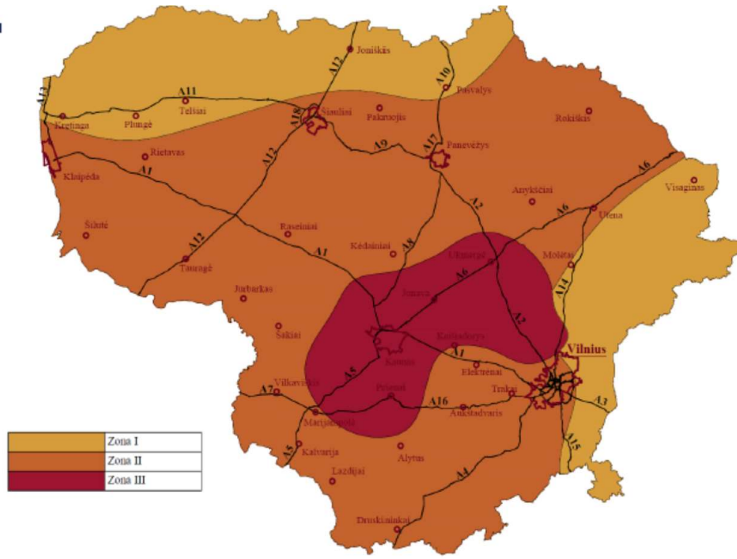
- $\sigma_{zz,i-j}$  – vertical stress under load level  $i$  and temperature range  $j$  (MN/m<sup>2</sup>);
- $\gamma$  – safety factor;
- $E_{p2}$  – the deformation modulus unbound layer/subgrade (Mpa).

## LOAD LEVELS



## ASPHALT TEMPERATURE LEVELS





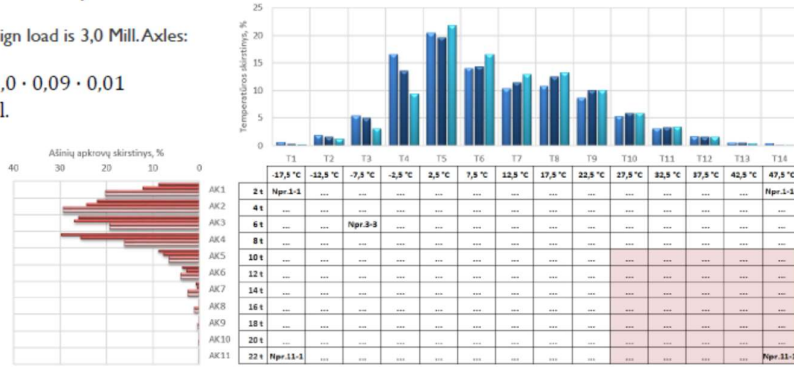
12

## 154 (11 X 14) COMBINATIONS OF DESIGN LOAD CALCULATION

$$N_{pr,i-j} = A_n \cdot AK_i \cdot T_j$$

- If total design load is 3,0 Mill. Axles:

$$N_{pr,1-1} = 3,0 \cdot 0,09 \cdot 0,01 = 0,003 \text{ Mill.}$$



## SUBDIVIDING PAVEMENT STRUCTURE LAYERS

Material name	Layer	Bottom depth (mm)	Thickness (mm)	Layer Avg. Depth (mm)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
AC 11 VS (PMB 45/80-55)	1	100	100	50	-17.1828	-12.1828	-7.2804	-2.3780	2.5341	7.5048	12.5146	17.5195	22.4219	27.3048	32.1975	37.0852	41.9877	46.9145
AC 11 VS (PMB 45/80-55)	2	200	100	150	-16.5915	-11.5915	-6.8710	-2.1506	2.5978	7.5139	12.5419	17.5559	22.2763	26.9409	31.6334	36.3120	41.0325	45.8228
AC 11 VS (PMB 45/80-55)	3	300	100	250	-16.0495	-11.0495	-6.4958	-1.9421	2.6562	7.5223	12.5669	17.5892	22.1429	26.6074	31.1165	35.6032	40.1569	44.8222
AC 11 VS (PMB 45/80-55)	4	400	100	350	-15.5493	-10.5493	-6.1495	-1.7497	2.7100	7.5300	12.5900	17.6200	22.0198	26.2995	30.6393	34.9491	39.3489	43.8987
AC 16 AS (50/70)	5	500	100	450	-15.0848	-10.0848	-5.8279	-1.5710	2.7600	7.5371	12.6114	17.6486	21.9055	26.0137	30.1963	34.3417	38.5985	43.0412
AC 16 AS (50/70)	6	600	100	550	-14.6513	-9.6513	-5.5278	-1.4043	2.8067	7.5438	12.6314	17.6753	21.7987	25.7469	29.7828	33.7748	37.8963	42.2409
AC 16 AS (50/70)	7	700	100	650	-14.2449	-9.2449	-5.2465	-1.2480	2.8505	7.5500	12.6502	17.7003	21.6987	25.4969	29.3951	33.2434	37.2418	41.4907
AC 16 AS (50/70)	8	800	100	750	-13.8625	-8.8625	-4.9817	-1.1009	2.8917	7.5559	12.6678	17.7238	21.6046	25.2615	29.0303	32.7432	36.6240	40.7846
AC 16 AS (50/70)	9	900	100	850	-13.5012	-8.5012	-4.7316	-0.9620	2.9306	7.5615	12.6845	17.7460	21.5157	25.0392	28.6858	32.2709	36.0405	40.1177
AC 16 AS (50/70)	10	1000	100	950	-13.1591	-8.1591	-4.4947	-0.8304	2.9674	7.5667	12.7003	17.7671	21.4314	24.8286	28.3594	31.8234	35.4877	39.4860
AC 32 PS (50/70)	11	1250	250	1125	-12.6004	-7.6004	-4.1080	-0.6155	3.0276	7.5753	12.7261	17.8015	21.2939	24.4849	27.8266	31.0929	34.5854	38.4547
AC 32 PS (50/70)	12	1500	250	1375	-11.8775	-6.8775	-3.6075	-0.3375	3.1055	7.5865	12.7595	17.8460	21.1160	24.0400	27.1370	30.1475	33.4175	37.1200
AC 32 PS (50/70)	13	1750	250	1625	-11.2269	-6.2269	-3.1571	-0.0873	3.1755	7.5965	12.7895	17.8860	20.9558	23.6396	26.5165	29.2968	32.3666	35.9190
AC 32 PS (50/70)	14	2000	250	1875	-10.6356	-5.6356	-2.7477	0.1401	3.2392	7.6056	12.8168	17.9224	20.8103	23.2757	25.9524	28.5235	31.4114	34.8273

## STIFFNESS MODULES OF SUBDIVIDED STRUCTURE LAYERS

Material name	Layer	Bottom depth (mm)	Thickness (mm)	Layer Avg. Depth (mm)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
AC 11 VS (PMB 45/80-55)	1	10.0	10.0	5.0	24562	22518	19884	17070	14348	11691	9107	6614	4389	2731	1715	1094	706	461
AC 11 VS (PMB 45/80-55)	2	20.0	10.0	15.0	24373	22236	19644	16941	14314	11686	9093	6596	4450	2823	1801	1166	762	501
AC 11 VS (PMB 45/80-55)	3	30.0	10.0	25.0	24200	21977	19425	16824	14282	11682	9080	6580	4505	2907	1880	1232	812	542
AC 11 VS (PMB 45/80-55)	4	40.0	10.0	35.0	24039	21738	19222	16715	14253	11678	9068	6565	4557	2985	1952	1296	882	595
AC 16 AS (50/70)	5	50.0	10.0	45.0	18252	17284	16040	14400	12631	10714	8748	6864	5322	3884	2513	1628	1051	668
AC 16 AS (50/70)	6	60.0	10.0	55.0	18174	17165	15952	14332	12612	10712	8740	6855	5360	3973	2627	1749	1136	724
AC 16 AS (50/70)	7	70.0	10.0	65.0	18094	17045	1586	14268	12594	10709	8733	6845	5396	4057	2756	1862	1216	777
AC 16 AS (50/70)	8	80.0	10.0	75.0	18020	16933	15789	14208	12577	10707	8727	6837	5429	4135	2878	1969	1291	826
AC 16 AS (50/70)	9	90.0	10.0	85.0	17950	16827	15687	14151	12561	10705	8720	6828	5461	4209	2993	2070	1361	873
AC 16 AS (50/70)	10	100.0	10.0	95.0	17883	16726	15591	14098	12546	10703	8714	6821	5491	4283	3102	2165	1428	944
AC 32 PS (50/70)	11	125.0	25.0	112.5	19039	16283	14467	12870	11429	9778	7987	6189	4946	3827	2806	1947	1267	948
AC 32 PS (50/70)	12	150.0	25.0	137.5	18634	15891	14238	12743	11399	9774	7975	6173	5008	3983	3011	2131	1494	1040
AC 32 PS (50/70)	13	175.0	25.0	162.5	18270	15539	14032	12628	11372	9771	7965	6159	5064	4123	3195	2369	1699	1123
AC 32 PS (50/70)	14	200.0	25.0	187.5	17939	15219	13845	12535	11348	9768	7955	6146	5115	4251	3363	2599	1885	1220
Crushed stone (0/45)	15	400.0	200.0	300.0	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Aggregate mix (0/16)	16	600.0	200.0	500.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Aggregate mix (0/5)	17	750.0	150.0	675.0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Stabilized soil	18	950.0	200.0	850.0	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
MR	19	-	-	-	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45

## 154 COMBINATIONS OF STRESS CALCULATION

From Boussinesq's equations:

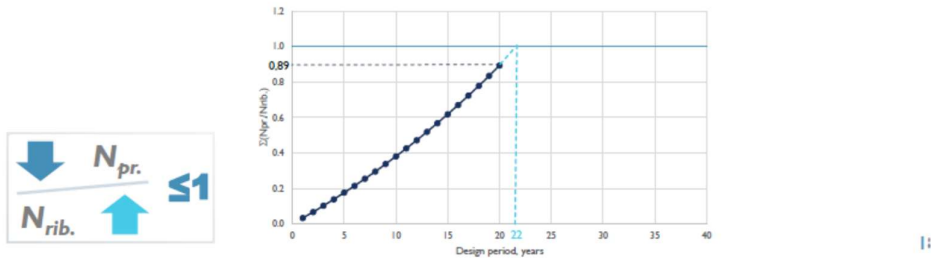
Load level	-17.5	-12.5	-7.5	-2.5	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
2 t (0:2)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4 t (2:4)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
6 t (4:6)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
8 t (6:8)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10 t (8:10)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
12 t (10:12)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
14 t (12:14)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
16 t (14:16)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18 t (16:18)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20 t (18:20)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22 t (20:n)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

$$Nrib_{1-1} = \frac{k_1(T1)}{F(\epsilon_6)} \cdot \left( \frac{S_{mix}(T1)}{\sigma_{v,1-1} \cdot \gamma_{AC}} \right)^{k_2(T1)}$$

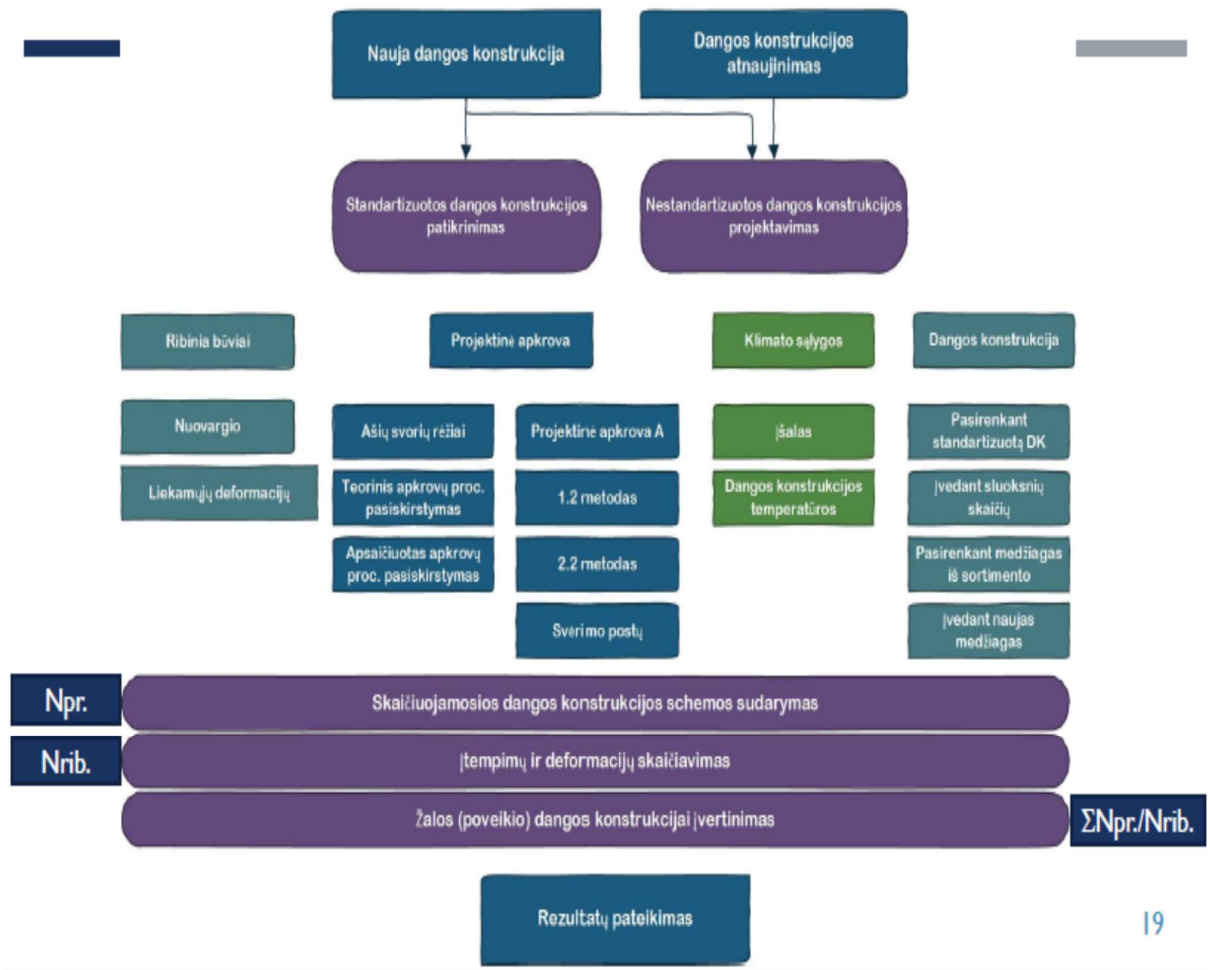
$$Nrib_{2-3} = \frac{k_1(T3)}{F(\epsilon_6)} \cdot \left( \frac{S_{mix}(T3)}{\sigma_{v,2-3} \cdot \gamma_{AC}} \right)^{k_2(T3)}$$

$$Nrib_{1-14} = \frac{k_1(T14)}{F(\epsilon_6)} \cdot \left( \frac{S_{mix}(T14)}{\sigma_{v,1-14} \cdot \gamma_{AC}} \right)^{k_2(T14)}$$

Load level	-17.5	-12.5	-7.5	-2.5	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
2 t (0:2)	2.44328E-08	1.51E-07	6.43E-07	2.58E-06	6.05E-06	9.28E-06	1.85E-05	5.27E-05	7.79E-05	0.000131	7.2768E-05	5.3256E-05	2.5E-05	7.03E-06
4 t (2:4)	9.27087E-07	2.24E-07	1.72E-05	6.9E-05	0.000162	0.000243	0.000494	0.001394	0.002071	0.002096	0.00201227	0.00142743	0.000661	0.000186
6 t (4:6)	2.16804E-06	1.42E-05	6.17E-05	0.000248	0.000581	0.000874	0.001774	0.005003	0.007472	0.007625	0.0069843	0.00502762	0.002382	0.000669
8 t (6:8)	6.05861E-06	3.94E-05	0.000172	0.000693	0.001615	0.002444	0.004923	0.014075	0.020995	0.020955	0.01946791	0.01409349	0.00664	0.004757
10 t (8:10)	6.27679E-06	4.12E-05	0.000179	0.000719	0.001673	0.002521	0.005124	0.014407	0.021539	0.021996	0.02026204	0.01471826	0.006911	0.001942
12 t (10:12)	8.28244E-06	5.41E-05	0.000236	0.000938	0.002187	0.00332	0.006747	0.019113	0.028546	0.02872	0.0266818	0.01942544	0.0091	0.002557
14 t (12:14)	5.03857E-06	3.29E-05	0.000143	0.000571	0.001331	0.002202	0.004104	0.011627	0.017366	0.017472	0.0162317	0.01181734	0.005536	0.001556
16 t (14:16)	7.70302E-06	5.04E-05	0.000219	0.000884	0.002097	0.003128	0.006356	0.017921	0.026783	0.027055	0.02490055	0.0181961	0.008573	0.002409
18 t (16:18)	5.17552E-06	3.34E-05	0.000148	0.000586	0.001383	0.002075	0.004216	0.011943	0.017838	0.018031	0.01653456	0.01209285	0.005687	0.001598
20 t (18:20)	3.90752E-06	2.54E-05	0.000109	0.000438	0.001029	0.001578	0.003151	0.008959	0.013245	0.013526	0.01236703	0.00905095	0.00425	0.001194Σ(N <sub>pr</sub> /N <sub>rib</sub> )
22 t (20:n)	4.62957E-06	3.08E-05	0.000134	0.000529	0.001262	0.001903	0.003855	0.010856	0.016058	0.016266	0.01495139	0.01094838	0.005134	0.001443







HOW DOES IT LOOK LIKE IN REAL..



## LISA 9 Soome vastused FWD kasutamise seotud küsimustele

**Subject:**VL: PPL-laitteiden ja datan käyttökokemuksia

**Date:**Thu, 29 Oct 2020 13:05:03 +0000

**From:**Petäjä Sami <[Sami.Petaja@vayla.fi](mailto:Sami.Petaja@vayla.fi)>

1. Which manufacturer's FWD you are using? Which type/model? Why you have chosen FWD device of that particular manufacturer?

KUAB in most common device in Finland. The devices are quite old. I don't know why KUAB was chosen. Timo might have some information why we picked KUAB device several years ago.

Finnish transport infrastructure agency doesn't own any FWD device. Destia owns the devices since there was split between road administration and production unit.

2. Are you using FWD only on project level measurements or also for program or road network level measurements?

Only project level. Not anymore at network level

- What is the measurement principle used in different level? Periodicity/frequency of measurements? What is the number of measurements done per road section or per kilometer?

At project level common point frequency might be 50 m. But if TSD measurement is used the measurement is continuous

**Subject:**RE: PPL-laitteiden ja datan käyttökokemuksia

**Date:**Mon, 2 Nov 2020 08:25:38 +0000

**From:**Timo Saarenketo <[timo.saarenketo@roadscanners.com](mailto:timo.saarenketo@roadscanners.com)>

Huomenta Hyvät Ystävät

Ohessa minun vastaukseni Tiitin kysymyssettiin. Olen yrittänyt vastata mahdollisimman epäkaupallisesti tähän ja pelkästään Roadscannersin Suomen kokemuksia. Ruotsissahan on PMS Objekt joka on ollut hyvä suunnitteluohjelma ja jota on myös käytetty jopa täällä kantavuusmitoituksessa. Suomen etuna Ruotsiin verrattuna on kuitenkin se, että täällä ei ole käytössä "totalentrepnad" malli jossa urakoitsija suunnittelee FWD:n pohjalta ja urakka annetaan aina halvimman tarjouksen tehneelle. Tämä on johtanut siihen, että siellä jos haluaa saada urakan pitää mitoitus tehdä aina parhaimman FWD pisteen pohjalta, jolloin päästään myös halvimmalla rakenteella.

Suomen ongelma minusta on se, että Väyläviraston ohjeissa sallitaan vielä empiirinen menettely, jossa mitoitus tehdään tien kunnan yleisen arvion pohjalta käyttäen patenttiratkaisuita ja taulukoita, jotka eivät kuulu 2020-luvulle. Onneksi tätä käytetään yhä vähemmän – vai käytetäänkö Sami ja Panu?

Itse uskon, että TSD tulee lähivuosien aikana viemään ainakin 80%:sti taipumamittausten markkinat ja FWD jää pienemmille ja heikoille teille jossa TSD ei voi mitata sekä sorateille ja metsäautoteille.

Terv.

Timo

1. Which manufacturer's FWD you are using? Which type/model? Why you have chosen FWD device of that particular manufacturer?

KUAB valittiin oli tuolloin paljon halvempi kuin Dynatest. Lisäksi huolto oli "lähempänä" ja silloin edustaja myös Suomessa. Malli oli perus KUAB FWD 50 kN kuormituksella, geofonien määrästä ja paikoista keskusteltiin kovastikin. CarlBro ei ollut edes tosissaan mukana.

2. Are you using FWD only on project level measurements or also for program or road network level measurements?

What is the measurement principle used in different level? Periodicity/frequency of measurements? What is the number of measurements done per road section or per kilometer?

Ja FWD on pääosin projektitasolla (ja laadunvalvonnassa) ja TSD verkkotasolla tällä hetkellä. Projektitasolla suositellaan 20m väliä, mutta myös 50m pisteväliä käytetään. Keskustelua edelleen mitataanko zig-zag vai vain se kaista jota raskas liikenne käyttää enemmän. Verkkotasolla PEHKO projektissa taipumat mitataan 5 vuoden välein, mikä mielestäni on hyvä mittausväli. FWD tekniikalla ongelmana on ollut myös se, että toisinaan mitataan vain "huonoista paikoista", jolloin niiden osuus ylikorostuu.

3. What kind of equation you are using for calculation of the pavement E-modulus based on the FWD measurement data?

How you are taking into account the measurement time (date or month) to transfer the calculated E-modulus value to the comparable /relative time when the pavement E-modulus is weakest (usually the spring)?

Päällysteen E-modulia, jos sitä tarkoitat ei lasketa normaalisti vaan E2 arvo, joka on "keskimoduuli" ja joka otettiin mukaan kun levykantavuusmittaukset (static plate load test) ja FWD piti saada yhteismitallisiksi. Tämä E2 on huono parametri, koska kalliokohteissa se antaa liian hyvän tuloksen (ja siksi Suomessa ja Ruotsissa kalliokohteet urautuvat nopeasti) ja turpeen päälle rakennetuilla teillä liian huonon arvon.

Päällysteen moduuli lasketaan backcalculation ohjelmien avulla ja esimerkiksi Suomessa yleisesti käytetyssä Road Doctor ohjelmassa on mahdollisuus käyttää takaisinlaskentaa Dynatestin Elmod ohjelman kautta, jolloin Road Doctorista tulee paksumetrit ja Elmod ottaa taipumat ja laskee moduulit (näille on rakennettu "handshake"). Päällysteen moduuli voidaan laskea myös Road Doctorissa FHWA'n Forward Calculation algoritmeilla, mikä perustuu aikoinaan ELMOD ja Modulus ohjelmilla lasketuihin tietokantoihin eri rakenteista ja eri taipumista.

Edellisen lisäksi Suomessa käytetään vielä kantavuusindeksejä (Bearing Capacity Indexes) "Strain", "SCI" ja "BCI", joista Strain lasketaan Ruotsalaisella Trafikverketin kaavalla, joka on todettu hyväksi. SCI lasketaan 0-200 mm taipumista ja BCI 900-1200 mm taipumista. Ruotsin kaavoista lasketaan myös pohjamaan moduuli (subgrade modulus), koska takaisinlaskennalla sen määrittäminen on aina arpa-aluetta (linear elasticity vs non-linear elasticity).

Kevätmittauksia käytetään joissakin Ely-keskuksissa, mutta itse en suosittelen lainkaan, koska pohjamaassa tai rakenteessa oleva routa vaikuttaa niin paljon taipumiin ja tulokset ovat täysin vääriä. Siksi paras ja luotettavin aika on syksymittaukset syys-lokakuussa.

4. How the FWD measurement data based calculated E-modulus values are correlating with the E-modulus values used in your pavement design method?

Jos tarkoitat miten laadunvalvonnassa käytetään E2 arvoa, niin tämä on paha kysymys minulle vastattavaksi koska itse en usko koko E2 arvon järkevyyteen. Siksi Samin tai Panun pitäisi ehkä vastata tähän. Ongelmahan on myös hysteresis ilmiö, jolloin kuivuvan sitomattoman materiaalin moduuli voi olla jopa 100 MPa suurempi kuin samassa vesipitoisuudessa olevan kostuvan materiaalin – eli milloin mitataan vaikuttaa tuloksiin ja tämä asia tunnettiin jo levykuormituskokeiden aikana.

Mutta Roadscannersin kokemus on se, että jos suunnittelussa lasketaan rakenteiden moduulit ja sitten mitoitetaan uusi rakenne Odemark kaavalla (poislukien kaikkein jäykimmät rakenteet ja suurimmat liikennemäärät) ja sen pohjalta lasketaan pinta-Odemark kantavuus vanhalle ja uudelle rakenteella esimerkiksi käyttäen Road Doctor ohjelman Odemark moduulia. Ja jos tie on rakennettu niin kuin on suunniteltu niin pintakantavuus on aika lailla lähellä suunniteltua. Ongelmiakin on, esimerkiksi uuden päällysteen moduuli ensimmäisenä vuonna on pienempi kuin suunniteltu ja silloin arvot voivat olla pienemmät. Toinen ongelma on jos vanhoja jäykkiä päällysteitä sekoitusjyrsitään, niin kantavuus usein putoaa vanhaan verrattuna. Mutta nämä pitää huomioida.

5. Are you using the deflection bowl measurement data for the pavement layers and subgrade evaluation? What kind of methodology you are using for that? Is that done only on the project level or also on the network level?

Käytetään todella paljon, ks aiempi vastaus 3. Suomessa on menossa läpi todella hyvin ROADEx projektin esittämä Rutting Mode luokittelu jossa FWD tai TSD:n perusteella luokitellaan tiet minkä tyyppinen urautumisriski rakenteella on. Eli a) strain päällysteen väsyminen, b) SCI Mode 1 rutting ja c) BCI Mode 2 rutting.

Ja tätä luokittelua käytetään sekä projektitason että verkkotason työssä. Olen opettanut luokittelua yliopistoissa ja nuoret insinöörit ovat sen omaksuneet hyvin. Nyt olen opettanut asiaa myös IRF:n PMS kursseilla ja sielläkin vastaanotto on ollut hyvä.

Lopuksi TSD:sta sen verran että sitä on käytetty Suomessa jo yli 5 v ja tulokset pääsin erinomaisia ja ne korreloivat "riittävän hyvin" FWD mittausten kanssa. Tosin täysin samanlaisia tuloksia ei voida edes olettaa saatavan. Tänä vuonna on mitattu ensimmäistä kertaa myös taipumat renkaan takana, jolloin saadaan tarkempaa tietoa, onko päällysteen vaste kokonaan lineaari-elastinen vai onko siellä myös visko-elastinen vaste. Greenwoodin uusinta TSD rekkaa testattiin heinäkuussa Muonion instrumentoidulla Aurora kohteella ja antureiden antava vaste verrattuna mitattuihin arvoihin oli yllättävän hyvä.

# DESTIA

## TEITÄ PALVELLEN

Jatkuva taipumanmittaus TSD:llä

31.12.2013

### Mittauslaite

DESTIA Perämittaus 31.12.2013 1

### Laitevalmistaja Greenwood Engineering Ltd/Tanska

Traffic Speed Deflectometer - TSD - operating worldwide.

- Through the early 2000 the world's first Doppler-based TSD was developed and patented by Greenwood Engineering. The first two TSD devices were configured with 4 Doppler sensors. These are owned by respectively Highways Agencies in UK and the Danish Road Directorate – partly measuring in Australia 2009/10, read more.
- In 2010 a TSD with 7 Doppler lasers was delivered to ANAS in Italy, read more.
- In 2011 the fourth TSD was delivered to IBDIM in Poland, read more.
- In 2012/13 the fifth TSD was delivered to SANRAL, South Africa, read more. This TSD has 10 Doppler lasers and includes LaserProf and Right-of-Way imaging.
- In 2013 the sixth TSD will be delivered to RICH China.
- In 2013 the seventh TSD will be constructed and shipped to USA. This TSD will participate in comparison tests arranged by FHWA. Measurements will be offered to state DOT's in a pooled fund project.

<http://www.greenwood.dk/tsd.php>  
[http://orbit.dtu.dk/files/59481631/phd310\\_Pedersen\\_L.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/59481631/phd310_Pedersen_L.pdf)  
<http://www.greenwood.dk/>

DESTIA Perämittaus 31.12.2013 2

### Geofonien tilalla laser anturit – ja muita tekniikkaa

DESTIA Perämittaus 31.12.2013 3

DESTIA Perämittaus 4

### Tulosteet

Chainage [m]	Frequency Fan Speed 4[m/s]	Slope 0.96[mm/m]
Latitude [dd.ddddd]	Temp Air 1 [°C]	Slope 0.69[mm/m]
Longitude [ddd.ddddd]	Temp Inside 8.4[°C]	Slope 0.39[mm/m]
Date Time	Temp Inside 3.4[°C]	Slope 0.29[mm/m]
Event	Temp Inside 0.5[°C]	Slope 0.19[mm/m]
RTI [m/s]	Temp BeamHigh 3.4[°C]	Doppler 3.9[mm]
Profile [mm]	Temp BeamLow 2.4[°C]	Doppler 1.6[mm]
Driving Speed [m/s]	Temp BeamHigh 2.2[°C]	Doppler 0.9[mm]
Driving Accel [m/s²]	Temp BeamLow 2.2[°C]	Doppler 0.8[mm]
GyroYaw [rad/s]	Temp BeamHigh 0.6[°C]	Doppler 0.3[mm]
GyroRoll [rad/s]	Temp BeamLow 0.6[°C]	Doppler 0.2[mm]
GyroPitch [rad/s]	Doppler 3.9[mm/s]	Doppler 0.1[mm]
AccLoad [m/s²]	Doppler 1.9[mm/s]	SC100 [µm]
AccVert1 1.9[m/s²]	Doppler 0.9[mm/s]	SC100 [µm]
AccTrans 1[m/s²]	Doppler 0.6[mm/s]	SC100 [µm]
AccHoriz 0[m/s²]	Doppler 0.3[mm/s]	SC100 [µm]
AccVert1 3.6[m/s²]	Doppler 0.2[mm/s]	D000[µm]
AccVert2 0.2[m/s²]	Doppler 0.1[mm/s]	D000[µm]
LinePot 2.846[mm]	DefVel 1.6[mm/s]	D400[µm]
LinePot 0.828[mm]	DefVel 0.9[mm/s]	D600[µm]
Laser 0[mm]	DefVel 0.6[mm/s]	D800[µm]
Temp Road 1 [°C]	DefVel 0.3[mm/s]	D1200[µm]
Frequency Fan Speed 1[m/s]	DefVel 0.2[mm/s]	D1500[µm]
Frequency Fan Speed 2[m/s]	DefVel 0.1[mm/s]	D1800[µm]
Frequency Fan Speed 3[m/s]	Slope 1.6[mm/m]	Status

DESTIA Perämittaus 31.12.2013 5

### Mittaus

Tien taipumien mittaus perustuu laser-tekniikkaan.

- Mittaaavat anturit on asennettu puoliperävaunulliseen kuorma-autoon siten, että niitä on kuormittavasta pyörästä noin 1,8 metrin matkalla.
- Antureilla rekisteröidään tunnetun pyöräpainon aiheuttama taipuma päällysteessä vertaamalla sitä kuormittamattomaan tilanteeseen.
- Päällysteen pinnan taipumanopeuden määrittämisessä käytetään Doppler-tekniikkaa.
- Tieto prosessoidaan taipumiksi käyttämällä tietoa ajoneuvon liikkeistä, joka saadaan ajoneuvon koriin asennetuista liikeantureista. (jalkiprosessointi)

DESTIA Perämittaus 6

### Mittausperiaatteita

Puoliperävaunullinen kuorma-auto on suunniteltu siten, ettei vetoauto aiheuta vääristymiä päällysteen mittaustuloksiin.

- Anturit on asennettu perävaunun taka-akselin eteen oikealle puolelle.
- Mittauksia voidaan tehdä jopa 70-80 km/h nopeudella miniminopeuden ollessa 38 km/h.
- Maksimimittausnopeus on 90 km/h. Akselipainona käytetään yleensä 10 tonnia.
- Tarkempi kuvaus mittaustiedon käsittelystä on esitetty lahteessa (Rasmussen et al. 2008).

DESTIA Perämittaus 7

## Mittauslaitteen etuja

Mittauslaitteen etuja perinteiseen taipumamittaukseen verrattuna ovat mm., että

- Mittauksessa käytettävä pyöräpaino vastaa todellista ajoneuvon painoa ja kuormitusta.
- Se on asetettu vastaamaan kuormituskertaluvin laskennassa ja mitoituksessa käytettävää 10 t standardiakselin painoa.
- Mittauksen yhteydessä mitataan ilman ja päällysteen pinnan lämpötilat lämpötilakorjausta varten.
- Mittaus tapahtuu jatkuvana ja ilman pysähdyksiä, jolloin se on nopeampaa ja lämpötilavaihtelujen (ja korjausten) kannalta vakioidumpaa.
- Paikkatieto saadaan koordinaatteita ja paalulukuina.
- Mittaustulokset ovat lisäksi vertailukelpoisia pudotuspainolaitteen kanssa.

DESTIA

Perhe-Ulmas

10

## Normalisointi

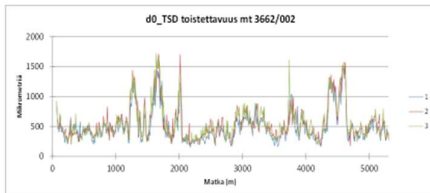
- Jos taipuman mittauksessa käytetty kuormitus poikkeaa standardiakselien määrityksessä olevasta 50 kN:n pyöräpainosta, niin taipumat tulisi normalisoida vastaamaan 50 kN:n pyöräpainoa.
- TSD:ssä käytetty staattinen pyöräpaino oli 50 kN, mutta sen dynaaminen pyöräpaino vaihtelee riippuen tien geometriasta ja epätasaisuudesta.
- Kuorman huomioiva toiminto on vasta suunnitella.

DESTIA

Perhe-Ulmas

11

## TSD -d0/10m - toistettavuus



Jatkuvan kantavuusmittauksen toistettavuus on 10 m jaksolle laskettujen toistokorrelaatioiden mukaan parhaimmillaan noin 90 %, mutta sitä laskevat helposti yksittäiset poikkeamat.

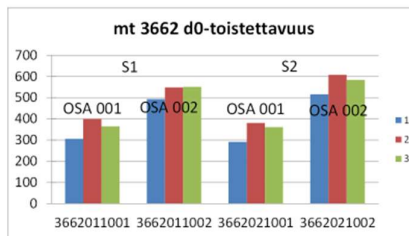
DESTIA

Perhe-Ulmas

31.12.2013

13

## TSD:n d0-toistettavuus (tieosakeskariivot)



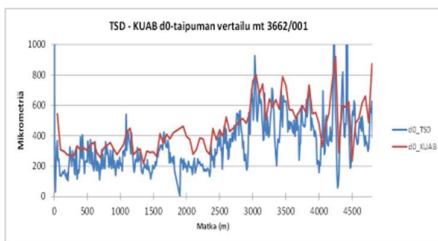
DESTIA

Perhe-Ulmas

31.12.2013

14

## TSD vs KUAB - d0

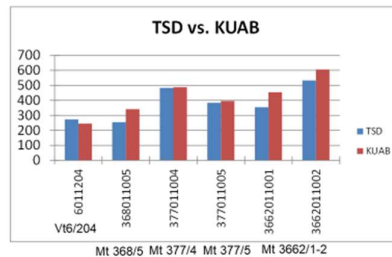


DESTIA

Esa Korhonen

26

## TSD vs. KUAB (d0\_T)



DESTIA

Perhe-Ulmas

31.12.2013

27

## Yhteenveto

- TSD tuottaa hiukan pienempiä taipumia kuin KUAB
- Taipumasuppilot samanmuotoiset, mutta niissä on tasoero
- SCI:t melko yhteneväiset KUABin kanssa
- BCI:ssä tasoero, TSD:n d600-d1800 pieniä, lähellä nolaa
- TSD:n toistettavuus kohtalainen, 90 %
- TSD tuottaa jatkuvana suuremman vaihtelut
  - Siltojen ym. kohdat olisi poistettava
- TSD:n mittauslämpötila >8 C
- Valmistaja ei suosittele alle 10 m keskiarvoistusvälejä
- Taipumien laskenta-algoritmi ei sovi kovin hyvin jäykille päällysteille (vt6:lla oli stabiiliteita yms.)
  - Ehkä sen pystyy korjaamaan
- Pyöräpainon vaihtelu pitäisi ottaa algoritmissa huomioon

DESTIA

Perhe-Ulmas

20.4.2013

28

**Liikennevirasto**

**Jatkuva taipumanmittaus**  
Pertti Virtala/Destia Oy

**Liikennevirasto**

### Miksi jatkuva taipuman mittaus?

- Historia:**
  - Hitaasti etenevä pistekohtainen PPL-mittaus johti liian harvaan mittausväliin ja liian harvaan mittauskertoon.
  - Taipumamittauksia ei synkronoitu pintakuntomittauksen kanssa, vaan kaikkien mittauslajien mittauskerrot "elivät omaa elämänsä".
  - Mallinusestetöistä tuli epähomogeenisia
  - Syy-seuraussuhteita ei pystytty selvittämään
  - Kantavuuden kausivaihtelua ei hallittu
  - Taipumasupplioa ja siitä saatavia indeksejä ei juuri osattu käyttää
  - Kantavuus poistettiin tien huonokuntoisuuden määrittelemästä (2005)
  - TSK-projektit alkoivat kiertää kehää, missä em. puutteet toistuivat ja sen seurauksena oli, että:
    - ei nähty tarvetta edes pistekohtaisten kantavuusmittausten jatkamiselle (2009)
  - Kerrosrakenteiden mittaamiselle ei myöskään nähty tarvetta
  - Tierakenteen kerrosten jäykkyysominaisuuksia ei voitu laskea
- Nykytilä:**
  - Tierakenteiden kestävyiden hallinta jäljellä olevan kestoajan kautta mahdotonta.
  - Teiden ylläpito painottuu pintakuntoon.

Taipumamiedon olisi toivottu olevan jatkuvaa

**Liikennevirasto**

### Traffic Speed Deflectometer (TSD)

Greenwood Engineering Ltd. Tanska

Road and Bridge Research Institute (IBDIM), Warsaw, Poland;

**Liikennevirasto**

### Mittausperiaate

- Tien taipumien mittaus perustuu laser-tekniikkaan.
- Mittaavat anturit on asennettu puoliperävaunulliseen kuorma-autoon siten, että niitä on kuormittavasta pyörästä noin 1,8 metrin matkalla.
- Päällysteen pinnan taipumanopeuden määrittämisessä käytetään Doppler-tekniikkaa.
- Tieto prosessoidaan taipumiksi käyttämällä tietoa ajoneuvon liikkeistä, joka saadaan ajoneuvon koriin asennetuista liikeantureista (jalkiprosessointi).

**Kuormitustilanne**

**Liikennevirasto**

### Mittausperiaatteita

- Puoliperävaunullinen kuorma-auto, jossa kuormittava akseli kaukana vetoakselista.
- Anturit on asennettu perävaunun taka-akselin eteen oikealle puolelle.
- Mittausnopeus 40-90 km/h
- Akselipainona käytetään yleensä 10 tonnia.
- Tarkempi kuvaus mittaustiedon käsittelystä on esitetty lähteessä (Rasmussen et al. 2008).
- Valmistajan sivut <https://www.greenwood.dk/tsd.php>
- Väylät ja Liikenne 2014 esitys
  - [http://tapahlutumat.tievhdistys.fi/site/assets/files/1298/rakenteiden\\_kesta\\_vyys\\_ja\\_kunnossapito-1.pdf](http://tapahlutumat.tievhdistys.fi/site/assets/files/1298/rakenteiden_kesta_vyys_ja_kunnossapito-1.pdf)

**Liikennevirasto**

### Mittausperiaatteita

- Puoliperävaunullinen kuorma-auto, jossa kuormittava akseli kaukana vetoakselista.
- Anturit on asennettu perävaunun taka-akselin eteen oikealle puolelle.
- Mittausnopeus 40-90 km/h
- Akselipainona käytetään yleensä 10 tonnia.
- Tarkempi kuvaus mittaustiedon käsittelystä on esitetty lähteessä (Rasmussen et al. 2008).
- Valmistajan sivut <https://www.greenwood.dk/tsd.php>
- Väylät ja Liikenne 2014 esitys
  - [http://tapahlutumat.tievhdistys.fi/site/assets/files/1298/rakenteiden\\_kesta\\_vyys\\_ja\\_kunnossapito-1.pdf](http://tapahlutumat.tievhdistys.fi/site/assets/files/1298/rakenteiden_kesta_vyys_ja_kunnossapito-1.pdf)

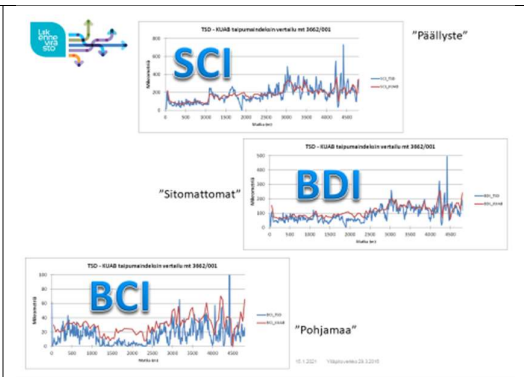
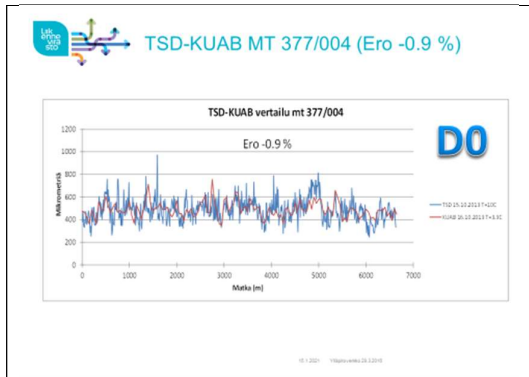
**Liikennevirasto**

### D0 TSD VS. KUAB 2013

Section	TSD (mm/year)	KUAB 2013 (mm/year)
6011204	~250	~4.5
368011005	~300	~5.5
377011004	~450	~8.5
377011005	~400	~7.5
3662011001	~450	~8.5
3662011002	~550	~10.5

TSD:n ja KUAB:n erot näyttävät johtuvan lämpötilaeroista ja korjauskertoimen toimimattomuudesta





**Nopeita taipumamittareita**

The team is aware of the following high-speed deflection devices:

- Rolling dynamic deflectometer (RDD), developed at the University of Texas at Austin;
- Rolling wheel deflectometer (RWD), developed by Applied Research Associates for the FHWA;
- Airfield rolling weight deflectometer (ARWD), developed by Quest Integrated;
- Road deflection tester (RDT), developed by the Swedish National Road Administration and Swedish National Road and Transport Research Institute; and
- High-speed deflectograph (HSD), developed by the Danish Road Institute and Greenwood Engineering A/S.

15.1.2021 15:00:00:00

**8 laitetta käytössä (2009-2014)**

**USA**  
GREENWOOD TSD is being demonstrated here in a TRAMP Roadside Force Project.  
In 2014 Greenwood TSD successfully completed measurements at 180 km/h.  
In 2014 10 sites with GREENWOOD TSD are performing TSD measurements. New York, New Carolina, Georgia, Nevada, California, and South Africa.  
GREENWOOD ENGINEERING  
New York, NY, USA  
880 Hudson Avenue, 10th Floor  
10017-0001 New York

**China**  
GREENWOOD TSD owned by RCH  
Research and Development (RD) is an important and critical step in scientific research and technological development of state-of-the-art technologies for pavement engineering in China.  
GREENWOOD ENGINEERING  
Beijing Office  
No. 124th Zhongguo Road  
Chaoyang District, Beijing 100024

**South Africa**  
GREENWOOD TSD owned by SANRAL  
The GREENWOOD TSD is equipped with 10 sensors (5 on each side) and is capable of measuring deflection at 120 km/h. It is a portable device and can be used in a wide range of applications.  
GREENWOOD ENGINEERING  
New York, NY, USA  
880 Hudson Avenue, 10th Floor  
10017-0001 New York

**Europe**  
GREENWOOD TSDs operated in:  
• Denmark, owned by DSD  
• Great Britain, owned by HA  
• France, owned by SEM  
• Italy, owned by ANAS  
The equipment is all operating currently. The team has a lot of experience with the equipment. It is a portable device and can be used in a wide range of applications.  
GREENWOOD ENGINEERING  
Development and manufacturing in Denmark

**Australia**  
GREENWOOD TSD owned by ARRB  
The equipment is currently operating in several states in New Zealand. Based on field tests in Australia and New Zealand, the equipment is suitable for use in the general traffic area in order to monitor road conditions and to provide early warning of potential deflection problems.  
GREENWOOD ENGINEERING  
Beijing Office  
No. 124th Zhongguo Road  
Chaoyang District, Beijing 100024

- Yhteenveto**
- Greenwoodin TSD näyttää vievän pisimmän korren jatkuvan taipumamittauksen markkinoilla
    - Taipumien mittaus siirtynyt laser-tekniikkaan
    - Mittaus on nopeata ja jatkuvaa
  - TSD vs. KUAB
    - Tuottaa yhtä suuria tai hiukan pienempiä taipumia kuin KUAB
    - Taipumasuppilot samanmuotoiset, mutta niissä on tasoero
    - SCI:t ja BDI:t melko yhteneväiset KUABin kanssa
    - BCI:ssä tasoero, TSD:n d600-d1800 pieniä, lähellä nolaa
  - Toistettavuus kohtalainen, d0: 90 %
    - Puola, Saksa, Englanti ja Australia: tulokset samansuuntaisia
  - Suosituksia
    - TSD:n mittauslämpötila 8-30 C johtuen lämpötilakorjauskaavasta
    - Valmistaja ei suosittele alle 10 m keskiarvoistusvälejä
    - Taipumien laskenta-algoritmi ei sovi kovin hyvin jäykille päällysteille (v6:lla oli stabilointeja yms.). Ehkä voidaan korjata??
  - Tarvitaan soveltavaa tutkimusta (tai ainakin sen seuraamista)

## **LISA 10 Taani vastused FWD kasutamise kohta seotud küsimustele**

From: Susanne Baltzer

Sent: Tuesday, December 15, 2020 9:55 AM

Subject: SV: FWD or RWD and pavement design

The responsibility in the organisation has recently changed. Until this year, my unit provided TSD measurements. It was the responsibility of the Maintenance Unit to decide which sections were due for new wearing course (this is mainly decided based on visual surveys, - with the input of roughness and rutting measurements). The Maintenance Unit were to check the due sections for problems with bearing capacity (TSD-measurements). I have actually no feeling with whether this work was done. It was a manual process. But I know that not many – if any – FWD measurements were carried out.

From this year it is my unit that is to make the draft list of section due to wearing course. We started last week comparing this section with TSD-measurements, - in order to make a suggestion of which sections to measure with FWD. So this procedure is all new.

The network level measurements are done with Greenwood TSD. In areas, identified with TSD as problematic, FWD measurements are provided before design or works. And main task for FWD is to define the necessary overlay thickness.

Some more detailed questions:

1. Could you specify, how these FWD measurements are done? Is it Your own organization or task procured from someone?

It will be our own organization. Probably measurements for every 100 m, on the relevant sections (from approximately 300 – 4000 m). I am not sure yet about layer thicknesses. We probably will drill 5 cm cores every 300 m to determine asphalt thickness, - and then find unbound thickness from database or make a qualified guess.

2. Dynatest FWD, FastFWD or something else used?

We have standard Dynatest FWD. (actually we are in the process of buying of new replacement for the 40 year old FWD)

3.The measurement distance – usually on network measurements, 100 m distance between points is used, for the design or overlay works, could be more points needed?

I would say 100 m is okay. State roads are usually fairly uniform

4.Overlay thickness is calculated with ELMOD (or something else, within FWD survey) or in-house with special software?

We have our own. But ELMOD is good, - we might buy it.

5.Any use of FWD indexes (SCI, BDI, BCI)?

No.

6.For design, what data is provided for Designer?

We often do milling first and then an overlay. What is provided for Designer? – We have fairly good traffic measurements (ESAL). We have databases of layer thicknesses, but often asphalt thickness is no good (because the milling is not always reported). So I imagine we need cores of asphalt to decide thicknesses.

Our geologist do not trust the LWD to evaluate the bearing capacity of current subground. They prefer static plate load on these surfaces. LWD might not be as representative as static plate load, but it is a quick test, so you can just do many measurements and make an average. That, I guess, is also a strength. Especially during construction where layers are more homogeneous.

**Susanne Baltzer**

Ingeniør  
Befæstelser

Guldalderen 12  
2640 Hedehusene

Telefon +45 7244 3333  
Direkte +45 7244 7132  
Mobil +45 2129 2745

[sub@vd.dk](mailto:sub@vd.dk)  
[vejdirektoratet.dk](http://vejdirektoratet.dk)

*Med udgangspunkt i bæredygtig udvikling arbejder Vejdirektoratet for, at mennesker og gods kommer nemt og sikkert frem.  
[Læs om Vejdirektoratets behandling af personoplysninger.](#)*