

FWD mõõtmistulemuste kasutamine teekatendi remondiprojektide koostamisel

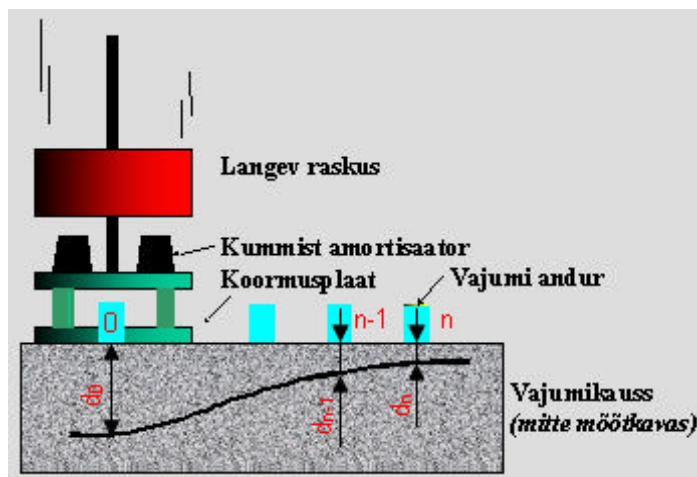
INFORMATSIOON 2

FWD mõõtmisel tekkiva vajumiskausi parameetrite analüüs



1918
TALLINNA
TEHNIKAÜLIKOOL
TEEDEINSTITUUT

2006-11/I2



MAANTEEAMET

Tallinn 2006

Teadustöö klass 2.8

KINNITAN

Andrus Aavik
Teedeinstituudi direktor
25. september 2006

TEADUSTÖÖ 614L

**FWD MÕÕTMISTULEMUSTE KASUTAMINE TEEKATENDI
REMONDIPROJEKTIDE KOOSTAMISEL**

INFORMATSIOON 2

FWD mõõtmisel tekkiva vajumiskausi parameetrite analüüs

Tellijä: MAANTEEMET

Tallinn 2006

TEADUSTÖÖ INFORMATSIOON 2

FWD MÕÕTMISTULEMUSTE KASUTAMINE TEEKATENDI REMONDIPROJEKTIDE KOOSTAMISEL

FWD mõõtmisel tekkiva vajumiskausi parameetrite analüüs

Käesolev teadustöö informatsioon on koostatud 14.02.2006.a. Maanteeameti ja Tallinna Tehnikaülikooli vahel sõlmitud Lepingu 614L alusel.

Teadustöö informatsiooni koostasid:

1. Prof. Andrus Aavik – lepingu vastutav täitja;
2. Magistrant Priit Paabo – andmete töötlus ja mudelite koostamine;
3. Ins. Tiit Kaal, AS Teede Tehnokeskus - probleemsete teekatendi konstruktsiooni-kihtide leidmine FWD mõõtmistulemuste alusel.

SISUKORD

Teadustöö lähteülesanne	5
--------------------------------------	----------

FWD MÕÕTMISEL TEKKIVA VAJUMISKAUSI PARAMEETRITE ANALÜÜS

Sissejuhatus	8
1. Eesmärgid	9
2. Erinevate iseloomulike vajumiskausi kujude võrdlus	9
2.1. Niiskuspakkonna ja mõõtmisperioodi mõju vajumiskausi kujule	10
2.2. Seotud kihtide paksuse ja mõõtmisperioodi mõju vajumiskausi kujule	12
2.3. Järeldused	12
3. Vajumiskausi parameetrid SCI, BDI ja BCI	14
3.1. Niiskuspakkonna mõju SCI, BDI ja BCI väärtustele	16
3.2. Seotud kihtide paksuse mõju SCI, BDI ja BCI väärtustele	17
3.3. Aluspinnase tüübi mõju SCI, BDI ja BCI väärtustele	18
3.4. Katendi üldise elastsusmooduli ja SCI, BDI ning BCI väärtuste vahelised seosed---	20
3.5. SCI, BDI ja BCI maksimaalsed lubatavad väärtused	23
3.6. SCI, BDI ja BCI ning seotud kihtide paksuse vahelised seosed	25
3.7. Järeldused	28
4. Probleemse teekatendi konstruktsioonikihi leidmine FWD mõõtmistulemuste alusel – praktiline näide	29
Kokkuvõte	34
Kasutatud kirjandus	38
Lisad	39
Lisa 3. FWD mõõtmistulemused 1999-2005	68

TEADUSTÖÖ LÄHTEÜLESANNE

FWD MÕÖTMISTULEMUSTE KASUTAMINE TEEKATENDI REMONDIPROJEKTIDE KOOSTAMISEL

1. Probleemipüstitus

Kandevõime mõõtmisi teostab AS Teede Tehnokeskus rahvusvaheliselt laialdaselt kasutatud (http://www.dynatest.com/addresses1/owners_agencies.htm) Taani päritolu langeva raskusega dünaamilise koormusseadmega Dynatest FWD-8002, mille 7 andurit registreerivad teekonstruktsiooni läbipainde kindlalt kõrguselt langeva raskuse all. Ajavahemikul 1996-2005 on mõõdetud 100 m mõõtmisammuga ühes suunas orienteeruvalt 7000 km maanteid. FWD mõõtmised teostatakse igal aastal alates kevadisest teekonstruktsiooni sulamisest (kui teekonstruktsioon on teoreetiliselt kõige nõrgem) kuni hilissügiseni (tingimuseks on, et teekatte temperatuur on üle 5 °C).

Katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks kasutatakse meil praegusel hetkel ainult dünaamilise koormusseadme (FWD) 0-anduri (langeva raskuse keskmes oleva anduri) lugemit, mille alusel on võimalik arvutada katendi kevadine üldine elastsusmoodul, kasutades selleks A.Aaviku poolt tema doktoritöös "Teekatendite tugevuse hindamise meetodilised alused Eesti teekatendite hoiu süsteemisi (EPMS)" 2003.a. leitud võrrandit ning mille väärtus on võrreldav Maanteeameti "Elastsete teekatendite projekteerimise juhendi" (2001-52) alusel arvutatud väärtusega. Saadus tulemusi kasutatakse PMS-i võrgutasandi analüüsil ja vähesel määral ka teekatendite remondiprojektide koostamisel katendi nõrkade kohtade väljaselgitamisel.

FWD mõõtmistulemusi kasutatakse remondiprojektide koostamisel olemasolevate katendikonstruktsioonide analüüsiks praegusel hetkel kindlasti liiga vähe. A.Aaviku teadustöö näitas, et FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud katendi tugevusnäitajad iseloomustavad olemasoleva katendikonstruktsiooni tugevust palju täpsemalt, kui juhendi 2001-52 alusel arvutatud parameetrid. FWD mõõtmised registreerivad katendi faktilise seisukorra, samas juhendi 2001-52 kasutamisel võetakse aluseks juhendi poolt määratud erinevate katendikihtide teoreetilised tugevusparameetrid, mis ei pruugi vastata katendikihtide tegelikele omadustele. See võib olla põhjuseks, miks on tekkinud suured erinevused katendi projekteeritud üldise elastsusmooduli ja remonditud katendi FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud katendi üldise elastsusmooduli väärtuste vahel. See omakorda tähendab, et uus remonditud katend on vastavalt kas üle- või aladimensioneeritud, mis mõlemal juhul põhjustab ühiskonnale liigseid kulutusi.

Seni on teedevõrgul mõõtmisi teostatud ja teostatakse ilmselt ka tulevikus teadmata mõõdetava katendi konstruktsiooni. Teades katendis kasutatud materjalide ja pinnase nimetusi ja omadusi, täpsustuks oluliselt kandevõime arvutus. Katendikonstruktsiooni kihtide paksuste määramine on aga väga kulukas ja aeganõudev ning tekib küsimus, kas saadav informatsioon on seda väärt, et teostada katendikonstruktsiooni uuringud kogu teedevõrgul. Kindlasti tuleb aga remondiprojekti tasandil määrata olemasoleva katendi konstruktiivsed kihid (kas geoloogiliste puurimistega või maaradariga) ja materjalide ning pinnaste omadused, et kindlustada katendi võimalikult täpne dimensioneerimine, sest viimane on lisaks insenerlikule ülesandele ka majanduslik ülesanne, mille võimalikult täpne ja ökonoomne lahendamine tähendab suurt rahalist kokkuhoidu.

A. Aaviku poolt leitud seos katendi kevadise üldise elastsusmooduli arvutamiseks FWD mõõtmistulemuste alusel omab piisavat täpsust kasutamiseks PMS-i võrgu tasandil, kui puudub informatsioon olemasoleva katendikonstruktsiooni kohta. Katendi remondiprojektide koostamisel on kasutada katendikonstruktsiooni kohta märkimisväärselt rohkem informatsiooni PMS-i võrgutasandiga võrreldes. Sellisel juhul on määratud olemasoleva katendi konstruktiivsed kihid, niiskuspaikkonna tüüp ja pinnasevee tase, mida kasutatakse katendi dimensioneerimisel juhendi 2001-52 alusel. Selle informatsiooni maksimaalseks kasutamiseks, tuleks võrgutasandi katendi üldise elastsusmooduli arvutamise seost täpsustada. Vajalik on teostada täiendav FWD kontroll-mõõtmispunktide andmete analüüs, kus kontroll-mõõtmispunktid on grupeeritud vastavalt:

- kate tüübile;
- seotud kihtide paksusele;
- sidumata kihtide materjalidele ja paksusele;
- mulde pinnase tüübile;
- niiskuspaikkonna tüübile;
- mulde kõrgusele;
- kraavide (mitte)olemasolule

ja, kasutades alusena Cobb-Douglas'e võrrandit, leida seosed, mis võimaldaksid arvutada olemasoleva katendi elastsusmooduli võimalikult täpselt, arvestades eeltoodud täiendavate andmetega, mida võrgutasandi üldine seos seni ei arvesta. Leitavate seoste kasutamiseks projektitasandil tuleb koostada vastav juhised.

Lisaks 0-andurile (langeva raskuse keskmes olevale andurile) mõõdab FWD teekatendi deformatsioone veel kuues punktis (0-punktist kaugustel 300, 600, 750, 900, 1200 ja 1500 mm), mis salvestatakse Teeregistris, kust nad on kättesaadavad edaspidisteks arvutusteks. See tohutu informatsioonikogus on aga praegusel hetkel Eestis täielikult kasutamata, sest ei ole teada, kuidas nende kuue täiendava anduri mõõtmistulemused iseloomustavad katendi seisukorda.

FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud vajumiskõvera põhjal on võimalik hinnata olemasolevat katendikonstruktsiooni ja selle erinevate kihtide ning aluspinnase omadusi. Seni ei ole Eestis FWD koormuse tekitatud vajumiskõvera parameetreid uuritud ja kasutatud, kuigi FWD mõõtmistulemused on olemas ja selle informatsiooni kasutamine vastavate juhiste olemasolul oleks remondiprojektide koostamisel vajalik.

Nii 0-andurist teatud kaugusel mõõdetud katendi deformatsiooni ja anduri kaugusega võrdsel sügavusel oleva kihi tugevusnäitajate vahelise seose põhimõtteid kui ka FWD vajumiskõvera parameetreid tuleks enne nende praktilist rakendamist uurida, määratledes konkreetselt nende kasutusvõimaluse ja –ulatuse ning saadavate tulemuste tõepärasuse. Samuti tuleks nende arvutuste teostamiseks ja tulemuste kasutamiseks koostada vastavad juhised.

Teadustöös kasutatakse algandmetena AS Teede Tehnokeskuse poolt aastatel 1999-2005 teostatud püsiva FWD kontroll-mõõtmispunkti deformatsioonide regulaarsete mõõtmiste andmeid.

2. Teadustöö eesmärk

2.1. Tuletada seosed FWD mõõtmisandmete alusel olemasoleva katendi kevadise üldise elastsusmooduli arvutamiseks projekti tasandil.

2.2. Uurida FWD koormuse tagajärjel kattel tekkiva vajumiskõvera parameetrite alusel katendikihtide elastsusmoodulite määramise võimalusi.

2.3. Koostada FWD mõõtmisandmete baasil katendi kandevõime hindamise ja dimensioneerimise meetodika remondiobjektidele.

2.4. Koostada arvutitarkvara remondiobjektide olemasolevate katendite kandevõime hindamiseks ja uute katendite dimensioneerimiseks FWD mõõtmisandmete baasil.

3. Teadustöö sisu

3.1. FWD kontroll-mõõtmispunkti 1999-2005 mõõtmistulemuste ja andmete töötlus. Mõõtmispunktide grupeerimine ühiste tunnuste alusel.

3.2. Grupeeritud kontroll-mõõtmispunktide töödeldud FWD mõõtmistulemuste analüüs. Seoste leidmine katendi kevadise üldise elastsusmooduli arvutamiseks projekti tasandil FWD mõõtmistulemuste alusel.

3.3. FWD koormusel tekkiva vajumiskausi parameetrite kasutusvõimaluse ja –ulatuse määratlemine katendikonstruktsiooni kihtide seisukorra iseloomustamiseks, mis põhineb FWD kontroll-mõõtmispunkti 1999-2005 mõõtmistulemustel.

3.4. FWD mõõtmisandmete baasil katendi kandevõime hindamise ja dimensioneerimise meetodika koostamine katendi remondiobjektidele.

3.5. Arvutitarkvara loomine remondiobjektide olemasolevate katendite kandevõime hindamiseks ja uute katendite dimensioneerimiseks FWD mõõtmisandmete baasil.

4. TÖÖVÕTJA poolt esitatavad aruanded

Aruanne	Sisu	Tähtaeg
I etapp - Informatsioon	1. FWD kontroll-mõõtmispunktide 1999-2005 mõõtmistulemuste ja andmete töötlus. Mõõtmispunktide grupeerimine ühiste tunnuste alusel. 2. Grupeeritud kontroll-mõõtmispunktide töödeldud FWD mõõtmistulemuste analüüs. Seoste leidmine katendi kevadise üldise elastsusmooduli arvutamiseks projekti tasandil FWD mõõtmistulemuste alusel.	02.07.2006
II etapp - Informatsioon	3. FWD koormusel tekkiva vajumiskausi parameetrite kasutusvõimaluse ja –ulatuse määratlemine katendikonstruktsiooni kihtide seisukorra iseloomustamiseks, mis põhineb FWD kontroll-mõõtmispunkti 1999-2005 mõõtmistulemustel.	01.12.2006
III etapp – Vahearuanne	4. FWD mõõtmisandmete baasil katendi kandevõime hindamise ja dimensioneerimise meetodika koostamine katendi remondiobjektidele.	30.06.2007
IV etapp – Lõpparuanne	5. Arvutitarkvara loomine remondiobjektide olemasolevate katendite kandevõime hindamiseks ja uute katendite dimensioneerimiseks FWD mõõtmisandmete baasil.	01.12.2007

FWD MÕÕTMISEL TEKKIVA VAJUMISKAUSI PARAMEETRITE ANALÜÜS

SISSEJUHATUS

Käesoleva hetkeni on Eestis FWD seadme poolt registreeritavatest mõõtmisandmetest kasutust leidnud vaid teatud osa (vt. käesoleva uurimistöo Informatsioon 1 – 2006-11/I1). Käesoleva uurimistöo üheks eesmärgiks ongi katendi seisukorra ilmekam kirjeldamine läbi FWD mõõtmisandmete laialdasema kasutamise. Katendi üldise seisukorra võimalikult täpseks hindamiseks vaadeldakse katendi kihte eraldi, eristades seotud kihid, aluse ja aluspinnase. Selline kihtkihiline analüüs võimaldab osutada katendikonstruktsiooni kihile, kus võimalikud probleemid (nt. ebasobiv materjal) paiknevad. Eesmärgiks on mujal maailmas laialdast kasutust leidvate parameetrite nagu SCI (Surface Curvature Index - pinna kõverustegur), BDI (Base Damage Index - aluse vigastatuse tegur) ja BCI (Base Curvature Index - aluse kõverustegur) rakendusvõimaluste uurimine meie tingimustes. See hõlmab FWD mõõtmisel tekkiva vajumiskausi kuju uurimist, parameetrite ja seotud kihtide paksuse vaheliste ning katendi üldise E-mooduli vaheliste seoste olemasolu kontrollimist ning seoste ilmnemisel SCI, BDI ja BCI maksimaalsete lubatavate väärtuste esitamist.

Katendi erinevate konstruktsioonikihtide hindamiseks on võimalik kasutada:

- Seotud kihtide puhul – Surface Curvature Index (SCI) e. pinna kõverustegur – FWD läbivajumisandurite D1 ja D2 lugemite vahe ($d_0 - d_{300}$); SCI väärtus iseloomustab katte pinnast kuni 300 mm sügavusel asuva kihi seisukorda;
- Aluse puhul – Base Damage Index (BDI) e. aluse vigastatuse tegur – FWD läbivajumisandurite D2 ja D3 lugemite vahe ($d_{300} - d_{600}$); BDI väärtus iseloomustab katte pinnast 300 kuni 600 mm sügavusel asuva kihi seisukorda;
- Aluspinnase puhul – Base Curvature Index (BCI) e. aluse kõverustegur – FWD läbivajumisandurite D6 ja D7 lugemite vahe ($d_{1200} - d_{1500}$); BCI väärtus iseloomustab katte pinnast 1200 kuni 1500 mm sügavusel asuva kihi seisukorda.

Kõikide nende väärtuste leidmisel on arvestatud, et 50 kN koormuse puhul on vajalik kontaktsurve ekvivalent 300 mm plaadil 707 kPa.

Pinna kõverusteguri ehk SCI (Surface Curvature Index), aluse vigastatuse teguri ehk BDI (Base Damage Index) ja aluse kõverusteguri ehk BCI (Base Curvature Index) kasutamise eeliseks on asjaolu, et vajalikud arvutusvalemid on lihtsad. Eestis on neid parameetreid seni vähe kasutatud ja otsesed piirväärtused antud parameetritele vajavad veel täpsustamist, kuid lähtudes võrdlusmomendist (võrreldes toodud väärtusi nendes kohtades, kus katendis probleeme ei ole, nende kohtadega, kus probleemid esinevad) on võimalik neid siiski ka juba praegu kasutada.

Uurimistöös leiab kajastamist kõik vajumiskausi ja selle parameetritega (SCI, BDI ja BCI) seonduv. Tuuakse välja niiskuspaikkondadele ja seotud kihtide paksuse vahemikele vastavad

iseloomulikud vajumiskausside kujud, samuti esitatakse nii terve valimi kui ka niiskuspaikkondade, seotud kihtide paksuse vahemike ja aluspinnase kohta leitud SCI, BDI ja BCI keskmised väärtused. Esitatakse seosed nii niiskuspaikkonnast kui ka katte liigist lähtuvalt määratud katendi üldiste E-moodulite ja parameetrite SCI, BDI ja BCI vahel, mille alusel on välja pakutud (lähtuvalt Elastsete teekatendite projekteerimise juhendis 2001-52 [4] toodud minimaalsetest E-moodulite väärtustest) maksimaalsed lubatavad parameetrite väärtused. Samuti on kirjeldatud seoseid katendi seotud kihtide paksuse ja parameetrite SCI, BDI ja BCI vahel.

Käesoleva uurimistöö tulemuste alusel peaks muutuma lihtsamaks katendi osade, nagu katte, aluse ja aluspinnase, seisukorrale hinnangu andmine ja sellest tulenevalt õige remondimeetodi valimine.

1. EESMÄRGID

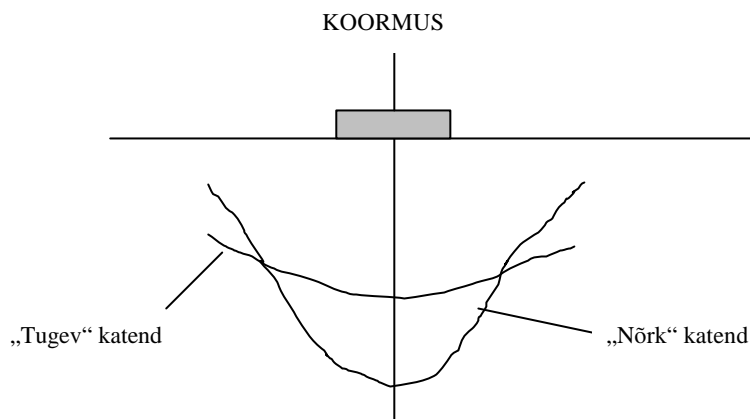
Hetkel on meil võimalik arvutada katendi üldine E-moodul kattekihtide peal ja teatud mööndustega ka katte pinnast 300 mm sügavusel [5]. Eestis kasutataval Dynatest FWD 8000 seadmel on seitse vajumisandurit: üks koormusplaadi tsentris ja teised sellest kaugustel 300, 600, 750, 900, 1200 ja 1500 mm. Siia maani oleme ära kasutanud vaid teatud osa saadud mõõtmistulemustest. Käesoleva uurimistöö eesmärk ongi leida FWD mõõtmistel saadud tulemustele laiemat rakendust.

Nagu sissejuhatuses öeldud, on viimasel kümnel aastal suur osa Eesti põhimaanteedest saanud uue katte, kuid muldkeha on jäänud tähelepanu alt välja (osaliselt kindlasti rahanappuse tõttu). Samas on liikluskoormused oluliselt kasvanud ning ilmnenud on katte alla jäävatest kihtidest tulenevad deformatsioonid. Seega tuleb edaspidi remontide projekteerimisel hinnata kogu olemasoleva teekonstruktsiooni seisukorda kattekihtidest aluspinnaseni ja lähtuvalt ilmnenud vajadusest otsustada edasine tegevus (näiteks muldkeha teatud kihtide parendamine või välja vahetamine).

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida FWD seadme vajumisandurite mõõtetulemuste alusel leitud vajumiskausi kuju, lähtudes niiskuspaikkonna tüübist ning seotud kihtide paksusest. Oluliseks sai loetud uurida mujal maailmas (nii Euroopas kui ka USA-s) kasutatavate vajumiskausi parameetrite SCI, BDI ja BCI rakendamist Eesti tingimustes. Arvutused on teostatud 26 FWD mõõtepunkti andmetega aastatest 1999-2005.

2. ERINEVATE ISELOOMULIKE VAJUMISKAUSI KUJUDE VÕRDLUS

Vajumiskausi kuju visuaalne vaatlus annab meile infot katendi seisukorra kohta. Põhimõte on esitatud [joonisel 2.1](#). [10]



Joonis 2.1 Katendi seisukorra hindamine vajumiskausi kuju järgi

Käesoleva uurimistöo Informatsioonis 1 (2006-11/11) toodu põhjal võib arvata, et erinevate niiskuspaikkonna tüüpide puhul ilmnevad iseloomulikud vajumiskauside kujud. Samuti sõltub vajumiskausi kuju seotud kihtide paksusest ja katendi konstruktsioonist üldse.

2.1. Niiskuspaikkonna ja mõõtmisperioodi mõju vajumiskausi kujule

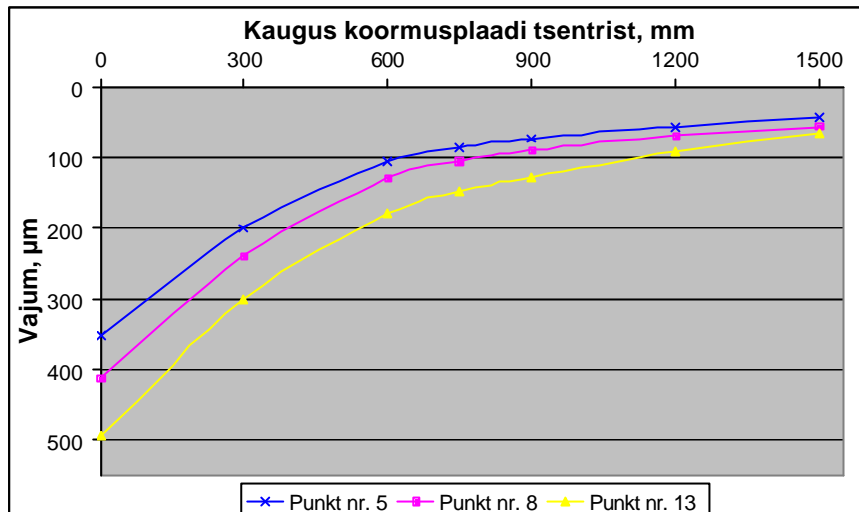
Vaatleme nüüd eeltoodust lähtuvalt mõningaid FWD mõõtmistel saadud vajumiskausse mõõdetuna erinevates punktides ja temperatuuri ning niiskuse seisukohalt erinevatel ajahetkedel.

Nagu sissejuhatuse mainitud, peavad FWD-ga mõõdetud erinevate deformatsioonide võrdlemiseks olema need taandatud teatud kindlale koormusele, sest igal konkreetsel mõõtmisel on FWD poolt katte pinnale rakendatav koormus on tingimustest sõltuvalt erinev, kuigi koormuse suurus ja langemiskõrgus on ühesugused. 50 kN koormuse puhul on vajalik kontaktsurve ekvivalent 300 mm plaadil 707 kPa ja sellele on ka kõik siin ja järgnevatel jaotistes toodud deformatsioonid ka taandatud.

Nagu [joonise 2.2](#) järgi arvata võib, kuulub:

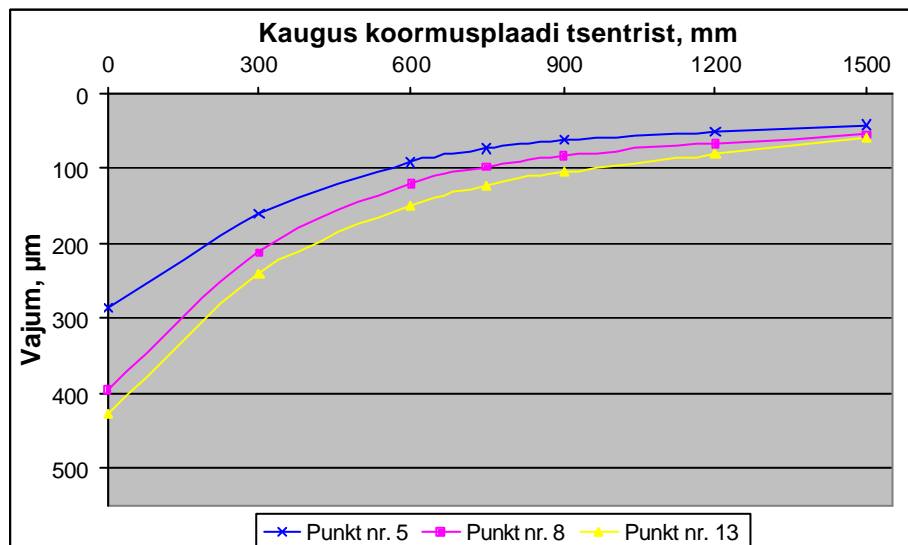
- mõõtepunkt nr. 5 esimesse,
- mõõtepunkt nr. 8 teise ja
- mõõtepunkt nr. 13 kolmandasse niiskuspaikkonda.

Katendi konstruktsiooni võiks pidada kõige tugevamaks punktis nr. 8 (asfaltbetoon 30 mm, bituumenstabiliseeritud alus 160 mm, killustikalus 170 mm, kruusliiv 340 mm) ja kõige nõrgemaks punktis nr. 13 (asfaltbetoon 30 mm, bituumenstabiliseeritud alus 60 mm, kruusliiv 310 mm). Kolme niiskuspaikkonna vajumite erinevused saavad alguse koormusplaadi tsentrist, mis osaliselt tuleneb kindlasti mulde kevadisest niiskusolukorrast. Kui mõõtepunktide nr. 5 ja nr. 8 katend jaotab koormust suhteliselt ühtemoodi, siis punktis nr. 13 esinev katend jaotab koormust halvemini – alates ühe meetri kauguselt koormusplaadi tsentrist ilmneb vajumiskausi graafikule tõmmatava puutuja suurem tõus võrreldes esimese ja teise niiskuspaikkonna vajumiskausi graafikutega.



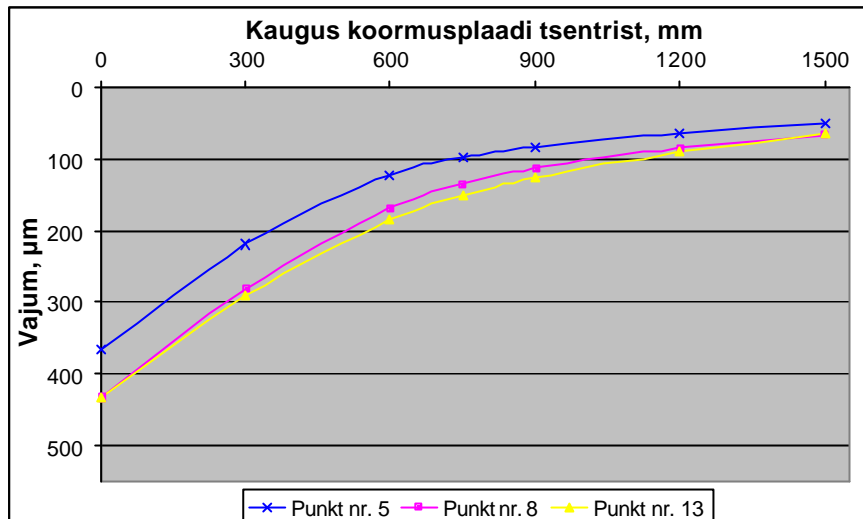
Joonis 2.2 Erinevate niiskuspaikkondade vajumiskaasi graafikud mõõdetuna mais (mp. 5 – I np, mp. 8 – II np, mp. 13 – III np)

Järgnevalt vaatleme samade mõõtepunktide vajumiskaaside graafikuid, mis koostatud suvel (kui mulle on jõudnud kuivada) ning sügisel tehtud mõõtmiste alusel.



Joonis 2.3 Erinevate niiskuspaikkondade vajumiskaasi graafikud mõõdetuna juulis (mp. 5 – I np, mp. 8 – II np, mp. 13 – III np)

Jooniselt 2.3 on näha, et vajumid võrreldes kevadise olukorraga on vähenenud nii koormusplaadi tsentris kui ka kaugemale jäävate andurite osas. Koormuse jaotuse seisukohalt on iga mõõtepunkti katendi olukord parem kui kevadel. Kolmandas niiskuspaikkonnas (mp. 13) jaotub koormus võrreldes teiste niiskuspaikkondadega suhteliselt ühtlasemalt kui kevadel, mis samuti tuleneb paranenud niiskusolukorrast.



Joonis 2.4 Erinevate niiskuspaikkondade vajumiskausi graafikud mõõdetuna oktoobris (mp. 5 – I np, mp. 8 – II np, mp. 13 – III np)

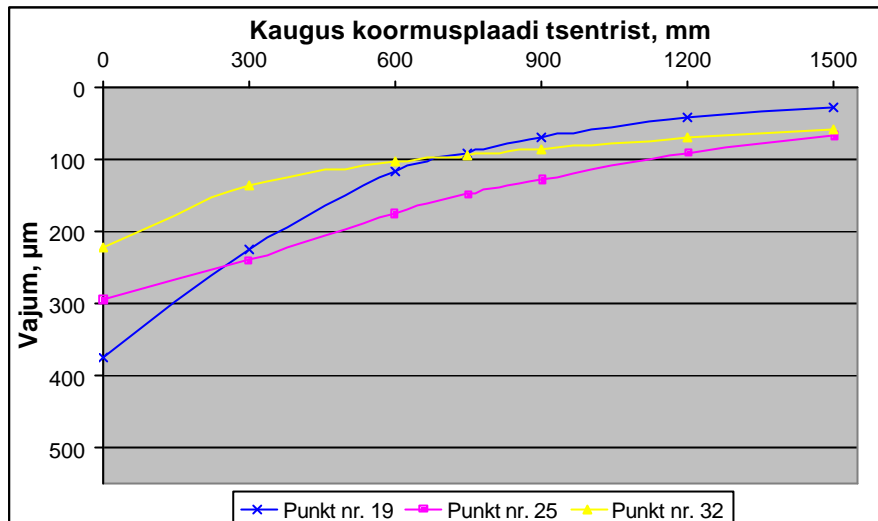
Sügisel on vajumid koormusplaadi tsestris kõigil juhtudel ilmselt sademete tõttu veidi kasvanud (joonis 2.4). Teise (mp. 8) ja kolmanda (mp. 13) niiskuspaikkonna vajumiskausid on suures ulatuses sarnased. Kõige paremini jaotab koormust mõõtmispunkti nr. 5 katend (I niiskuspaikkond).

2.2. Seotud kihtide paksuse ja mõõtmisperioodi mõju vajumiskausi kujule

Järgnevalt uurime seotud kihtide paksuse mõju vajumisgraafiku kujule. Seotud kihtide paksuse (h) alusel võiks katendid jagada siin kolme gruppi: $h < 15$ cm, 15 cm = $h = 25$ cm, $h > 25$ cm. Analüüsi teostame analoogselt niiskuspaikkonna alusel tehtud vajumiskausside kaju analüüsiga.

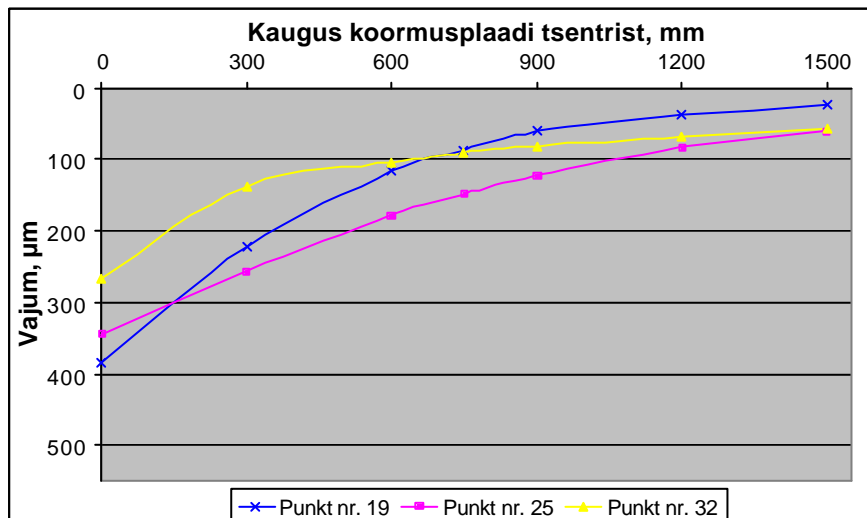
Analüüsiks valime FWD mõõtepunktid nr. 19, 25 ja 32, kus seotud kihtide paksused on vastavalt 10 cm, 21 cm ja 32 cm.

Seotud kihtide paksuste mõju vajumiskausi kujule iseloomustab joonis 2.5 – punktis nr. 32 ($h=32$ cm) on vajumite suurused teistega võrreldes koormusplaadi tsestri piirkonnas tunduvalt väiksemad ja koormus jaotub katendis ühtlaselt, samal ajal kui punkti nr. 19 ($h=10$ cm) vajumid koormusplaadi tsestri piirkonnas ja vajumiskausi graafikule tõmmatava puutuja tõus on silmnähtavalt suuremad, kui kahel teisel juhul. Mõõtepunkt nr. 25 ($h=21$ cm) esindab kahe eelneva vahepealset varianti.



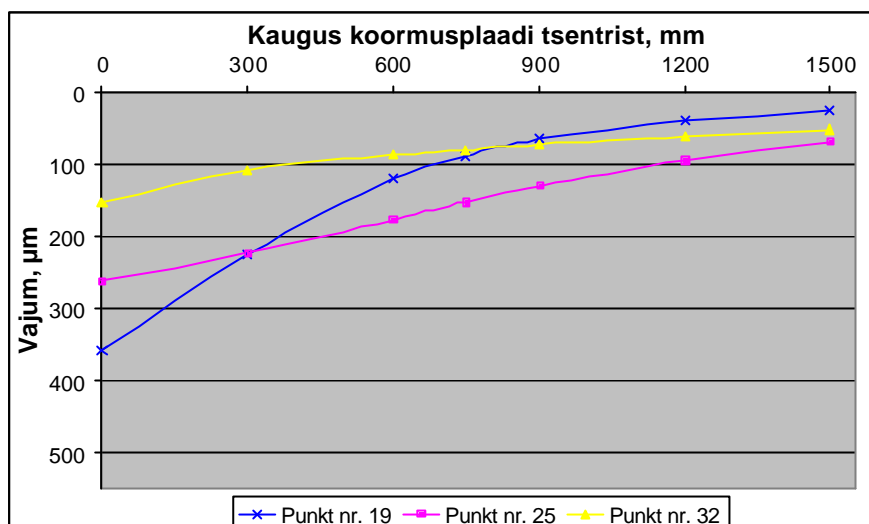
Joonis 2.5 Erinevate seotud kihtide paksuse vahemike vajumiskaasi graafikud mõõdetuna mais (mp. 19 – h=10 cm, mp. 25 – h=21 cm, mp. 32 – h=32 cm)

Suvel mõõdetud vajumiskaaside üldpilt on analoogne kevadel esinenuga (joonis 2.6), ainult punktide nr. 25 (h=21 cm) ja 32 (h=32 cm) vajumid koormusplaadi tsentri piirkonnas on suurenenud (ilmselt sademete tõttu). Punkti nr. 19 (h=10 cm) vajumiskaasi kuju on muutunud minimaalselt.



Joonis 2.6 Erinevate seotud kihtide paksuse vahemike vajumiskaasi graafikud mõõdetuna augustis (mp. 19 – h=10 cm, mp. 25 – h=21 cm, mp. 32 – h=32 cm)

Jooniselt 2.7 on näha, et oktoobris on katendi olukord võrreldes mai ja augustiga kõigis vaadeldud punktides kandevõime seisukohast soodsaim. Vaadates punkti nr. 19 (h=10 cm) käitumist aasta lõikes, võib öelda, et katendi stabiilne niiskusolukord on pidevalt tagatud, kuna kõigil kolmel joonisel on vajumiskaasi kujud ja asukoht teljestikus lähedased.



Joonis 2.7 Erinevate seotud kihtide paksuse vahemike vajumiskausi graafikud mõõdetuna oktoobris (mp. 19 – h=10 cm, mp. 25 – h=21 cm, mp. 32 – h=32 cm)

2.3. Järeldused

Eeltoodu põhjal saame väita, et erinevate niiskuspaikkondade ja seotud kihtide paksuste teatud vahemike puhul sõltub vajumiskausside kuju:

- mõõtmisperioodist –kas mõõtmised on teostatud kevadel, suvel või sügisel;
- sademete hulgast – mis mõjutavad vajumiskausi kuju muutust mõõtmisperioodi kestel;
- konkreetsest katendikonstruktsioonist ja aluspinnasest.

Seega ainus näitaja, mis mingilgi määral iseloomustab üldiselt erinevates niiskuspaikkondades asetseva või erineva seotud kihtide paksusega katendi tugevust, on vajum FWD koormustsentris (ehk 0-anduri või D1 lugem). Vajumiskausi kuju üldistada ei saa ja seda tuleb analüüsida igas konkreetses mõõtepunktis eraldi.

3. VAJUMISKAUSI PARAMEETRID SCI, BDI JA BCI

Katendi vajumiskaussi iseloomustavate parameetrite pinna kõverusteguri ehk SCI (Surface Curvature Index), aluse vigastatuse teguri ehk BDI (Base Damage Index) ja aluse kõverusteguri ehk BCI (Base Curvature Index) leidmiseks on kasutusel tabelis 3.1 esitatud seosed [6; 8].

Olgu ka märgitud, et edaspidi on siintoodud parameetreid võimalike segaduste vältimiseks nimetatud inglise keele baasil moodustunud lühenditega.

Tabel 3.1 Vajumiskausi parameetrid, arvutusvalemid, ühikud ja kasutatavus

Nimi	Valem	Ühik	Kasutatavus
Keskpunkti deformatsioon	$D1$	μm	Katendi üldise seisukorra määramine
Mitte keskpunkti deformatsioon	Dr	μm	Katendi seisukorra määramine sügavusel r
Surface Curvature Index, SCI (Pinna kõverustegur)	$D1 - Dr$	μm	Seotud kihtide väsimuse määramine
Base Damage Index, BDI (Aluse vigastatuse tegur)	$D2 - Dr$	μm	Aluse kihtide seisukorra määramine
Base Curvature Index, BCI (Aluse kõverustegur)	$Dn-1 - Dn$	μm	Aluspinnase seisukorra määramine

Kus $D1$ - deformatsioon koormusplaadi all (e. koormusplaadi keskpunktis asuva anduri mõõdetud deformatsioon), μm ;
 Dr - deformatsioon kaugusel r koormusplaadi keskpunktist, μm ;
 Dn - koormusplaadi keskpunktist kõige kaugema (e. viimase) anduri mõõdetud deformatsioon, μm ;
 $Dn-1$ - koormusplaadi keskpunktist enne kõige kaugemat andurit asuva (e. eelviimase) anduri mõõdetud deformatsioon, μm ;
 $D2$ - koormusplaadi keskpunktile lähima anduri mõõdetud deformatsioon, μm

Eelmainitud parameetrid leiavad kasutust katendi seisukorra määramisel nii paljudes Euroopa riikides kui ka USA-s. Katendi üldise seisukorra võimalikult täpseks hindamiseks vaadeldakse katendi põhimõttelisi kihte (katendi osasid) eraldi: seotud kihid, alus ja aluspinnas. Sellisel viisil tehtav hinnang osutab ka kihile, kus võimalikud probleemid (nt. ebasobiv materjal) paiknevad. SCI, BDI ja BCI eeliseks on ka asjaolu, et vajalikud arvutusvalemid on lihtsad.

Eestis käesoleva hetkeni nimetatud parameetrite kasutamise otstarbekust uuritud ei ole, rääkimata parameetrite endi kasutamisest. Käesolev esimene lähenemine ongi loodetavasti aluseks edasisele SCI, BDI ja BCI parameetrite rakendamisele ning leitud rakenduste täiustamisele ja uute rakenduste otsimisele.

Katendi erinevate konstruktsioonikihtide hindamiseks on võimalik kasutada:

- Seotud kihtide puhul – Surface Curvature Index (SCI) e. pinna kõverustegur – FWD läbivajumisandurite $D1$ ja $D2$ lugemite vahe ($d_0 - d_{300}$); SCI väärtus iseloomustab katte pinnast kuni 300 mm sügavusel asuva kihi seisukorda;
- Aluse puhul – Base Damage Index (BDI) e. aluse vigastatuse tegur – FWD läbivajumisandurite $D2$ ja $D3$ lugemite vahe ($d_{300} - d_{600}$); BDI väärtus iseloomustab katte pinnast 300 kuni 600 mm sügavusel asuva kihi seisukorda;
- Aluspinnase puhul – Base Curvature Index (BCI) e. aluse kõverustegur – FWD läbivajumisandurite $D6$ ja $D7$ lugemite vahe ($d_{1200} - d_{1500}$); BCI väärtus iseloomustab katte pinnast 1200 kuni 1500 mm sügavusel asuva kihi seisukorda.

Kõikide väärtuste leidmisel on arvestatud, et 50 kN koormuse puhul on vajalik kontaktsurve ekvivalent 300 mm plaadil 707 kPa.

Arvutusvalemitest (tabel 3.1) ilmneb, et parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtused on seotud vajumiskausi graafiku teatud lõigule (teatud kaugusele koormusplaadi tsentrist) tõmmatava

puutuja tõusuga, millest oli juttu eelnevas peatükis. Mida suurem on puutuja tõus teatud lõigus, seda suurem on ka vastava parameetri (SCI, BDI, BCI) väärtus. Seega ei pruugi katendi seisukorrast ülevaate saamiseks vajumiskausi graafikut välja joonistada, vaid selle asemel võib arvutada parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtused.

Tabelist 3.2 on näha, et 26 FWD mõõtepunkti andmete alusel leitud parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtuste hajuvus on suhteliselt suur, mis tuleneb vaatluse all olnud katendite väga erinevast seisukorrast ja loomulikult ka katendikonstruktsioonide erinevusest.

Tabel 3.2 SCI, BDI ja BCI väärtused (26 FWD mõõtepunkti andmete põhjal)

Väärtused	SCI	BDI	BCI
Keskmine väärtus, μm	144	88	15
Maksimaalne väärtus, μm	300	163	31
Minimaalne väärtus, μm	63	29	5
Standardhälve	53	29	7

Samas tuleb mainida, et nii maksimaalsed kui ka minimaalsed parameetrite väärtused ei lange vaid kahele mõõtepunktile. Näiteks mõõtepunktis nr. 12, kus esines BCI minimaalne väärtus 5 μm , ületavad SCI ja BDI väärtused 183 μm ja 109 μm märgatavalt vastavaid keskmisi väärtusi (Lisa 1, tabel 3.2). Seega võiks järeldada, et mõõtepunkti nr. 12 katend on rajatud väga heale aluspinnasele, kuid katendi enda seisukord ei ole kiita. Kui antud mõõtepunkti geoloogilist tulpa (Informatsiooni 1 lisa 2) vaadata, siis selgub tehtud järelduste paikapidavus: aluspinnaseks on rähkpinnas kerge saviliiva sisaldusega ning katend koosneb 45 cm peenliivast, 14 cm kruusast ning seotud kihtide paksus on 11 cm.

Ainuke parameetrite maksimaalsete või minimaalsete väärtuse kokkulangevus ilmneb BDI ja BCI maksimaalsete väärtuste osas mõõtepunktis nr. 1 (SCI väärtuseks 249 μm). Mõõtepunkti nr. 1 geoloogilisel tulbal hakkab esmalt silma 20 cm paksune turbakiht, mis asub teekatte pinnast 140 cm sügavusel. Sellest tulenevalt ilmnebki BCI kõrge väärtus. Nimetatud turbakihil asub 134 cm lubjakivikillustiku ja –sõelmete kiht, millele on paigaldatud katteks 6 cm asfaltbetooni. Ilmselt ei ole selles paksus lubjakivikillustiku ja –sõelmete kihis esineva materjali kvaliteet ühtlane või on katendi ehitamisel tihendamine olnud problemaatiline, millest tulenevalt ilmnebki suurim BDI väärtus vaadeldud FWD mõõtepunktide hulgas. (Lisa 1, tabel 3.2).

Järgnevalt vaatleme SCI, BDI ja BCI keskmisi väärtusi sõltuvalt niiskuspaikkonna tüübist, seotud kihtide paksusest ja aluspinnasest.

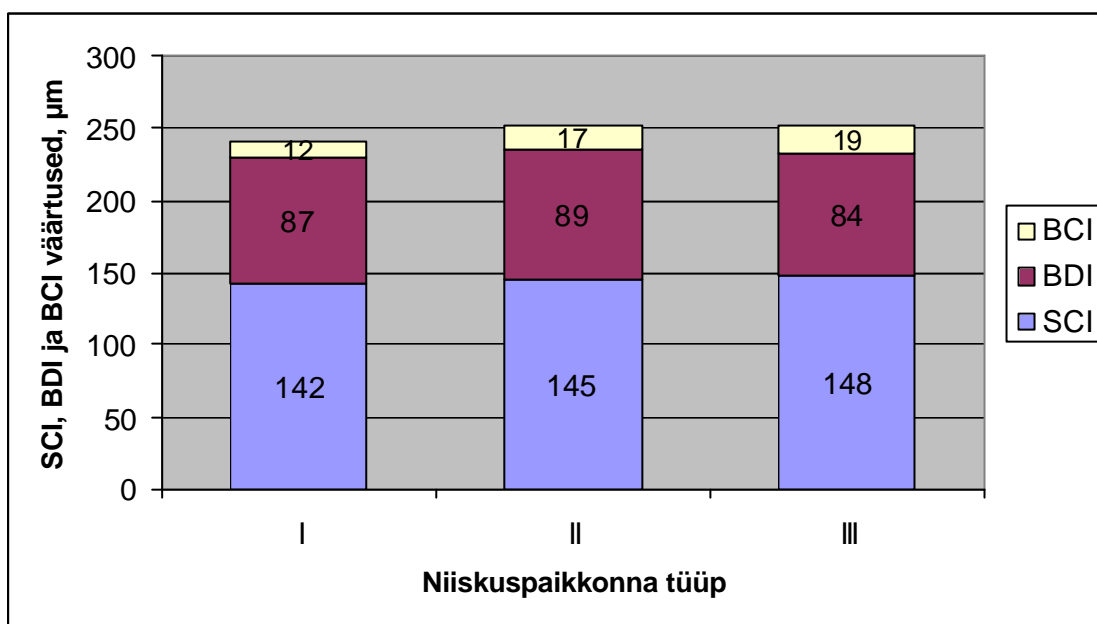
3.1. Niiskuspaikkonna mõju SCI, BDI ja BCI väärtustele

Jagades mõõtepunktid niiskuspaikkondade järgi on leitud igale paikkonnale vastavad parameetrite keskmised väärtused (tabel 3.3, joonis 3.1).

Tabel 3.3 Niiskuspaikkondadele vastavad SCI, BDI ja BCI keskmised väärtused

Niiskuspaikkonna tüüp	SCI keskmine väärtus, μm	BDI keskmine väärtus, μm	BCI keskmine väärtus, μm
I	142	87	12
II	145	89	17
III	148	84	19

Ilmnenud standardhälvete väärtused olid lähedased 26 mõõtepunkti puhul esinenutega (tabel 3.2) ja siinkohal neid uuesti ei esitata.



Joonis 3.1 Niiskuspaikkondadele vastavad SCI, BDI ja BCI keskmised väärtused

Nagu tabelist 3.3 ja jooniselt 3.1 näha, ei erine niiskuspaikkondade keskmised parameetrite väärtused üksteisest ega ka eespool mainitud kogu 26 mõõtepunkti keskmistest oluliselt. Kõige ilmekam on ehk BCI väärtuste muutus niiskuspaikkondade lõikes – mida niiskem, seda suurem BCI väärtus.

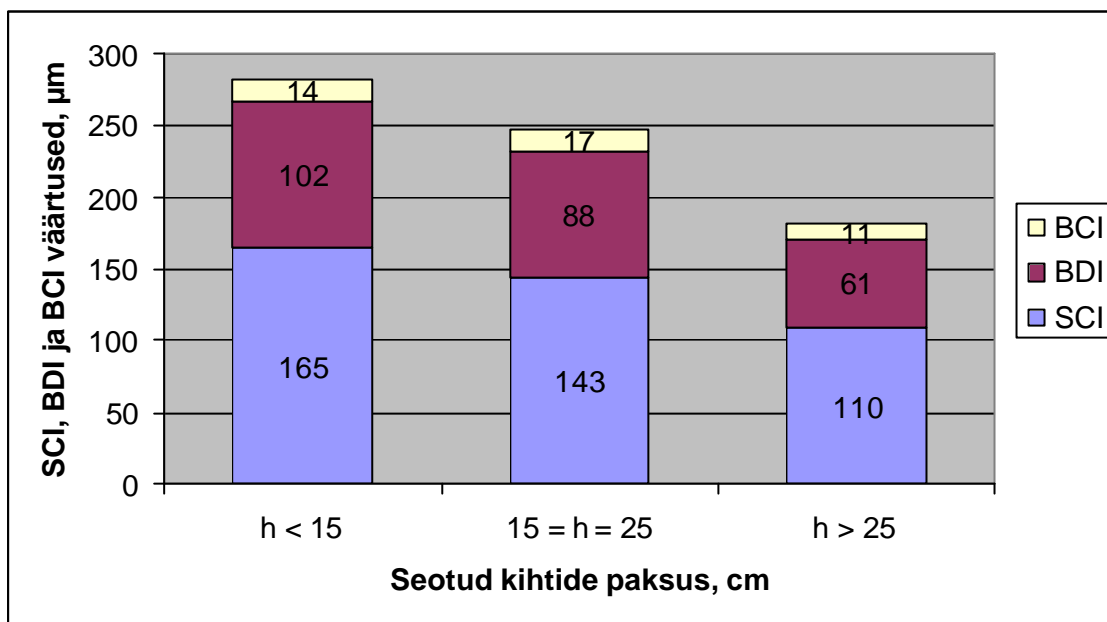
3.2. Seotud kihtide paksuse mõju SCI, BDI ja BCI väärtustele

Nagu eelnenud peatükis kirjeldatud, sai katendid jagatud seotud kihtide paksuse (h) alusel kolme gruppi: $h < 15 \text{ cm}$, $15 \text{ cm} = h = 25 \text{ cm}$, $h > 25 \text{ cm}$. Igale grupile on leitud vastavad parameetrite SCI, BDI ja BCI keskmised väärtused (tabel 3.4, joonis 3.2).

Ilmnenud SCI, BDI ja BCI väärtuste standardhälbed olid samuti lähedased (keskmiselt küll veidi väiksemad) 26 mõõtepunkti puhul esinenutega (tabel 3.2) ja siinkohal neid ei esitata.

Tabel 3.4 Seotud kihtide paksusele vastavad SCI, BDI ja BCI keskmised väärtused

Seotud kihtide paksus, cm	SCI keskmine väärtus, μm	BDI keskmine väärtus, μm	BCI keskmine väärtus, μm
$h < 15$	165	102	14
$15 = h = 25$	143	88	17
$h > 25$	110	61	11



Joonis 3.2 Seotud kihtide paksusele vastavad SCI, BDI ja BCI keskmised väärtused

Kui niiskuspakkondade alusel leitud SCI, BDI ja BCI keskmiste väärtuste põhjal põhjanevaid järeldusi teha ei õnnestunud, siis tabelist 3.4 ja jooniselt 3.2 on näha, et seotud kihtide paksusel on oluline mõju vajumiskausi parameetrite väärtustele. Üldise seosena võiks välja tuua, et mida suurem on seotud kihtide paksus, seda väiksemad on SCI, BDI ja BCI väärtused ning vastupidi. Konkreetsete seoste leidmine on esitatud peatükis 3.6.

3.3. Aluspinnase tüübi mõju SCI, BDI ja BCI väärtustele

Kolmandaks on leitud SCI, BDI ja BCI keskmised väärtused mõõtepunktides esinenud erinevate aluspinnaste kohta. Aluspinnasena tuleb mõista siin ja järgnevalt kattest 1,2 – 1,5 m sügavusel (tuleneb FWD seadme andurite kaugusest koormusplaadi tsentrist) asuvat pinnast (materjali). Siinkohal tuleb muidugi märkida, et mõõtepunkte sellisel viisil grupeerides peaks eelkõige just BCI parameetri väärtus (mis just aluspinnast kirjeldabki) saama iseloomulikuks vastavale aluspinnasele. Tervikpildi ilmestamiseks on järgnevalt ka SCI ja BDI väärtused ära toodud.

Kahjuks on andmed osade mõõtepunktide geoloogia osas ebapiisavad. Puuraugu sügavus peaks olema vähemalt 1,5 m katte pinnast, kuid hetkel on mitmeid punkte, kus esinevad materjalid ja pinnased on teada kuni 1 m sügavuseni (või isegi vähem) katte pinnast mõõdetuna. Sel juhul sai eeldatud, et sügavusel 1 m katte pealt mõõdetuna esineva materjali või pinnase kihi paksus on piisav, et lugeda see aluspinnaseks (mis looduses ei pruugi tegelikult nii olla). Kui geoloogiline tulp andis katendist ülevaate 1,5 m või rohkema ulatuses, siis sai aluspinnaseks võetud 1,2 – 1,5 m vahel esinenud pinnas (materjal). Nimetatud vahemikus mitme kihi esinemisel sai eelistatud paksemat kihti. Mõned FWD mõõtepunktid jäid siiski edasise vaatluse alt välja, näiteks punkt nr. 13, mille geoloogiline tulp ulatub vaid 0,4 m sügavusele.

FWD mõõtepunktide aluspinnaste tüüpide skaala on suhteliselt lai. Kuna tegemist on keskmiste leidmisega, siis oli eesmärgiks luua grupid, kus saab arvestada vähemalt kolme mõõtepunkti andmetega. Eelnevast ja materjalide omadustest tulenevalt said moodustatud järgmised aluspinnaste grupid:

- liiv (kümme FWD mõõtepunkti),
- kruus ja kruusliiv (kolm punkti),
- saviliiv (kuus punkti),
- muud (kolm punkti).

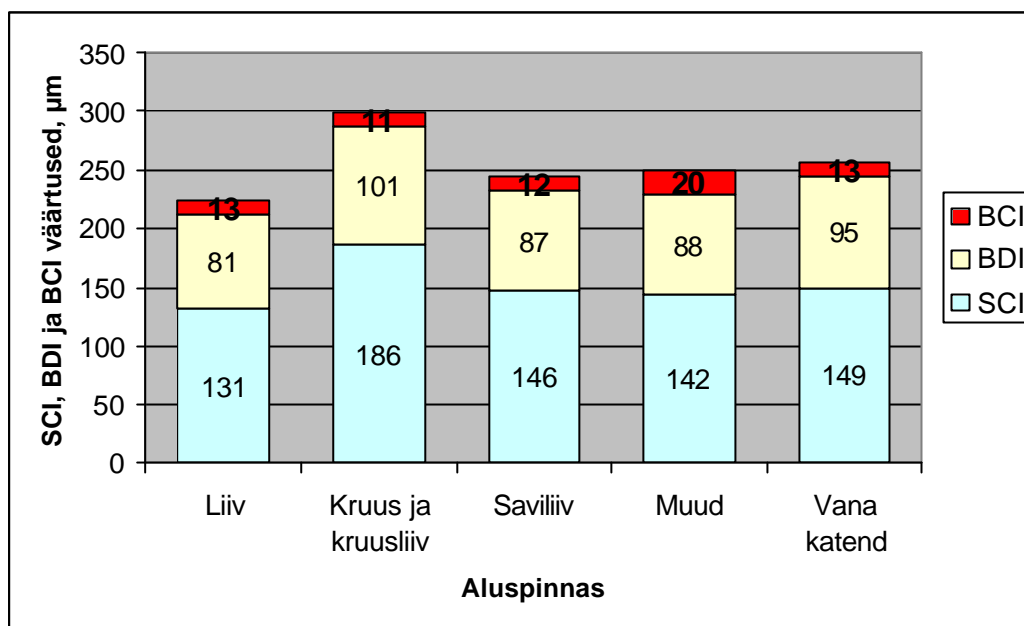
Esimesed kaks rühma sisaldavad teedeehituse mõistes väga häid materjale, erinedes üksteisest terasuuruse poolest. Neljas aluspinnaste grupp (muud) koosneb üldiselt kõige viletsamatest pinnastest – muld, savi ja turvas.

Mõõtepunktis nr. 34 on 0,82 m sügavusel katte pinnast vana katendikonstruktsioon. Järgnevalt sai vana katendit kui tervikut vaadeldud aluspinnasena, võrreldes teda eelneva nelja aluspinnase grupiga.

Tabel 3.5 Aluspinnase tüübile vastavad SCI, BDI ja BCI keskmised väärtused

Aluspinnas	SCI keskmine väärtus, µm	BDI keskmine väärtus, µm	BCI keskmine väärtus, µm
Liiv	131	81	13
Kruus ja kruusliiv	186	101	11
Saviliiv	146	87	12
Muud	142	88	20
Vana katend	149	95	13

Nagu eespool mainitud, ei tasuks [joonisel 3.3](#) liigset tähelepanu pöörata SCI ja BDI väärtustele, mis said lisatud vaid tervikliku pildi eesmärgil. Võrreldes [joonisel 3.3](#) punase värviga tähistatud BCI väärtusi, võib öelda, et liivast, kruusliivast, kruusast ja saviliivast aluspinnaste BCI väärtused on praktiliselt võrdsed. Ka vana katendi puhul on BCI väärtus samas suurusjärgus. Küsimusele, miks BCI väärtused liivast, kruusliivast, kruusast ja saviliivast aluspinnase puhul olid lähedased, võiks vastata, et seega ilmselt ei ole omaduste erinevused aluspinnase seisukohalt nii suured, et parameetri väärtust mõjutada. Nimetatud aluspinnastest eristuvad vaid muud ehk eelnevatest märksa viletsamad pinnased – BCI keskmine väärtus 20 µm on heade aluspinnaste vastavatest väärtustest peaaegu kaks korda suurem.



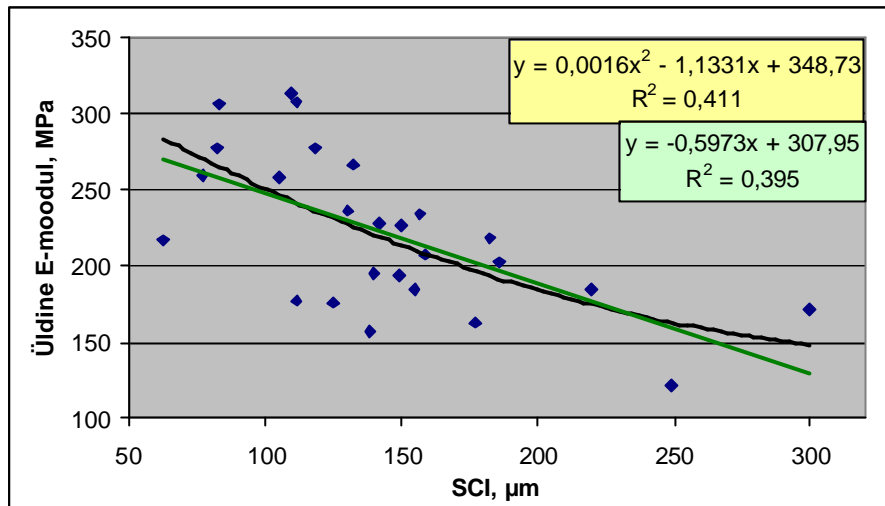
Joonis 3.3 Aluspinnase tüübile vastavad SCI, BDI ja BCI keskmised väärtused

3.4. Katendi üldise elastsusmooduli ja SCI, BDI ning BCI väärtuste vahelised seosed

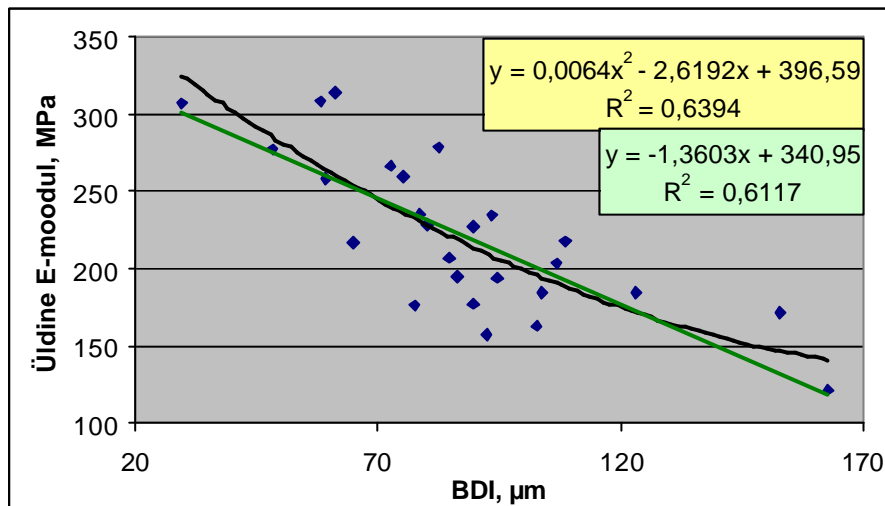
Eelnevalt sai uuritud niiskuspaikkonna, seotud kihtide paksuse ja aluspinnase mõju parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtustele. Käesoleva peatüki eesmärgiks on kontrollida, kas esineb seoseid nimetatud parameetrite ja katendi üldise elastsusmooduli vahel. Teades parameetri SCI, BDI või BCI ning katendi üldise E -mooduli vahelist sõltuvust, on Elastsete teekatendite projekteerimise juhendis 2001-52 [4] toodud minimaalsetest vajalikest E -moodulitest lähtuvalt võimalik leida maksimaalsed lubatavad parameetri(te) väärtused, mille alusel katendi seisukorda hinnata.

Katendi üldiste E -mooduli väärtuste arvutamiseks on kasutatud käesoleva Informatsioonis 1 (2006-11/I1) esitatud põhimõtteid, mille alusel võib E -mooduli määrata lähtuvalt niiskuspaikkonnast või katte liigist.

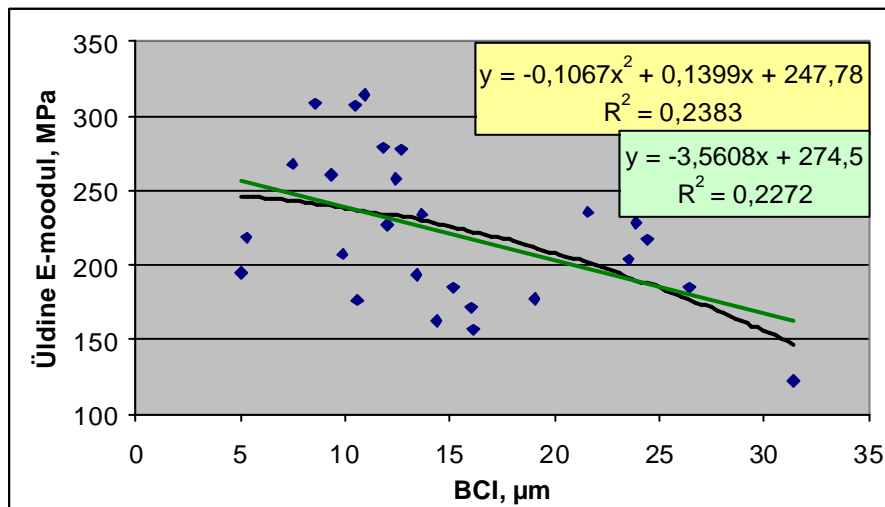
Joonistel 3.4-3.6 on esitatud SCI, BDI ja BCI seosed niiskuspaikkonnast lähtuvalt määratud katendi üldise E -mooduliga, andmed on nii siin kui edaspidi silutud teist järku polünoomiga. Teist järku polünoomiga silumisel saavutatakse küll suhteliselt hea (võrreldes alternatiividega) determinatsioonikordaja (R^2) väärtus, kuid miinuseks on asjaolu, et tuleb arvestada piiridega, mille ulatuses saadud seostega leitud tulemused on loogilised. Kui ei ole eraldi välja toodud, tuleks arvestada joonistel esitatud (joonistelt ilmnevate) piiridega. Võrdluseks on lisatud ka lineaarne trendijoon.



Joonis 3.4 Niiskuspaikkonnast lähtuvalt määratud katendi üldise E-mooduli ja SCI vaheline seos



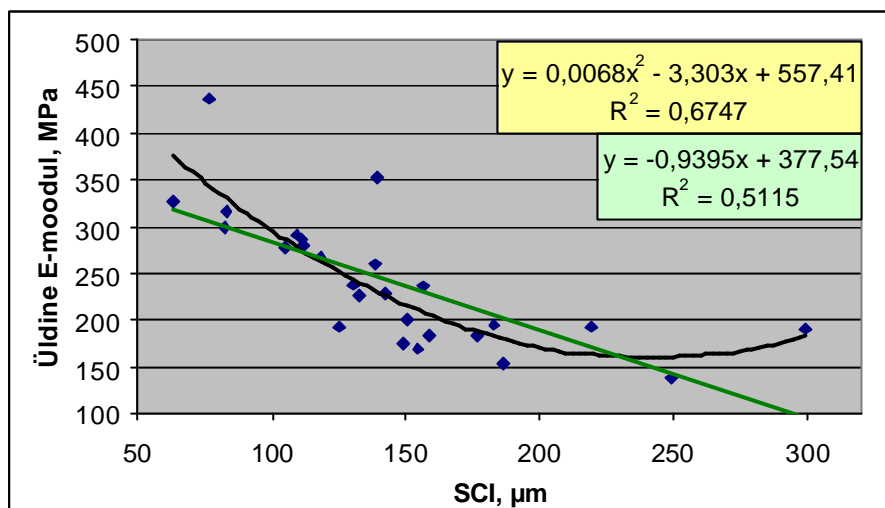
Joonis 3.5 Niiskuspaikkonnast lähtuvalt määratud katendi üldise E-mooduli ja BDI vaheline seos



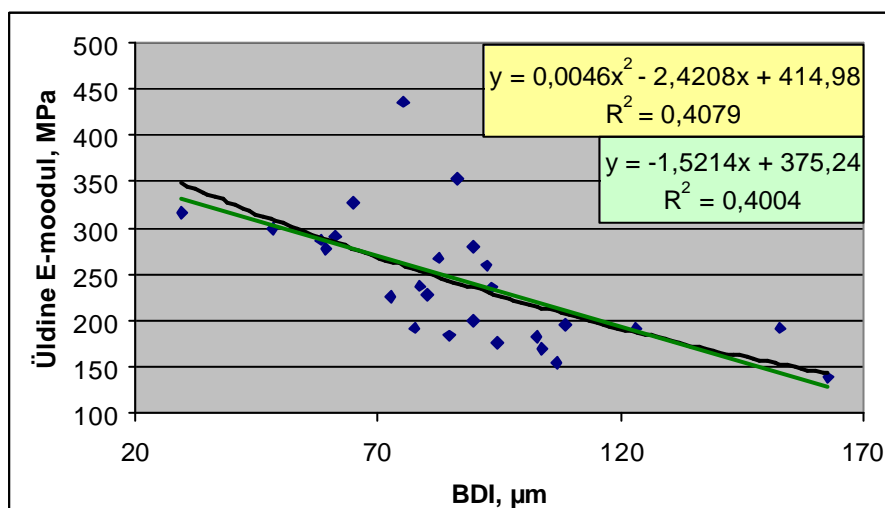
Joonis 3.6 Niiskuspaikkonnast lähtuvalt määratud katendi üldise E-mooduli ja BCI vaheline seos

Jooniste 3.4, 3.5 ja 3.6 põhjal võib öelda, et ilmnesid nõrgad kuni keskmise tugevusega seosed ning loogikavigu nimetatud joonistel toodud parameetrite väärtuste vahemikes ei esine. Linearsel ja polünoomi abil teostatud silumisel ilmnenuid determinatsioonikordajate väärtused on lähedased.

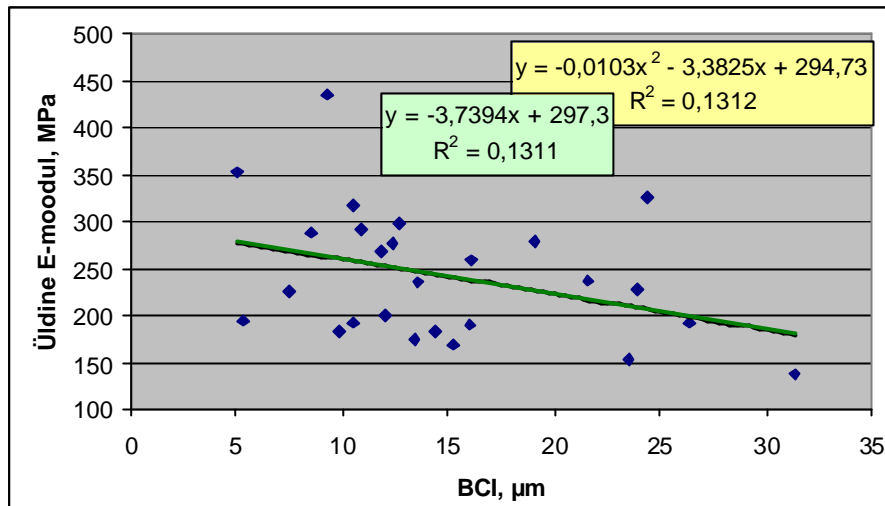
Järgnevatel joonistel on katendi üldine E-moodul määratud lähtuvalt katte liigist (joonised 3.7-3.9).



Joonis 3.7 Katte liigist lähtuvalt määratud katendi üldise E-mooduli ja SCI vaheline seos



Joonis 3.8 Katte liigist lähtuvalt määratud katendi üldise E-mooduli ja BDI vaheline seos



Joonis 3.9 Katte liigist lähtuvalt määratud katendi üldise E-mooduli ja BCI vaheline seos

Joonistelt 3.7, 3.8 ja 3.9 on näha, et antud juhul ilmnes SCI osas märkimisväärselt parem seos ($R^2 = 0,67$) võrreldes niiskuspaikkonnast lähtuvalt määratud katendi üldise E-mooduli ja SCI vahelise seosega. Tähelepanu tuleb juhtida [jooniselt 3.7](#) ilmnevale asjaolule, et nimetatud seose kasutamisel saadakse loogiliselt korrektsed tulemused SCI väärtustel alla 240 μm . Samas BDI ja BCI seoste R^2 väärtused olid kõrgemad eelmisel juhul. Lineaarsel ja polünoomi abil teostatud silumisel ilmnenuid determinatsioonikordajad on samas suurusjärgus.

Seega võib öelda, et SCI, BDI ja BCI ning katendi üldise E-mooduli vahel esinevad arvestatavad seosed. Toome iga parameetri kõige kvaliteetsema seose veelkord välja:

$$E_{\text{üld}} = 0,0068 \cdot \text{SCI}^2 - 3,303 \cdot \text{SCI} + 557,41 \quad R^2 = 0,67 \quad (3.1)$$

$$E_{\text{üld}} = 0,0064 \cdot \text{BDI}^2 - 2,619 \cdot \text{BDI} + 396,59 \quad R^2 = 0,64 \quad (3.2)$$

$$E_{\text{üld}} = -0,1067 \cdot \text{BCI}^2 + 0,1399 \cdot \text{BCI} + 247,78 \quad R^2 = 0,24 \quad (3.3)$$

Kui SCI ja BDI determinatsioonikordaja R^2 väärtused on praktiliselt võrdsed ja viitavad tugevale seosele, siis BCI osas viitab R^2 väärtus pigem nõrgale seosele.

Seos (3.1) on loogiliselt korrektsete tulemuste saamisel kehtiv SCI väärtuste vahemikus $0 \mu\text{m} < \text{SCI} = 240 \mu\text{m}$. Seose (3.2) puhul on BDI väärtuste vahemiku piirideks $0 \mu\text{m} < \text{BDI} = 200 \mu\text{m}$. Seose (3.3) puhul on BCI väärtuste vahemiku piirideks $0 \mu\text{m} < \text{BCI} = 40 \mu\text{m}$.

3.5. SCI, BDI ja BCI maksimaalsed lubatavad väärtused

Elastsete teekatendite projekteerimise juhendis 2001-52 [4] on toodud katendi tugevusarvutuseks vajalikud minimaalsed katendi üldised E-moodulid, mis valitakse sõltuvalt maantee (sama kehtib tänavate kohta) klassist ning katendi tüübist. Arvestades, et katendi üldise E-mooduli ning SCI, BDI ja BCI vahel esinevad eelmises jaotises toodud seosed, on võimalik leida nimetatud parameetritele maksimaalsed väärtused (mida väiksem on E-moodul, seda suuremad on parameetrite väärtused).

Elastsete teekatendite projekteerimise juhendis 2001-52 [4] toodud minimaalsete E-moodulite väärtused jäävad püsi- ja kergkatendite osas vahemikku 120 – 260 MPa. Sellele vahemikule vastavad SCI, BDI ja BCI maksimaalsed väärtused, mis on leitud seostega (3.1), (3.2) ja (3.3), on esitatud tabelis 3.6.

Tabel 3.6 Lähtuvalt minimaalsest katendi üldisest E-moodulist leitud maksimaalsed lubatavad SCI, BDI ja BCI väärtused

E_{min} , MPa	SCI_{max} , μm	BDI_{max} , μm	BCI_{max} , μm
260	119	61	-
240	132	73	9
220	146	85	17
200	163	99	22
180	184	115	26
160	220	135	29
140	-	162	32
120	-	-	35

Tabelis 3.6 esinevad tühjad kohad tulenevad kasutatud funktsioonide loogilistest piiridest, mis on toodud peatükis 3.6. Nn. „piiriks“ oleva SCI väärtuse 240 μm puhul on katendi üldise E-mooduli väärtus 156 MPa, BDI piirväärtuse 200 μm puhul on E-mooduli väärtus 129 MPa ja BCI piirväärtuse 40 μm puhul on katendi üldise E-mooduli väärtuse ülemiseks piiriks 248 MPa. Viimase parameetri puhul tuleb muidugi meeles pidada väärtuste leidmisel kasutatud seose madalat determinatsioonikordaja väärtust ($R^2 = 0,24$).

Võrreldes tabelis 3.6 toodud parameetrite väärtusi tabelis 3.2 toodud 26 mõõtepunkti keskmistega, võib öelda, et SCI ja BCI keskmised väärtused rahuldavad püsikatendi puhul II klassi maanteele esitatavaid nõudmisi ning BDI keskmise väärtuse alusel on rahuldatud III klassi maantee püsikatendile esitatavad nõudmised.

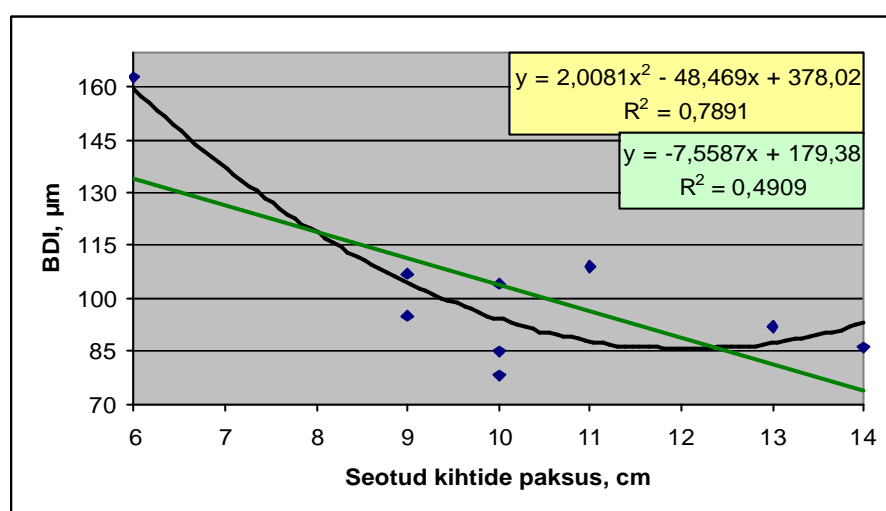
Eeltoodud põhjal võib järeldada, et keskmiselt on meie katendite kõige probleemsemaks osaks aluse kihid, mis jäävad katte pinnast 300 – 600 mm sügavusele. Samas tuleb meeles pidada, et tegemist on keskmiste väärtuste põhjal järelduste tegemisega ja nagu eespool (p.3.2) sai välja toodud, esineb olukordi (mõõtepunkte), kus näiteks ühe parameetri (kas SCI, BDI või BCI) väärtust võib lugeda heaks, samal ajal kui teised kaks osutavad selgelt probleemidele ja nende asukohale katendis.

Seega on võimalik FWD mõõtmistulemuste alusel hinnata kandevõimet, kasutades selleks SCI, BDI ja BCI väärtusi. Seoste (3.1), (3.2) ja (3.3) abil saab leida katendi üldise E-mooduli, mille alusel on võimalik hinnata olemasoleva katendi kandevõimet. Samas saab parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtuste alusel selgeks ka probleemide, kui need peaks ilmnenema, asukoht katendis.

3.6. SCI, BDI ja BCI ning seotud kihtide paksuse vahelised seosed

Peatükis 3.2 vaadeldi seotud kihtide paksuse mõju SCI, BDI ja BCI väärtustele üldise seose leidmiseks. Tulemuseks saadi, et mida suurem on seotud kihtide paksus, seda väiksemad on SCI, BDI ja BCI väärtused ja vastupidi. Järgnevalt on eesmärgiks leida konkreetset valemite kujul esitatavad seosed parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtuste ja seotud kihtide paksuse vahel.

Esmalt sai nimetatud seoseid uuritud analoogselt [joonisega 3.2](#) – SCI, BDI ja BCI väärtuste seosed seotud kihtide paksuse vahemikega $h < 15$ cm, 15 cm = $h = 25$ cm ja $h > 25$ cm. Töö mahu kokkuhoiu eesmärgil on järgnevalt ära toodud vaid iga parameetri kohta üks joonis (kus R^2 väärtus kõige kõrgem) ühe seotud kihtide paksuse vahemiku kohta. Seosed parameetrite ja teise kahe vahemiku kohta on toodud ilma joonisteta.



Joonis 3.10 BDI ja seotud kihtide paksuse, kui $h < 15$ cm, vaheline seos

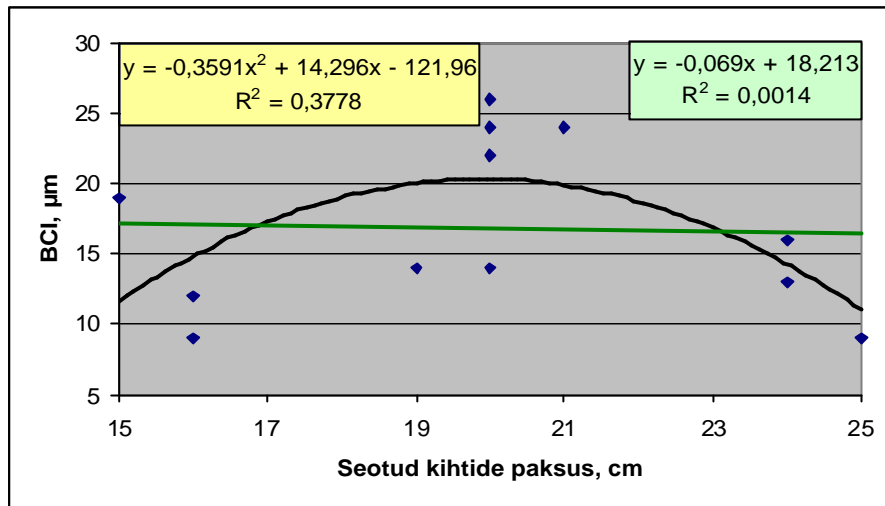
Jooniselt 3.10 on näha, et parabooli miinimum on seotud kihi paksuse 12 cm ligikal, kuid kuna seotud kihi paksuste vahemik on piiratud ning BDI muutub seotud kihi paksuste 12 cm ja 14 cm vahel vähem kui 10 µm, siis võiks toodud seose lugeda tinglikult loogiliselt õigeks (kasutatavaks). Sama kehtib ka järgmise kahe seose kohta.

SCI ja BCI kohta saadi seotud kihtide paksusel $h < 15$ cm järgmised seosed:

$$SCI = 2,45 \cdot h_{\text{seot. } h < 15}^2 - 61,48 \cdot h_{\text{seot. } h < 15} + 525,25 \quad R^2 = 0,72 \quad (3.4)$$

$$BCI = 0,45 \cdot h_{\text{seot. } h < 15}^2 - 11,92 \cdot h_{\text{seot. } h < 15} + 86,73 \quad R^2 = 0,67 \quad (3.5)$$

Kõik kolm toodud R^2 väärtust viitavad tugevale seosele parameetri väärtuse ja seotud kihtide paksuse vahel.



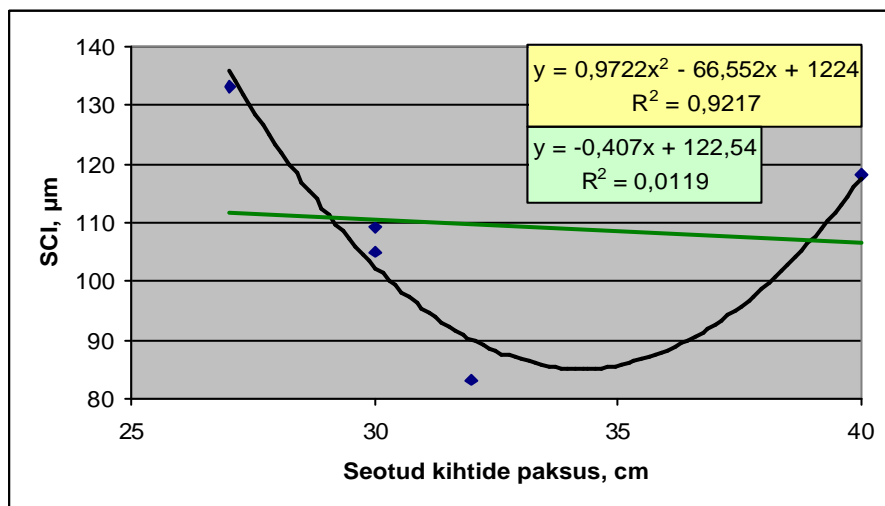
Joonis 3.11 BCI ja seotud kihtide paksuse, kui 15 cm = h = 25 cm, vaheline seos

SCI ja BDI kohta saadi seotud kihtide paksusel 15 cm = h = 25 cm järgmised seosed:

$$SCI = -0,91 \cdot h_{\text{seot. } 15=h=25}^2 + 40,97 \cdot h_{\text{seot. } 15=h=25} - 301,21 \quad R^2 = 0,07 \quad (3.6)$$

$$BDI = -0,44 \cdot h_{\text{seot. } 15=h=25}^2 + 16,97 \cdot h_{\text{seot. } 15=h=25} - 72,67 \quad R^2 = 0,03 \quad (3.7)$$

Nagu [jooniselt 3.11](#) ja seostest [\(3.6\)](#) ja [\(3.7\)](#) selgub, siis nii SCI, BDI kui ka BCI osas seotud kihtide paksusel 15 cm = h = 25 cm loogiliselt korrektseid ja usaldusväärseid seoseid praktiliselt ei eksisteeri.



Joonis 3.12 SCI ja seotud kihtide paksuse, kui h > 25 cm, vaheline seos

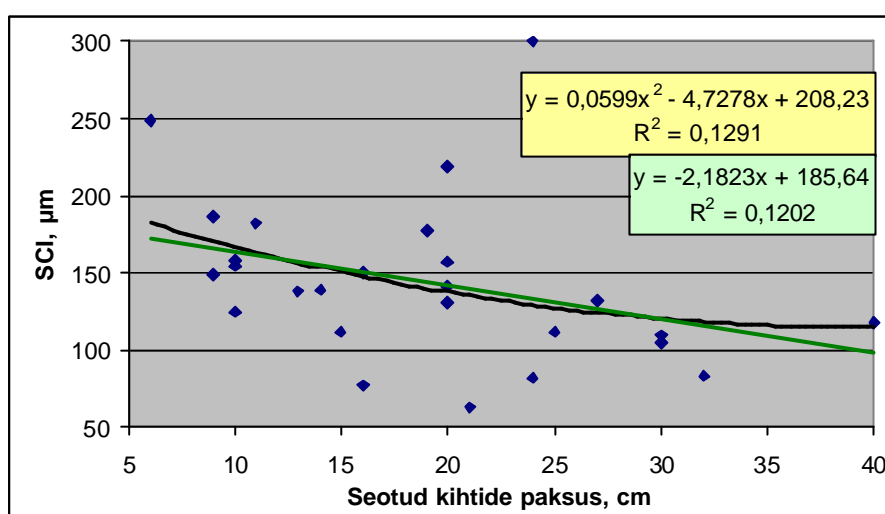
BDI ja BCI kohta seotud kihtide paksusel h > 25 cm saadi järgmised seosed:

$$BDI = 0,93 \cdot h_{\text{seot. } h>25}^2 - 62,04 \cdot h_{\text{seot. } h>25} + 1076,4 \quad R^2 = 0,77 \quad (3.8)$$

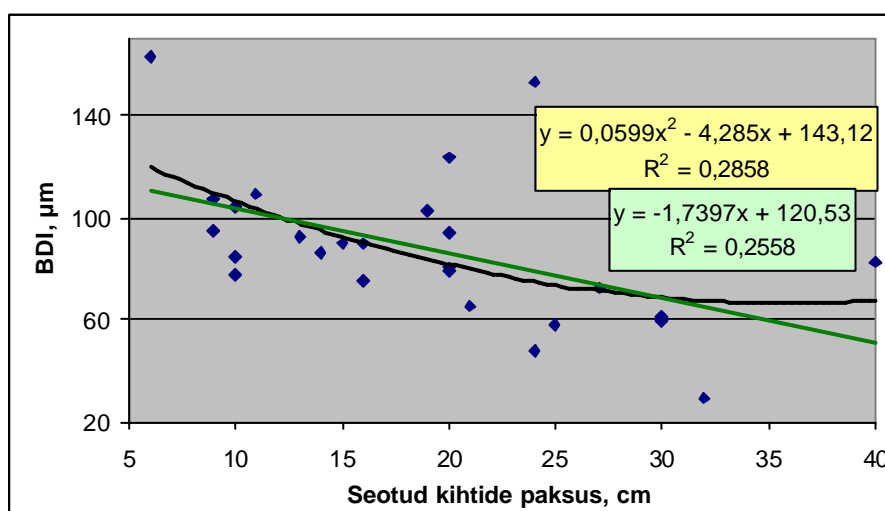
$$BCI = -0,074 \cdot h_{\text{seot. } h>25}^2 + 5,32 \cdot h_{\text{seot. } h>25} - 82,07 \quad R^2 = 0,81 \quad (3.9)$$

Kõigil kolmel juhul on R^2 väärtus küll märkimisväärselt kõrge (mis tuleneb punktide väikesest arvust), kuid siiski ei ole seosed praktiliselt rakendatavad (sellele viitab ka lineaarne trendijoon). Teist järku polünoomi trendijoonel ilmneb iseloomulik parabooli kuju, mille nii selge avaldumise põhjuseks on FWD mõõtepunkti nr. 46 seotud kihtide paksus 40 cm. Analoogsed paraboolid ilmnevad ka seoste (3.8) ja (3.9) graafikutel. Kui eeltoodud kolm seost leida pärast mõõtepunkti nr. 46 valikust eemaldamist, siis ühilduvad punktid ja trendijoon praktiliselt täies ulatuses. Punktide vähesuse tõttu ei ole siiski mõtet sellele rohkem tähelepanu pöörata.

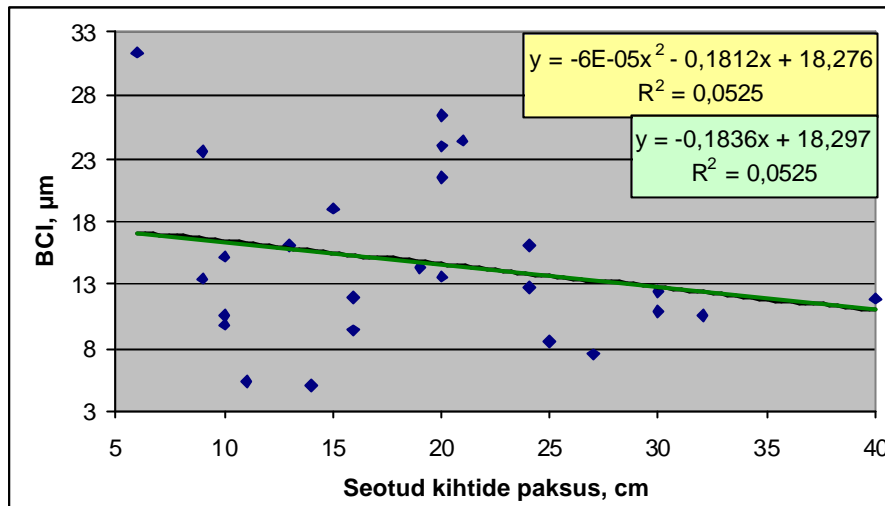
Järgnevalt said seoste leidmisel arvesse võetud kõigi 26 FWD mõõtepunkti seotud kihtide paksused ning vastavad SCI, BDI ja BCI väärtused. Tulemused esitame jällegi ülevaatlikkuse huvides graafiliselt.



Joonis 3.13 SCI ja seotud kihtide paksuse vaheline seos



Joonis 3.14 BDI ja seotud kihtide paksuse vaheline seos



Joonis 3.15 BCI ja seotud kihtide paksuse vaheline seos

Nagu joonistelt 3.13, 3.14 ja 3.15 näha, siis arvestatavaid seoseid ei ilmnenud. Seotud kihtide paksus seletab parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtustest ära vaid 5 – 29 %. Seoste puudumine tuleneb erinevate mõõtepunktide katendite konstruktsiooni ja seisukorra märkimisväärtsetest erinevustest.

3.7. Järeldused

Katendi erinevate konstruktsioonikihtide seisukorra hindamiseks on võimalik kasutada FWD mõõtmistulemusi:

- Seotud kihtide puhul – Surface Curvature Index (SCI) e. pinna kõverustegur – FWD läbivajumisandurite D1 ja D2 lugemite vahe ($d_0 - d_{300}$); SCI väärtus iseloomustab katte pinnast kuni 300 mm sügavusel asuva kihi seisukorda;
- Aluse puhul – Base Damage Index (BDI) e. aluse vigastatuse tegur – FWD läbivajumisandurite D2 ja D3 lugemite vahe ($d_{300} - d_{600}$); BDI väärtus iseloomustab katte pinnast 300 kuni 600 mm sügavusel asuva kihi seisukorda;
- Aluspinnase puhul – Base Curvature Index (BCI) e. aluse kõverustegur – FWD läbivajumisandurite D6 ja D7 lugemite vahe ($d_{1200} - d_{1500}$); BCI väärtus iseloomustab katte pinnast 1200 kuni 1500 mm sügavusel asuva kihi seisukorda.

Kõikide väärtuste leidmisel on arvestatud, et 50 kN koormuse puhul on vajalik kontaktsurve ekvivalent 300 mm plaadil 707 kPa.

Problemaatiline on ainult vastavatele näitajatele (SCI, BDI ja BCI) piirväärtuste kehtestamine ehk millest suuremate väärtuste juures meil esinevad probleemid vaadeldavas kihis.

Esialgse lähenemisena võiksime kasutada SCI, BDI ja BCI piirväärtusteks käesoleva uurimistöo raames leitud SCI, BDI ja BCI maksimaalsed lubatavaid väärtusi, mis vastavad Elastsete teekatendite projekteerimise juhendis 2001-52 [4] toodud minimaalsetele E-moodulite väärtustele (seosed (3.1), (3.2) ja (3.3) ja tabel 3.6).

4. PROBLEEMSE TEEKATENDI KONSTRUKTSIOONIKIHI LEIDMINE FWD MÕÖTMISTULEMUSTE ALUSEL – PRAKTILINE NÄIDE [12]

AS Teede Tehnokeskuse PMS-grupp mõõtis AS ASPI tellimusel augustis 2006 aastal maanteel nr 18 Niitvälja-Kulna teekonstruktsiooni kandevõimet kokku 26-s punktis.

Niitvälja-Kulna maantee aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus (2006.a. liiklusloenduse andmetel) on maantee alguses (0,5 km kaugusel) orienteeruvalt 1500 autot ööpäevas ja maantee lõpus (3,9 km kaugusel) orienteeruvalt 1200 autot ööpäevas. Normatiivne liikluskoormus on kogu maanteel 358 normtelge ööpäevas. Liiklussagedus on viimase 10 aastaga kasvanud 2 korda. Vastavalt hetke koormussagedusele on nõutav teekonstruktsiooni elastsusmoodul 235 MPa. Enamus kandevõime mõõtmistulemustest vastavad nõutavale teekonstruktsiooni kandevõimele. Ainult 5-s punktis 26-st, ehk 20 % jääb mõõdetud teekonstruktsiooni üldine elastsusmoodul alla nõutava väärtuse. Juhul kui koormussagedus kahekordistub, siis kasvab nõutav teekonstruktsiooni üldine elastsusmoodul 260 MPa-ni.

Rahvusvahelises praktikas on kasutusel erinevaid parameetreid katendi seisukorra määratlemiseks. Antud parameetreid on täpsemalt uurinud magistrant Priit Paabo oma 2006.a. valminud magistritöös [13].

Katendi üldise seisukorra võimalikult täpseks hindamiseks vaadeldakse katendi kihte eraldi, eristades seotud kihid, aluse ja aluspinnase. Selline kihtkihiline analüüs võimaldab osutada katendikonstruktsiooni kihile, kus võimalikud probleemid (nt. ebasobiv materjal) paiknevad.



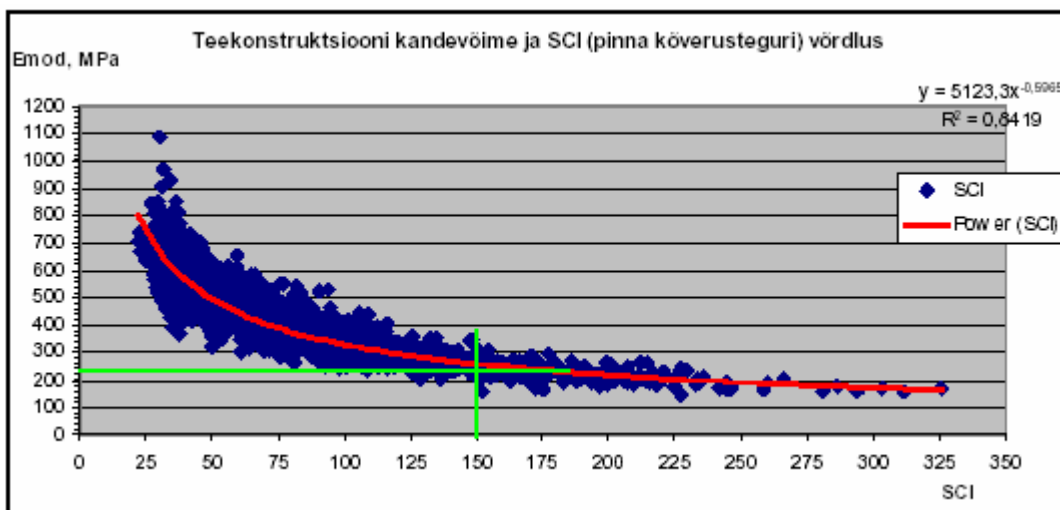
Joonis 4.1 Roobas maanteel nr. 18 Niitvälja-Kulna vasakpoolsel sõidurajal aadressil 18_1_1_1150

Pinna kõverusteguri ehk SCI (Surface Curvature Index), aluse vigastatuse teguri ehk BDI (Base Damage Index) ja aluse kõverusteguri ehk BCI (Base Curvature Index) kasutamise

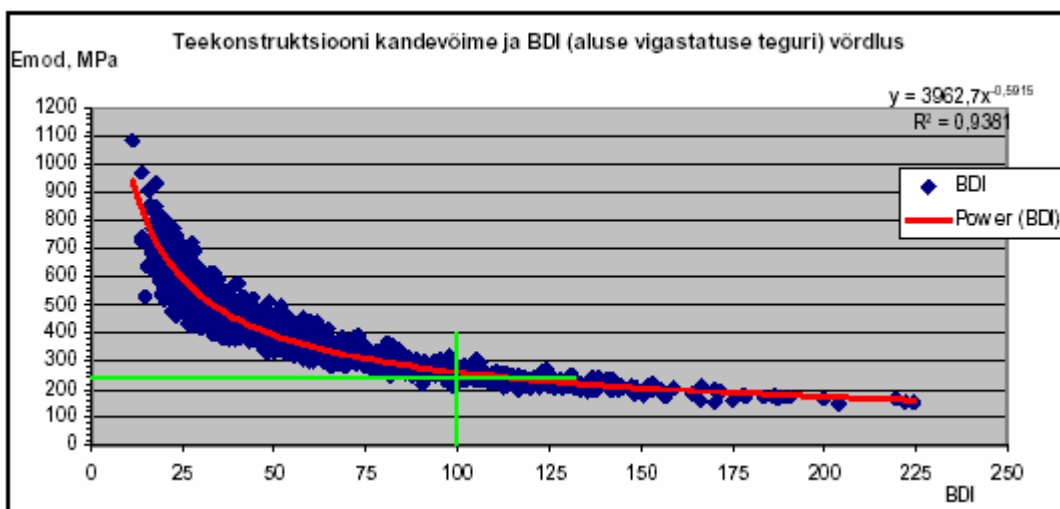
eeliseks on asjaolu, et vajalikud arvutusvalemid on lihtsad. Eestis on neid parameetreid seni vähe kasutatud ja otsesed piirväärtused antud parameetritele vajavad veel täpsustamist, kuid lähtudes võrdlusmomendist (võrreldes toodud väärtusi nendes kohtades, kus katendis probleeme ei ole, nende kohtadega, kus probleemid esinevad) on võimalik neid siiski ka juba praegu kasutada.

Piirväärtused eelpool toodud parameetritele on teekonstruktsiooni seisukorra kirjeldamiseks kehtestatud lähtudes 2005.a. Eesti teedevõrgul teostatud FWD mõõtmistulemuste põhjal arvutatud SCI, BDI ja BCI väärtuste ja neile vastavate teekonstruktsiooni kandevõime väärtuste vaheliste seoste alusel (joonised 4.1 ... 4.3). Lähtudes leitud seostes võime piisava usaldusväärsusega kehtestada järgmised piirväärtused:

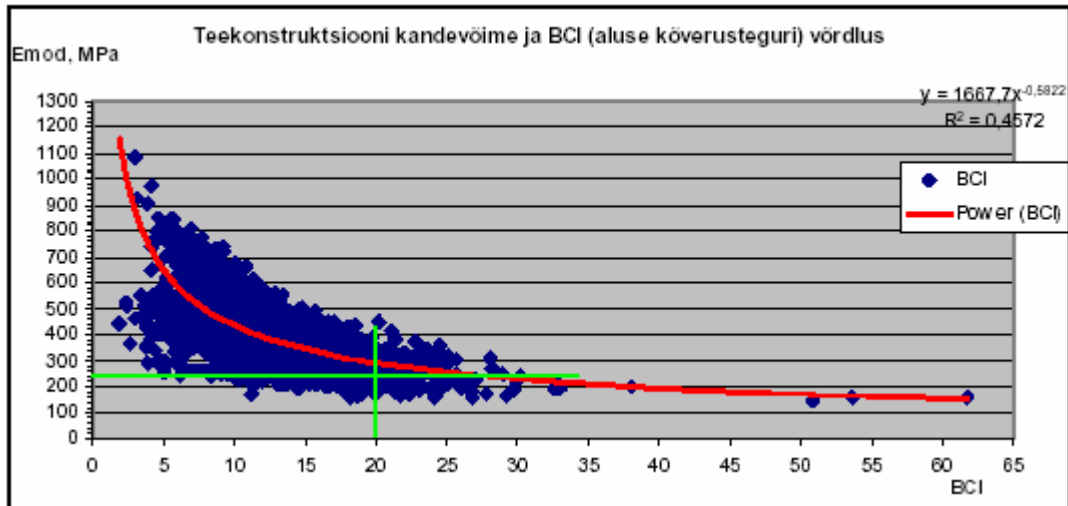
- SCI > 150 - seotud kihtides esineb probleeme;
- BDI > 100 - aluskihis esineb probleeme;
- BCI > 20 - aluspinnases esineb probleeme.



Joonis 4.1 Teekonstruktsiooni kandevõime ja SCI vaheline võrdlus

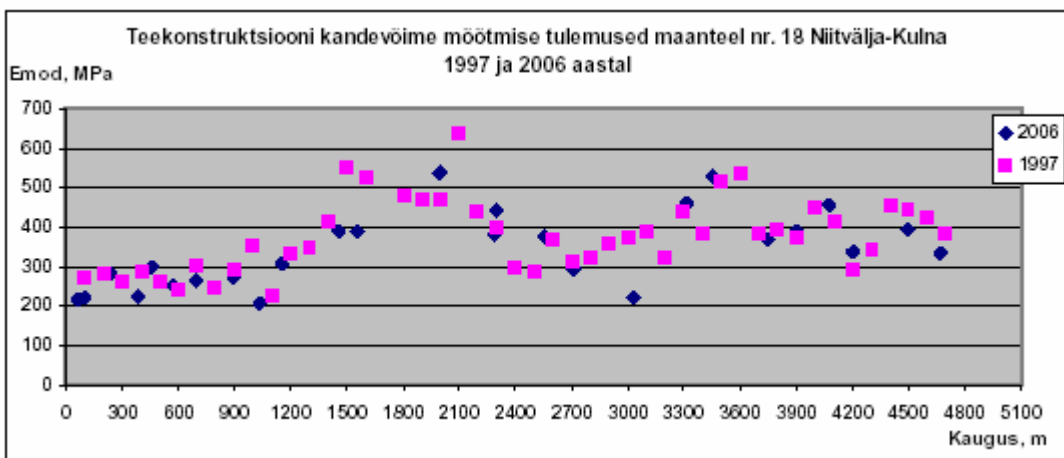


Joonis 4.2 Teekonstruktsiooni kandevõime ja BDI vaheline võrdlus



Joonis 4.3 Teekonstruktsiooni kandevõime ja BCI vaheline võrdlus

Võrreldes teekonstruktsiooni seisukorda praegu (2006 aastal) ja 1997 aastal (10 aastat tagasi), on näha, et teekonstruktsiooni üldine kandevõime ei ole aja jooksul praktiliselt üldse muutunud (joonis 4.4). Kuna antud maanteel niiskusprobleeme ei esine, siis on see tulemus üsna ootuspärane.

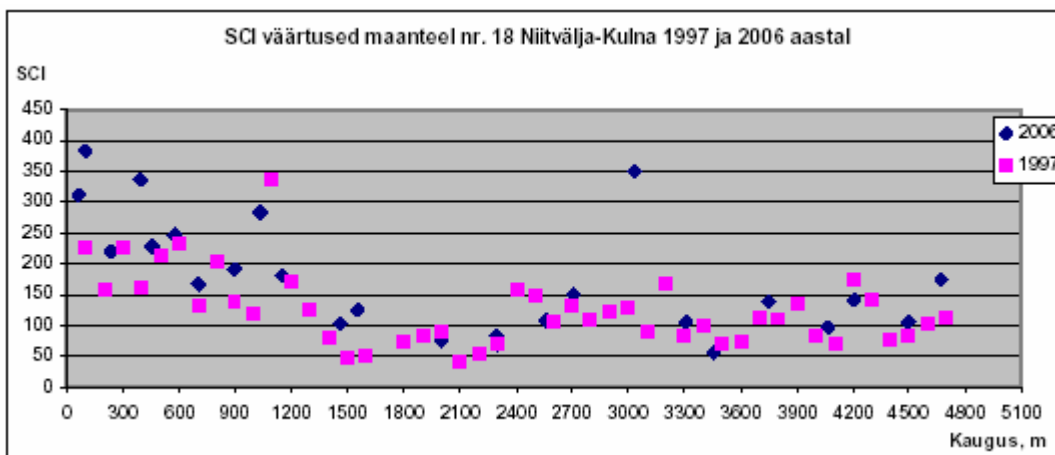


Joonis 4.4 Teekonstruktsiooni kandevõime 1997 ja 2006 aastal

FWD mõõtmistulemuste alusel arvatud SCI, BDI ja BCI parameetrite väärtused näitavad, et Niitvälja-Kulna maanteel on probleemid eelkõige teekonstruktsiooni ülemistes kihtides.

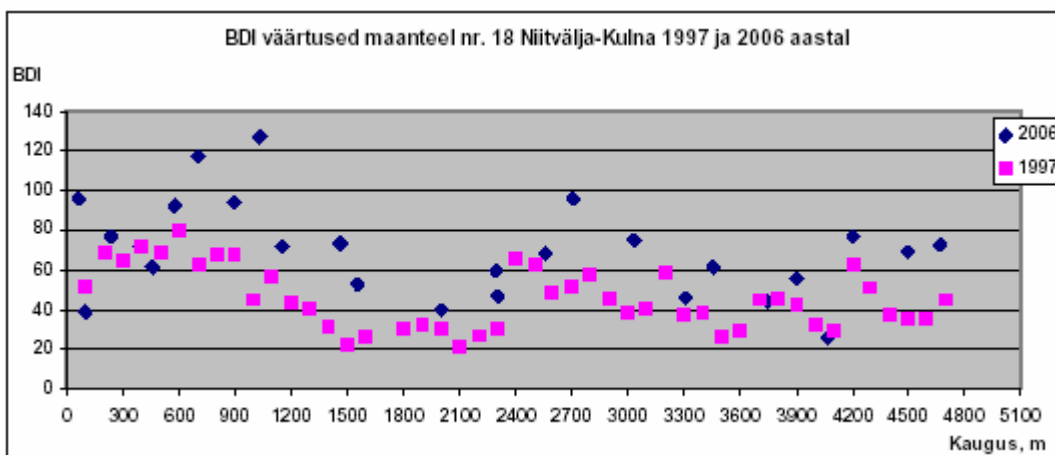
Pinna kõverusteguri SCI võrdlus näitab, et see ei ole viimase kümne aasta jooksul eriti muutunud. Erandiks on ainult maantee esimene kilomeeter, kus on võimalik täheldada SCI teguri mõningast kasvu, ehk siis teekonstruktsiooni ülemised kihid on muutunud nõrgemaks. SCI väärtused on kohati, eriti mõõdetud lõigu algusosas (umbes 1 km ulatuses), selgelt üle piirväärtuse 150. Lisaks on SCI väärtused kogu lõigu lõpuosa ulatuses (km 2,7-4,6) piirväärtuse lähedased. Selle tulemusena võime järeldada, et sellel lõigul esinevad suured

probleemid katendikonstruktsiooni ülemistes (0-30 cm) kihtides. (Joonis 4.5). Seda illustreerib ka katte tegelik seisukord (joonis 4.1), kus valdavaks on nihkejõudude toimel katte ülemistes kihtides tekkinud roopad.



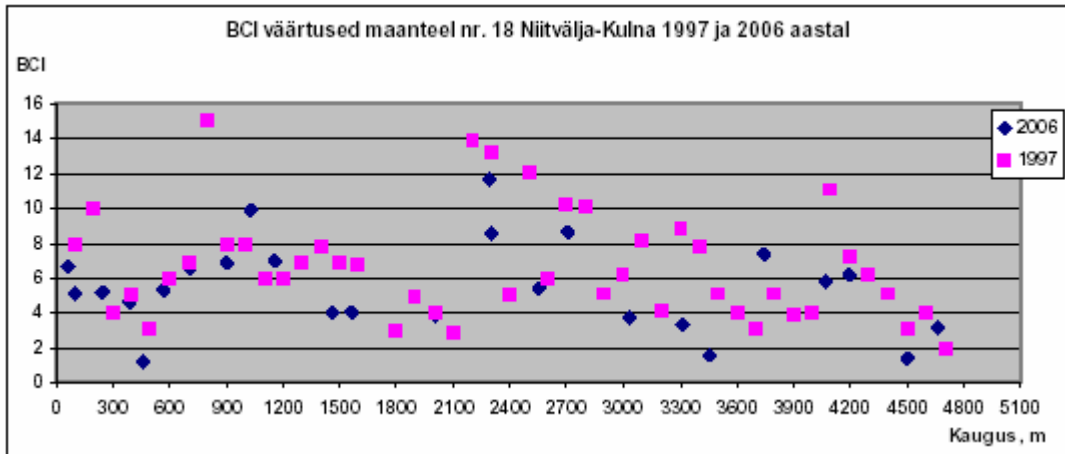
Joonis 4.5 SCI väärtuste muutumine ajavahemikul 1997 kuni 2006 a.

Aluskihi seisukorda iseloomustav BDI tegur on viimase 10 aastaga kogu maantee ulatuses selgelt kasvanud (joonis 4.6), mis näitab, et aluse (sügavusel 30-60 cm) seisukord on selle aja jooksul märkimisväärselt halvenenud. Mõnes kohas on BDI piirväärtus (100) ületatud või lähedal sellele.



Joonis 4.6 BDI väärtuste muutumine ajavahemikul 1997 kuni 2006 a.

BCI väärtused, ehk siis aluspinnase tugevust iseloomustav näitaja ei ole viimase 10 aasta jooksul praktiliselt üldse muutunud. Aluspinnase seisukorda iseloomustav BCI väärtus on kõigis mõõdetud punktides selgelt allpool piirväärtust (20) ja seega aluspinnasega probleeme ei esine. (Joonis 4.7).



Joonis 4.7 BCI väärtuste muutumine ajavahemikul 1997 kuni 2006 a.

Eeltoodud analüüsi tulemusena võime järeldada, et maanteel nr. 18 Niitvälja-Kulna on probleemid - ja kohati väga tõsised – peamiselt teekonstruktsiooni ülemistes kihtides. Mõõtmistulemuste põhjal on selgelt näha, et teekonstruktsiooni ülemised kihid vajavad uuendamist, kuna nende töötamisvõime on praktiliselt ammendunud. Lisaks on võimalik täheldada katendikonstruktsiooni tugevuse vähenemise siirdumist alumistesse konstruktsiooni kihtidesse (teekatte pinnast 30-60 cm sügavusele). Aluspinnase (teekatte pinnast 1,2-1,5 m sügavusel) tugevus on hetkel hea ja see antud analüüsi alusel uuendamist ei vaja.

KOKKUVÕTE

Käesolev teadustöö põhineb AS Teede Tehnokeskuse poolt aastatel 1999 - 2005 teostatud FWD mõõtmistel Eesti põhi- ja tugimaanteedel. FWD mõõtepunktide arv on nende aastate jooksul kahanenud 25 mõõtepunkti võrra – kui esimestel aastatel teostati mõõtmisi 51 punktis, siis 2005 aastal vaid 26 mõõtepunktis. Sellest hoolimata võib seitsme aasta mõõtmistulemusi pidada statistika seisukohalt piisavalt soliidseks baasiks, mille põhjal on võimalik juba leitud FWD mõõtmistulemuste rakendusi täiustada ja edasi arendada.

Käesoleva teadustöö teine põhimõtteline osa käsitleb katendi seisukorda iseloomustavaid parameetreid: pinna kõverustegur (SCI), aluse vigastatuse tegur (BDI) ja aluse kõverustegur (BCI). Nimetatud parameetrite kasutuselevõtt võimaldab saada katendi olukorrast märkimisväärselt ülevaatlikuma pildi, kui näiteks vaid katendi üldise elastsusmooduli teadmine:

- SCI kirjeldab seotud kihtide väsimust,
- BDI iseloomustab aluse kihtide seisukorda ja
- BCI iseloomustab aluspinnase seisukorda.

Seega, teades FWD mõõtmiste alusel leitud SCI, BDI ja BCI väärtusi, võime otsustada, millises katendi osas on probleemid (kui need peaksid ilmnema) kõige suuremad ning seejärel saame valida majanduslikult otstarbeka edasise tegevuse (nt. remondi ulatuse ja meetodi valik).

Kuna parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtused tulenevad FWD mõõtmisel tekkivast vajumiskausi kujust, siis esmalt saigi vaadeldud erinevaid iseloomulikke vajumiskausse. Lähtuti niiskuspaikkonna tüübist ja mõõtepunktis esinevast seotud kihtide paksusest ning võrreldi kevadel, suvel ja sügisel ilmnenuid vajumiskausside kujusid.

Erinevate niiskuspaikkonna tüüpide vajumiskausside vahel avaldusid selged põhimõttelised erinevused:

- Nii kevadel, suvel kui sügisel olid vajumid terve andurite kaetud ala (kuni kauguseni 1500 mm koormusplaadi tsentrist) ulatuses kõige väiksemad esimese niiskuspaikkonna puhul ja kõige suuremad kolmanda niiskuspaikkonna puhul. Selle põhjuseks on kandevõime sõltuvus muldkeha niiskusesisaldusest.
- Koormust jaotas (saab hinnata vajumiskausi graafikule tõmmatud puutuja tõusu järgi) kõige paremini esimese niiskuspaikkonna katend, kolmanda niiskuspaikkonna katendi kooremise jaotamise võime paranes aja liikumisel kevadest sügise suunas teistest enam (tuleneb järjest paranenud niiskusolukorrast).
- Samuti ilmnis trend mõõtepunktide vajumite väärtuste vähenemise suhtes aja liikumisel kevadest sügise suunas.

Vajumiskausside kuju võrdlemisel seotud kihtide paksusest lähtuvalt kasutatud kolme punkti seotud kihtide paksused olid 10 cm, 21 cm ja 32 cm. Ilmnes, et:

- Mida suurem on seotud kihtide paksus, seda väiksemad on vajumid koormusplaadi tsentri piirkonnas ja seda ühtlasemalt jaotub koormus katendis.
- Seotud kihtide paksuse vähenemisel vajumid koormusplaadi tsentri piirkonnas kasvavad ja vajumiskausi graafikule tõmmatava puutuja tõus suureneb.

Eeltoodu põhjal saame väita, et erinevate niiskuspaikkondade ja seotud kihtide paksuste teatud vahemike puhul sõltub vajumiskausside kuju:

- mõõtmisperioodist –kas mõõtmised on teostatud kevadel, suvel või sügisel;
- sademete hulgast – mis mõjutavad vajumiskausi kuju muutust mõõtmisperioodi kestel;
- konkreetsest katendikonstruktsioonist ja aluspinnasest.

Seega ainus näitaja, mis mingilgi määral iseloomustab üldiselt erinevates niiskuspaikkondades asetseva või erineva seotud kihtide paksusega katendi tugevust, on vajum FWD koormustsentris (ehk 0-anduri või D1 lugem). **Vajumiskausi kuju üldistada ei saa ja seda tuleb analüüsida igas konkreetses mõõtepunktis eraldi.**

Järgmiseks püstitatud ülesandeks sai vajumiskausi kuju iseloomustamine ilma vajumisgraafikute abita – parameetrite SCI, BDI ja BCI kasutuselevõtt ja nende arvulised väärtused.

26 FWD mõõtepunkti alusel leitud SCI, BDI ja BCI keskmised väärtused olid vastavalt 144 µm, 88 µm ja 15 µm. Samas oli väärtuste hajuvus suhteliselt suur, mis tuleneb mõõtepunktide katendite erinevast konstruktsioonist ja seisukorrast. FWD mõõtetulemuste põhjal sai toodud näiteid katenditest, kus ühe parameetri väärtus võrreldes vastava keskmisega oli märgatavalt suhteliselt suurem kui sama katendi kahe teise parameetri väärtus võrreldes vastavate keskmistega. Eelneva põhjal saab seega öelda, millises katendi osas (kihis) esinevad kõige tõsisemad probleemid.

Leiti keskmised parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtused erinevate niiskuspaikkondade ja seotud kihtide paksuse vahemike ($h < 15 \text{ cm}$, $15 \text{ cm} = h = 25 \text{ cm}$, $h > 25 \text{ cm}$) kohta:

- Niiskuspaikkondade graafilise võrdluse puhul oli kõige ilmekam ehk BCI väärtuste muutus paikkondade lõikes – mida niiskem, seda suurem BCI väärtus.
- Seotud kihtide vahemike keskmiste parameetrite võrdlusel sai kinnitust varem mainitud trend - mida suurem on seotud kihtide paksus, seda väiksemad on SCI, BDI ja BCI väärtused ning vastupidi.

Kolmandaks võrreldi SCI, BDI ja BCI keskmiseid väärtusi (antud juhul peamiselt küll BCI väärtust) **aluspinnasest lähtuvalt**. Aluspinnaseks tuleb antud juhul pidada katendist 1,2 – 1,5 m sügavusel esinenud pinnast (materjali). Materjalide omadustest tulenevalt said moodustatud järgmised aluspinnaste grupid: liiv, kruus ja kruusliiv, saviliiv, muud. **Parameeter BCI osas ilmnes selge erinevus vaid n.ö. „heade“ (liiv, kruus) ja „halbade“ (muld, savi, turvas) teedehituslike pinnaste vahel - BCI keskmised väärtused erinevad peaaegu kaks korda.**

Teades parameetri SCI, BDI või BCI ning katendi üldise E-mooduli vahelist seost, **on Elastsete teekatendite projekteerimise juhendis 2001–52 [4] toodud minimaalsetest vajalikest E-moodulitest lähtuvalt võimalik leida maksimaalsed lubatavad parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtused**, mille alusel katendi seisukorda hinnata. Pidades silmas, et E-mooduli väärtust saab arvutada kas niiskuspaikkonnast või katte liigist lähtuvalt, said seosed

parameetritega leitud mõlema variandi kohta. Kõrgemate determinatsioonikordaja R^2 väärtustega ilmnenuid seosed olid järgmised:

$$E_{\text{üld}} = 0,0068 \cdot \text{SCI}^2 - 3,303 \cdot \text{SCI} + 557,41 \quad R^2 = 0,67 \quad (1)$$

$$E_{\text{üld}} = 0,0064 \cdot \text{BDI}^2 - 2,619 \cdot \text{BDI} + 396,59 \quad R^2 = 0,64 \quad (2)$$

$$E_{\text{üld}} = -0,1067 \cdot \text{BCI}^2 + 0,1399 \cdot \text{BCI} + 247,78 \quad R^2 = 0,24 \quad (3)$$

Seos (1) on loogiliselt korrektsete tulemuste saamisel kehtiv SCI väärtuste vahemikus $0 \mu\text{m} < \text{SCI} = 240 \mu\text{m}$, seose (2) puhul on BDI väärtuste vahemiku piirideks $0 \mu\text{m} < \text{BDI} = 200 \mu\text{m}$ ja seose (3) puhul on BCI väärtuste vahemiku piirideks $0 \mu\text{m} < \text{BCI} = 40 \mu\text{m}$.

SCI ja BDI determinatsioonikordaja R^2 väärtused viitavad tugevale seosele, BCI osas on tegemist pigem nõrga seosega.

Katendi tugevusarvutustes kasutatavad minimaalsed katendi üldised E-moodulid valitakse sõltuvalt maantee klassist ning katendi tüübist Elastsete teekatendite projekteerimise juhendist 2001-52 [4]. Seoseid (1), (2) ja (3) arvesse võttes on võimalik leida minimaalsele E-moodulile vastavad SCI, BDI ja BCI maksimaalsed lubatavad väärtused (mida väiksem on E-moodul, seda suuremad on parameetrite väärtused) (tabel 1).

Tabel 1 Lähtuvalt minimaalsest katendi üldisest E-moodulist leitud maksimaalsed lubatavad SCI, BDI ja BCI väärtused

E_{min} , MPa	SCI_{max} , μm	BDI_{max} , μm	BCI_{max} , μm
260	119	61	-
240	132	73	9
220	146	85	17
200	163	99	22
180	184	115	26
160	220	135	29
140	-	162	32
120	-	-	35

Käesoleva teadustöö järgmise osa moodustab seotud kihtide paksuse ja parameetrite SCI, BDI ja BCI vaheliste seoste uurimine. Üldine trend sai juba eelnevalt välja toodud – mida suurem on seotud kihtide paksus, seda väiksemad on parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtused.

Esimeses lähenemises sai uuritud SCI, BDI ja BCI seoseid seotud kihtide paksuse vahemikega $h < 15 \text{ cm}$, $15 \text{ cm} = h = 25 \text{ cm}$ ja $h > 25 \text{ cm}$. Arvestatavat determinatsioonikordaja R^2 väärtust omasid järgmised seosed:

$$\text{SCI} = 2,45 \cdot h_{\text{seot. } h < 15}^2 - 61,48 \cdot h_{\text{seot. } h < 15} + 525,25 \quad R^2 = 0,72 \quad (4)$$

$$\text{BDI} = 2,01 \cdot h_{\text{seot. } h < 15}^2 - 48,47 \cdot h_{\text{seot. } h < 15} + 378,02 \quad R^2 = 0,79 \quad (5)$$

$$\text{BCI} = 0,45 \cdot h_{\text{seot. } h < 15}^2 - 11,92 \cdot h_{\text{seot. } h < 15} + 86,73 \quad R^2 = 0,67 \quad (6)$$

Teises lähenemises sai seoste leidmisel arvesse võetud kõigi 26 FWD mõõtepunkti seotud kihtide paksused ning vastavad SCI, BDI ja BCI väärtused. Ilmnenuid seoste R^2 väärtused olid SCI, BDI ja BCI osas vastavalt 0,13, 0,29 ja 0,05. Seega seletab seotud kihtide paksus

parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtustest ära vaid 5 – 29 %. Seoste puudumine tuleneb erinevate mõõtepunktide katendite konstruktsiooni ja seisukorra märkimisväärtsetest erinevustest.

Lõppjärelendus ed:

1. FWD koormuse all tekkiva vajumiskausi kuju selleks, et määrata konkreetse katendikonstruktsiooni osa halba seisukorda, üldistada ei saa **ja analüüs tuleb teostada iga üksiku mõõtmiskoha katendikonstruktsioonist ja tingimustest sõltuvalt.**

2. Katendi erinevate konstruktsioonikihtide seisukorra hindamiseks on võimalik kasutada FWD mõõtmistulemusi:

- Seotud kihtide puhul – **Surface Curvature Index (SCI) e. pinna kõverustegur** – FWD läbivajumisandurite D1 ja D2 lugemite vahe ($d_0 - d_{300}$); SCI väärtus iseloomustab katte pinnast kuni 300 mm sügavusel asuva kihi seisukorda;
- Aluse puhul – **Base Damage Index (BDI) e. aluse vigastatuse tegur** – FWD läbivajumisandurite D2 ja D3 lugemite vahe ($d_{300} - d_{600}$); BDI väärtus iseloomustab katte pinnast 300 kuni 600 mm sügavusel asuva kihi seisukorda;
- Aluspinnase puhul – **Base Curvature Index (BCI) e. aluse kõverustegur** – FWD läbivajumisandurite D6 ja D7 lugemite vahe ($d_{1200} - d_{1500}$); BCI väärtus iseloomustab katte pinnast 1200 kuni 1500 mm sügavusel asuva kihi seisukorda.

Kõikide väärtuste leidmisel on arvestatud, et 50 kN koormuse puhul on vajalik kontaktsurve ekvivalent 300 mm plaadil 707 kPa.

Problemaatiline on ainult vastavatele näitajatele (SCI, BDI ja BCI) piirväärtuste kehtestamine ehk millest suuremate väärtuste juures meil esinevad probleemid vaadeldavas kihis.

Esialgse lähenemisena võiksime kehtestada SCI, BDI ja BCI piirväärtusteks käesoleva uurimistöö raames leitud SCI, BDI ja BCI maksimaalsed lubatavad väärtused, mis vastavad Elastsete teekatendite projekteerimise juhendis 2001-52 [4] toodud minimaalsetele E-moodulite väärtustele (kokkuvõtte seosed (1), (2) ja (3) ja **tabel 1**). Kindlasti tuleks neid piirväärtuseid kontrollida, võrreldes konkreetsetele teekonstruktsioonidele FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud SCI, BDI ja BCI väärtuseid konstruktsiooni tegeliku seisukorraga (hinnates kattel esinevaid defekte ja nende tekke põhjuseid).

3. Võimalus on kasutada parameetrite SCI, BDI ja BCI väärtuste muutuse võrdlust ajas, iseloomustamaks teekonstruktsioonis aja jooksul toimuvat struktuursete omaduste halvenemist ja selgitamaks kõige problemaatilisema teekonstruktsiooni osa (seotud kihid, alus või aluspinnas).

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Dynatest International AS kodulehekül <http://www.dynatest.com>
2. Aavik, A. Methodical Basis for the Evaluation of Pavement Structural Strength in Estonian Pavement Management System (EPMS). – Tallinn: OÜ Infotrükk, 2003. – 152 lk.
3. ?????????? ?? ?????????????????? ?????????? ?????? ?????????????? ??????. BCH 46-83. ? ?????????????????? ??????. - Moskva, 1985 –157 lk.
4. Eesti Maanteeamet. Elastsete teekatendite projekteerimise juhend 2001–52 (Teine versioon). – Tallinn, 2001. – 50 lk.
5. Paabo, P. FWD mõõtmistulemuste analüüs teekatendi tugevuse hindamiseks. Bakalaureusetöö. – Tallinn: TTÜ Teedeinstituut, 2004. – 53 lk.
6. AS Teede Tehnokeskus. Teekatendite erinevate dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks, katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks. Lõpparuanne. – Tallinn, 2002. – 85 lk.
7. European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research. COST 336. Falling Weight Deflectometer. Final Report of the Action. Final Draft. Danish Road Directorate, January 2001.
8. Pavement deflection analysis. Instructor Guide. – Washington (D.C.): National Highway Institute, 1994 – 504 lk.
9. Tallinna tänavate seisukorra matemaatilised mudelid. Lõpparuanne. – Tallinn: TTÜ Teedeinstituut, 2004. – 38 lk.
10. <http://ceprofs.tamu.edu/smith/SmithSpring418-04/Read%20Only/CVEN418Lect10-0203%20%5BRead-Only%5D.pdf>
11. Eesti Maanteeamet. Autopargi läbisõit Eestis 2002. aastal. Köide 2. Lõpparuanne. TTÜ teedeinstituut, Tallinn, 2003. – 41 lk
12. Teekonstruktsiooni kandevõimest mnt nr. 18 Niitvälja-Kulna. AS Teede Tehnokeskus, PMS grupp, Tallinn 2006. 17 lk.
13. Priit Paabo. Teekatendite tugevuse hindamine dünaamilise koormusseadmega. Magistritöö, TTÜ teedeinstituut, Tallinn 2006. 77 lk.