

FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud parameetrite SCI, BDI ja BCI kasutamine teekatendi seisukorra hindamisel

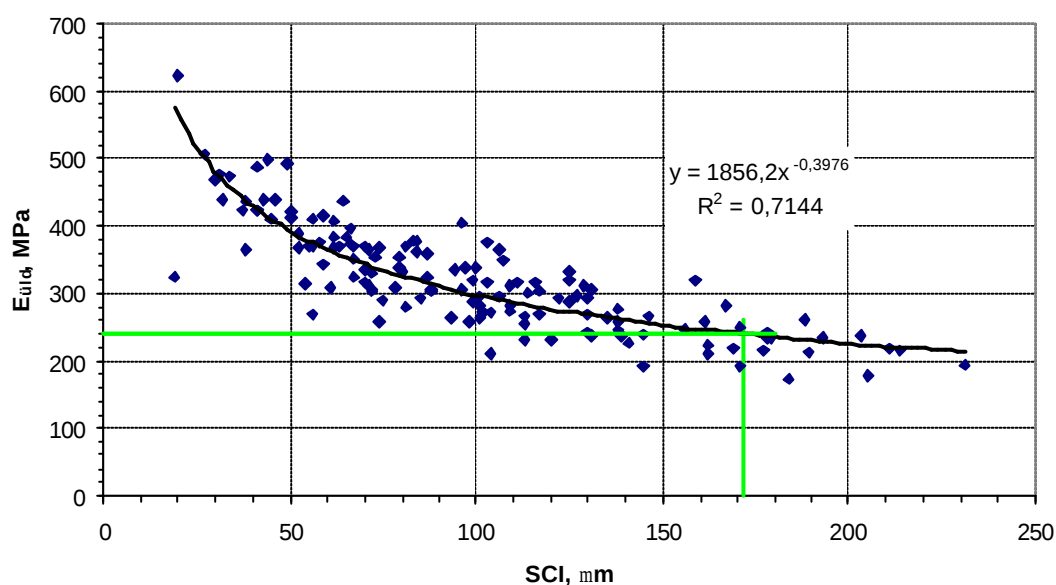
LÕPPARUANNE



1918
TALLINNA
TEHNIKAÜLIKOOL
TEEDEINSTITUUT

2007-13/L

TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



Maanteeamet

TALLINN 2007



TEEDEINSTITUUT

TEADUSTÖÖ KLAS 2.8

TEADUSTÖÖ 7042

**FWD MÕÕTMISTULEMUSTE ALUSEL ARVUTATUD
PARAMEETRITE SCI, BDI JA BCI KASUTAMINE
TEEKATENDI SEISUKORRA HINDAMISEL**

LÕPPARUANNE

Tellija: MAANTEEAMET

Lepingu vastutav täitja: prof. Andrus Aavik

05. juuni 2007

Tallinn 2007

TEADUSTÖÖ LÕPPARUANNE

FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud parameetrite SCI, BDI ja BCI kasutamine teekatendi seisukorra hindamisel

Käesolev teadustöö lõpparuanne on koostatud 10.05.2007.a. Maanteeameti ja Tallinna Tehnikaülikooli vahel sõlmitud Lepingu 7042 alusel.

Teadustöö lõpparuande koostasid:

1. Prof. Andrus Aavik – lepingu vastutav täitja;
2. Üliõpilane Ott Talvik - andmete analüüs ja mudelite koostamine.

SISUKORD

TEADUSTÖÖ LÄHTEÜLESANNE.....	6
SISSEJUHATUS	8
1 FWD JA TEEKATENDI SEISUKORRA HINDAMINE.....	10
1.1 DÜNAAMILISE KOORMUSSEADME (FWD) ÜLDINE KIRJELDUS.....	14
1.2 TAGASIARVUTUS JA KAASAAEGSED INTERPRETATSIOONIVAHENDID MATERJALIDE KÄITUMISMUDELITE KUJUTAMISEKS.....	16
1.2.1 Tagasiarvutusprotseduuri kirjeldus ja selle puudused	16
1.2.2 Tagasiarvutusprogrammide täiendamine lõplike ja diskreetsete elementide meetoditega.....	17
1.2.3 Katendikihtide käitumismudelite loomine kunstlike närvivõrkude süsteemi abil.....	18
1.3 FWD MÕOTMISTULEMUSTEST ARVUTATAVAD PARAMEETRID	19
1.4 ÜLEVAADE VAJUMIKAUSI PARAMEETRITEGA (SCI, BDI JA BCI) SEOTUD UURIMUSTÖÖDEST.....	22
1.4.1 BDI ja BCI kasutamine aluspinnase ja alusekihtide elastsusmoodulite määramisel.....	22
1.4.2 Katendikihtide seisukorra hindamine SCI, BDI ja BCI abil.....	23
1.4.3 SCI ja BCI kasutamine katendi elastsusmooduli määramiseks.....	26
1.5 FWD MÕÖTEANDURITE ASETUSE MÕJU KIHTIDE TAGASIARVUTATUD ELASTSUSMOODULITELE	27
2 TEEREGISTRI PÕHJAL KOOSTATUD ANDMEBAAS JA SINNA KOONDATUD ANDMETE ANALÜÜS	30
2.1 ANALÜÜSIGRUPPIDE KOOSTAMINE KOORMUSSAGEDUSE ALUSEL	31
2.2 FWD MÕOTMISTULEMUSTE TAANDAMINE NORMKOORMUSELE JA ARVUTUSLIKULE TEMPERATUURILE	33
2.3 VAJUMIKAUSI PARAMEETRITE SEOSSED DEFEKTIDEGA	34
2.4 VAJUMIKAUSI PARAMEETRITE SEOSSED ROOPASÜGA VUSEGA	38
2.5 VAJUMIKAUSI PARAMEETRITE SEOSSED KATENDI ÜLDISE ELASTSUSMOODULIGA	41
2.5.1 Katendi üldise elastsusmooduli arvutamine	41
2.5.2 Seosed parameetrite ja üldise elastsusmooduli vahel.....	43
2.5.3 Seoste uurimise käigus ilmnunud tähelepanekuid.....	50
3 VAJUMIKAUSI PARAMEETRITE PIIRVÄÄRTUSED	53
3.1 EELNEVATES TÖÖDES VÄLJAPAKUTUD PIIRVÄÄRTUSED.....	53
3.2 VAJUMIKAUSI PARAMEETRITE PIIRVÄÄRTE MÄÄRAMINE.....	55
3.2.1 Tihedast asfaltbetoonist kate olemasoleval kattel.....	55
3.2.2 Tihedast asfaltbetoonist kate freesitud kattel.....	57
3.2.3 Tihedast asfaltbetoonist kate tasanduskihiga	59
3.2.4 Tihedast asfaltbetoonist kate bituumenstabiliseeritud alusega	61
3.2.5 Tihedast asfaltbetoonist kate kompleksstabiliseeritud alusega	63
3.2.6 Tihedast asfaltbetoonist kate killustikalusega	65
3.2.7 Mustkattega teed.....	67
3.2.8 Põlevkivituhkbetoonkattega teed.....	69

3.2.9	<i>Pinnatud kruusateed</i>	71
3.3	KOKKUVÕTE LEITUD VÕRRANDITEST	73
	KOKKUVÕTE	75
	SUMMARY	77
	LISAD	81
LISA A	ANALÜÜSIGRUPP 1 – GRAAFIKUD.....	81
LISA B	ANALÜÜSIGRUPP 2 – GRAAFIKUD.....	88
LISA C	ANALÜÜSIGRUPP 3 – GRAAFIKUD.....	94
LISA D	ANALÜÜSIGRUPP 4 – GRAAFIKUD.....	110
LISA E	ANALÜÜSIGRUPP 5 – GRAAFIKUD.....	128
LISA F	ANALÜÜSIGRUPP 6 – GRAAFIKUD.....	140
LISA G	ANALÜÜSIGRUPP 7 – GRAAFIKUD.....	152

TEADUSTÖÖ LÄHTEÜLESANNE

FWD MÕÕTMISTULEMUSTE ALUSEL ARVUTATUD PARAMEETRITE SCI, BDI JA BCI KASUTAMINE TEEKATENDI SEISUKORRA HINDAMISEL

1. Probleemipüstitus

Lisaks 0-andurile (langeva raskuse keskmises olevale andurile) fikseeritakse kandevõime mõõtmisel (FWD) teekatendi deformatsioone veel kuues punktis (0-punktist kaugustel 300, 600, 750, 900, 1200 ja 1500 mm), mis salvestatakse ka Riiklikus 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.

Maanteeameti ja TTÜ vahelise lepingu „ FWD mõõtmistulemuste kasutamine teekatendi remondiprojektide koostamisel“ (sõlmitud 2006.a.) nägi ette uurida FWD koormuse tagajärjel kattel tekkiva vajumiskõvera parameetrite alusel katendikihtide elastsusmoodulite määramise võimalusi. Lepingu teostamisel selgus (vt. lepingu „ FWD mõõtmistulemuste kasutamine teekatendi remondiprojektide koostamisel“ Informatsioon 2), et vajumiskausi parameetreid otseselt katendikihtide elastsusmoodulite määramiseks kasutada ei ole võimalik, küll aga iseloomustab vajumiskausi kuju üldiselt katendi tugevust. Samas on leitud, et eksisteerivad FWD vajumiskausi deformatsioonide alusel arvutatavad näitajad, mille väärtuseid on võimalik kasutada katendi erinevate konstruktsiooniosade seisukorra hindamiseks:

- 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.

Lepingu „ FWD mõõtmistulemuste kasutamine teekatendi remondiprojektide koostamisel“ Informatsioonis 2 esitatu näitab ilmekalt parameetrite SCI, BDI ja BCI kasutusvõimalusi, kuid puuduvad nimetatud parameetrite piirväärtused, mille leidmist eelnimetatud leping ette ei näe. Nimetatud parameetritele piirväärtuste leidmine kasutamiseks katendikonstruktsiooni seisukorra hindamisel oleks oluline samm FWD mõõtmistulemuste laialdasemaks praktilisemaks kasutamiseks.

2. Teadustöö eesmärk

Uurimistöö põhieesmärgiks on määrata teekonstruktsiooni seisukorda iseloomustavate näitajate SCI, BDI ja BCI lubatavad piirväärtused ja seosed teiste teekatte seisukorra andmetega.

Uurimistöös kasutada algandmetena AS Teede Tehnokeskuse poolt nii aastatel 1999-2006 teostatud püsivate FWD kontroll-mõõtmispunktide deformatsioonide

regulaarsete mõõtmiste andmeid kui ka kogu teedevõrgul teostatud ja Riigimaanteede reegistrisse kantud kandevõime (FWD) mõõtmistulemusi.

Töö tulemusena esitada tellijale aruanne paberkandjal 5-s eksemplaris ja elektrooniliselt *.pdf dokumendina. Uurimistöö esitamise lõpptähtaeg on 01.10.2007.a.

3. Teadustöö kirjeldus

1. Analüüsi lähteandmebaasi koostamine riigimaanteede kattega teedevõrgu andmete baasil tuginedes riigimaanteede teeregistrile:

- analüüsitavate lõikude valik lähtudes liiklussagedusest, katte tüübist ja vanusest, defektidest nii, et analüüsi oleks haaratud samades tingimustes, aga erinevas seisukorras olevad teekonstruktsioonid (pidades silmas ka lähteandmebaasi suurust piisava tõenäosusega tulemuste saavutamiseks); analüüsigruppide moodustamine lähtudes tee liiklussagedusest (ja kattetüübist);
- analüüsiks valitud lõikude FWD mõõtmistulemuste e. koormuse all tekkivate deformatsioonide (saadakse teeregistrist) taandamine 50 kN e. standardtelje ühe ratta koormusele.

FWD kontroll-mõõtmispunktide 1999-2006 mõõtmistulemuste ja muu nende kohta olemasoleva informatsiooni kasutamine analüüsis on piiratud, kuna need punktid esindavad ainult teatud teekatte tüüpe ning nende seisukorda. Analüüs aga peab põhinema laiemal lähteandmete baasil, mistõttu ongi otsustatud moodustada analüüsi lähteandmebaas riigimaanteede kattega teedevõrgu baasil.

2. Lähteandmebaasi koondatud andmete analüüs:

- SCI, BDI ja BCI väärtuste arvutamine, kasutades 50 kN-le taandatud deformatsioone;
- arvutatud SCI, BDI ja BCI väärtuste võrdlemine teel esinevate defektitüüpidega, kuna defektitüübi tekkepõhjused viitavad teekonstruktsioonis esineva probleemi asukohale (kas kattes, aluses, muldkehas, aluspinnases);
- defektitüüpide ja SCI, BDI ja BCI väärtuste vahelise seose leidmine erineva liiklussagedusega (ja kattetüüpidega) teedele;
- SCI, BDI ja BCI seos FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud katendi üldise elastsusmooduliga;
- FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud katendi üldise elastsusmooduli võrdlus antud katendi nõutava elastsusmooduliga (määratakse koormussageduse alusel).

3. Parameetrite SCI, BDI ja BCI lubatavate piirväärtuste määramine:

- SCI, BDI ja BCI piirväärtused määratakse eraldi erineva liiklussagedusega (ja kattetüübiga) maanteele (e. punktis 1 määratletud analüüsigrupile);
- SCI, BDI ja BCI piirväärtuste määramise põhiliseks aluseks on katte seisukord.

SISSEJUHATUS

Teekatendite seisukorra hindamiseks on oluline teada nende kandevõimet. Katendi kandevõimet on võimalik mõõta ainult kohapeal kaudsete meetoditega, milleks kasutatakse katendi läbipainde mõõtmisi. Arvutusmudeleid kasutades on võimalik tagasiarvutusprotseduuri teel leida katendi kandevõime. Läbi ajaloo on taoliste mittepurustavate katseseadmetena enim kasutatud koormusplaati, Benkelman'i tala ja dünaamilist koormusseadet (FWD – ingl k *Falling Weight Deflectometer*). Neist esimesed kaks on viimasel ajal vähekasutatavad, kuid FWD kasutamine maailmas aina suureneb. Katendi läbipainde (vajumite) mõõtmine FWD-ga ei ole omaette eesmärk, vaid see on üks katsemeetoditest katendi struktuurse seisukorra hindamiseks (COST 336 1999). FWD on otstarbekas vahend katendi struktuurse käitumise kirjeldamiseks, sest seade simuleerib seni kasutatutest kõige täpsemini liikluskormuse mõju katendile ja mõõtmistulemused annavad koormusele vastava vajumikausi (vt ptk 1.1) kuju.

Katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks kasutatakse Eestis praegusel hetkel ainult dünaamilise koormusseadme (FWD) 0-anduri (langeva raskuse keskmises oleva anduri) lugemit, mille alusel on võimalik arvutada katendi kevadine üldine elastsusmoodul, kasutades selleks A. Aaviku doktoritöös "Teekatendite tugevuse hindamise meetodilised alused Eesti teekatendite hoiu süsteemis (EPMS)" 2003.a. leitud võrrandit. Saadud tulemusi kasutatakse PMS-i võrgutasandi analüüsil ja vähesel määral ka teekatendite remondiprojektide koostamisel katendi nõrkade kohtade väljaselgitamisel. (Informatsioon 1)

Lisaks 0-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 informatsioonikogus on aga praegusel hetkel Eestis täielikult kasutamata, sest ei ole teada, kuidas kuue täiendava anduri mõõtmistulemused iseloomustavad katendi seisukorda. (Informatsioon 1)

FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud vajumikõvera põhjal on võimalik hinnata olemasolevat katendikonstruktsiooni ja selle erinevate kihtide ning aluspinnase omadusi. Seni ei ole Eestis FWD koormuse tekitatud vajumikõvera parameetreid

(selgitatud ptk 1.3) uuritud (välja arvatud P. Paabo magistritöö) ja kasutatud, kuigi informatsiooni kasutamine vastavate juhiste olemasolul oleks remondiprojektide koostamisel vajalik. FWD mõõtmistulemuste alusel arvatud vajumikõvera põhjal on võimalik hinnata olemasolevat katendikonstruktsiooni ja selle erinevate kihtide ning aluspinnase omadusi. (Informatsioon 1)

Oma magistritöös (Paabo 2006) käsitles P. Paabo parameetrite seoseid katendi üldise elastsusmooduliga ja seotud kihtide paksusega ning leidis lähtuvalt minimaalsest katendi üldisest E-moodulist maksimaalsed lubatavad SCI, BDI ja BCI väärtused. Pidades silmas aga kasutatud andmete vähesust ei saa leitud seoseid ja piirväärtusi kindlasti lugeda lõplikeks. Projektitasandil kasutuskõlbulike vajumikausi parameetrite kasutuselevõtuks on vaja teostada täiendavaid uuringuid ja koostada vastavad juhised.

Käesoleva töö eesmärgiks on välja selgitada vajumikausi parameetrite kui katendikihtide seisukorda iseloomustavate näitajate seosed teekattel esinevate defektidega ja roopasügavusega ning FWD mõõtmistulemuste põhjal arvatud katendi üldise elastsusmooduliga. Leitud seoste alusel püütakse määrata vajumikausi parameetrite lubatavad piirväärtused erinevate katteliikidega ja liikluskoormustega Eesti maanteedele.

Lähteandmetena kasutatakse Teeregistrisse kantud nii AS Teede Tehnokeskuse poolt Eesti teedevõrgul teostatud FWD mõõtmistulemuste andmeid kui ka teisi antud teede kohta teadaolevaid andmeid (defektide inventeerimistulemused; roopasügavuse mõõtmised; liiklussagedused; katete liigid, ehitus- ja pindamisaastad). Andmebaasi koostamiseks ja töötlemiseks kasutatakse Microsoft'i tarkvara MS Excel.

1 FWD JA TEEKATENDI SEISUKORRA HINDAMINE

Tee seisukorra võib jagada ekspluatatsiooniliseks ja struktuurseks seisukorraks ehk defektide mõju võib hinnata tee töötamise alusel kas teekasutaja või katendi tugevuse seisukohalt. Hinnates tee töötamist teekasutaja seisukohalt räägitakse sõidumugavusest, -kuludest ja ohutusest. Tee töötamise hindamisel katendi tugevuse seisukohast lähtudes räägitakse tee struktuursest seisukorrast, mis iseloomustab katendi võimet vastu võtta liiklus- ja ilmastikukoormuseid. Struktuurse seisukorra alusel püütakse hinnata, kui kaua tee ekspluatatsiooniline seisukord ehk teenindustase püsib soovitud tasemel. Tee struktuurne seisukord mõjutab märkimisväärselt tee teenindustaset. Hea koormuskindlusega (kandevõimega) katendi struktuurne seisukord püsib suhteliselt konstantsena pika aja vältel, samal ajal, kui halb struktuurne seisukord tähendab kiiret katendi lagunemist. Seega on tähtis objektiivselt hinnata kandevõime mõõtmistel saadud teepinna läbipainete põhjal katendi struktuurset seisukorda, mille alusel on võimalik prognoosida tee ekspluatatsioonilist seisukorda tee kasutusaja jooksul.

Katendi kandevõime määramiseks ja seisukorra hindamiseks kasutatakse nn mittepurustavaid katseseadmeid (*ingl k Non-destructive Testing Devices*, edaspidi lühendina NDT-seadmed), millega mõõdetakse katendi läbipainet koormuse mõjul. Hinnang katendi tugevusele antakse seadme anduritega mõõdetud katte pinna läbipainete (vajumite) põhjal tagasiarvutusega (vt ptk 1.2) leitud kihtide elastsusmoodulite abil. Katendi järelejäänud eluea hindamiseks vajalikud kriitilised pinged ja deformatsioonid määratakse tagasiarvutatud E-moodulite alusel (Meshkani jt 2002). Tänapäeval kasutatavad NDT-seadmed jagunevad koormuse tüübi alusel kolme põhiklassi (NHI Course No 13127, 1994; ASNT – www; Maureen 1997; Huang 2004):

- 1) staatilise koormusega seadmed ja aeglaselt liikuvad seadmed e automatiseeritud tala-läbipaindemõõtjad: koormusplaat, Benkelman'i tala, La Croix deflektograaf ja California liikuv deflektomeeter;
- 2) dünaamilise vibrokoormusega seadmed (*ingl k Steady State or Dynamic Vibratory Equipment*): Dynaflect ja Road Rater;
- 3) dünaamilise impulsskoormusega: langeva raskusega koormusseade – FWD.

Lisaks eelmainitutele kasutatakse ka seismilisi teepinna pingelaineid tekitavaid seadmeid (seismiline katendi analüsaator – ingl k *Seismic Pavement Analyzer*) (Nazarian jt 2004; Saeed ja Hall 2002; Pavement Rehabilitation Manual).

Kuigi staatilised koormusseadmed on soodsa maksumusega, ei kasutata neid enam palju, sest nad ei võimalda tekitada reaalselt koormuse kestust ega saada mõõtmistulemustest vajumikausi (vt ptk 1.1) andmeid ning katsed võtavad palju aega. Automatiseeritud tala-läbipaindemõõtjatega saab küll vajumikausi kuju registreerida, aga see ei ole küllaldaselt reaalne, sest seadme liikumiskiirus on väike. Dünaamilised vibrokoormusega seadmed võimaldavad suhteliselt kiiresti ja madalate kulutuste juures mõõta koormuse all tekkinud vajumikaussi, kuid rakendatava koormuse suurus ja kestus ei vasta liikluse koormusele ning lisaks on protsessis vajalik ka staatilise eelkoormuse rakendamine (WSDOT Pavement Guide). Seismilised katendi analüsaatorid nõuavad katendikihtide elastsusmoodulite leidmiseks seismilistest moodulitest täpseid erinevate kihtide mittelineaarsete ja visko-elastsete omaduste määranguid vastavate mudelite abil (Nazarian jt 2004).

Eelmainitud NDT-seadmetel on teatud kapriisid ja seetõttu on nende kasutusvõimalused teekatendi seisukorra hindamisel piiratud. Dünaamilised impulsskoormusega seadmed e langeva raskusega koormusseadmed (ingl k *Falling Weight Deflectometers*, edaspidi lühendina FWD) on aga tänu katsete täpsusele ja suurepärasele korduvusele ning reaalselt koormust imiteeriva koormuse suurusele ja kestusele enimkasutatavad NDT-seadmed maailmas.

Lisaks eelnevatele on viimasel aastakümnel tehtud palju tööd suurel kiirusel (kuni 80 km/h) liikuvate katendi kandevõime mõõtmiseks mõeldud katseseadete (ingl k *Rolling Wheel Deflectometers*) väljatöötamiseks. Üle maailma on väljaarendatud viis erinevat veoki sadulhaagisel baseeruvat prototüüpi: kolm USAs, üks Rootsis ja üks Taanis. Ükski nendest seadetest pole veel valmis tavakasutuseks, kuid kindlasti mängivad sellist tüüpi seadmed lähiaastatel suurt rolli tee kandevõime määramiseks teedevõrgu tasandil. (Hildebrand 2002)

FWD (täpsem kirjeldus ptk 1.1) on tänapäeval enimkasutatud katseseade teekatendi struktuurse seisukorra hindamiseks nii võrgu kui ka projekti tasandil. FWD katsetulemusena saadakse katendi läbipainded teatud kaugustel koormuse tsentrilt. FWD mõõtmisel rakendatud koormus, mõõdetud läbipainded ja katendi

konstruktsioon moodustavad andmed katendikihtide jäikuste arvutamiseks (Hildebrand 2002). Kuna FWD-mõõtmised on mõeldud katendi kandevõime mõõtmiseks, siis omavad nad piiratud väärtust juhtudel, kus katendi seisukorra halvenemine ei ole seotud kandevõimega (COST 336).

Näiteks Washington State Department of Transportation (WSDOT) kasutab FWD mõõteandmeid katendi kandevõime, prognoositava eluea ja projekteeritavale ülekattele esitatavate nõudmiste arvutamiseks (WSDOT – www).

Katendi struktuurse seisukorra hindamiseks on mitmeid meetodeid. Enimkasutatud meetod on katendi eluea määramine arvutades liikluskooormuse algselt projekteeritud eluea lõpus ja arvates sellest maha koormused, mida on katend pidanud juba kandma. Selline meetod baseerub tavaliselt pingete ja deformatsioonide arvutamisel kriitilistes katendi punktides. Seejärel sisestatakse leitud pinged ja deformatsioonid katendi käitumismudelitesse (*ingl k pavement performance laws*) nagu väsimuspragunemise või püsivate deformatsioonide mudelid erinevate katendikihtide jaoks (COST 336). Kirjeldatud katendi järelejäänud eluea määramise protsess on tagurpidine katendi projekteerimisele. Kasutatavad meetodid ja käitumismudelid järelejäänud eluea arvutamiseks on eri maades erinevad, kuid sarnased nendele, mida kasutatakse uue katendi projekteerimisel.

On ka alternatiivseid meetodeid katendi struktuurse seisukorra hindamiseks. Mõnede meetodite puhul arvutatakse järelejäänud eluiga otseselt olemasoleva olukorra pingete ja deformatsioonide põhjal, kuid ei pöörata tähelepanu sellele, kui palju on katend pidanud juba koormusi taluma. Teiste meetodite puhul võrreldakse olemasolevat elastsusmoodulit algselt projekteeritud väärtustega ja arvutatakse sellest väsimuskahjustuste ulatus ja järelejäänud eluiga. Lisaks eelmainitutel on veel meetodid, mille puhul vaadeldakse ainult katendi läbipaindeid NDT koormuse all ja tuletatakse järelejäänud eluiga nende põhjal. (COST 336)

Mitte ainult arvutusmeetodid ei ole erinevad, vaid ka seisukorra indikaatorid, mida kasutatakse arvutustes ning ka viis, kuidas tegeletakse erinevustega ja ebamäärasustega mis on seotud katendi analüüsiga (projekteerimisega).

Siiski on kõigile meetoditele omased kaks põhitõde (COST 336):

- enne analüüsi alustamist peab koguma märkimisväärse koguse kohapeal määratud andmeid. Need andmed on vajalikud materjalide omaduste ja teiste

määrangute (nt katendikihtide arv ja paksused) jaoks ning mõjutavad valitud projekteerimiskriteeriumite tulemusi;

- igal järelejäänud eluea hindamise meetodil on omad piirangud ja tulemusi ei saa pimesi arvesse võtta. On väga tähtis võrrelda saadud tulemusi teiste struktuurse seisukorra indikaatoritega nagu vaatlustel leitud ja puuraukudest saadud tulemustega. Lõpuks peab kindlaks tegema, kas erinevad andmed toetavad üksteist.

Antud töös püütakse leida seost FWD-ga mõõdetud läbipainete ja katendi seisukorra vahel ehk kasutatakse eelpoolmainitud katendi seisukorra hindamise meetoditest viimast. Täpsemalt keskendutakse FWD mõõtmistulemustest arvutatud parameetrite (SCI, BDI ja BCI) ja katendi seisukorda kirjeldavate defektide, roopasügavuste ja katendi üldise elastsusmooduli (E-mooduli) vaheliste seoste uurimisele.

1.1 DÜNAAMILISE KOORMUSSEADME (FWD) ÜLDINE KIRJELDUS



Pilt 1.1 Dynatest 8000 seeria FWD (dynatest – www)

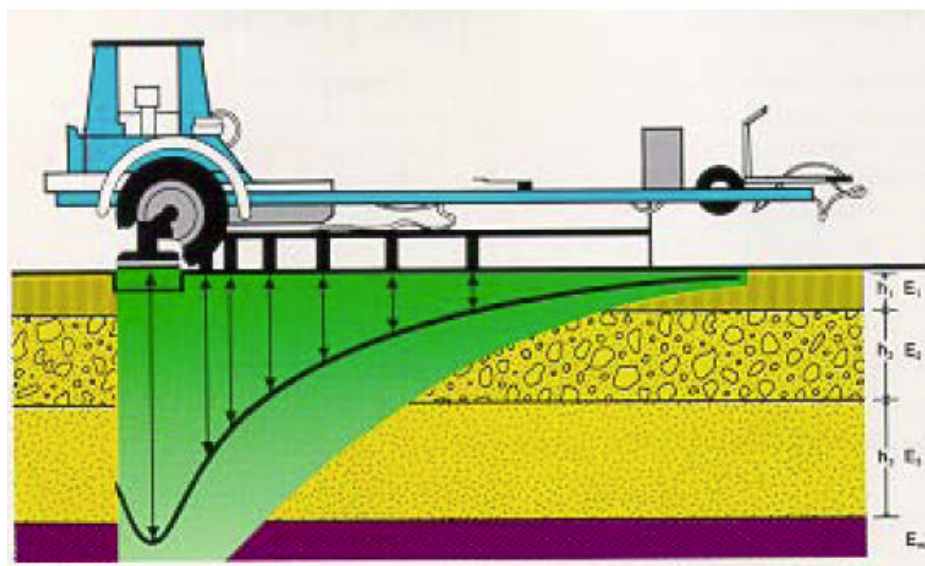
Langeva raskusega dünaamiline koormusseade (edaspidi lühendina FWD) on mittepurustav katseseade, mida kasutatakse katendi struktuurse tugevuse hindamiseks tee taastusremondi projektide koostamisel, uurimustöödel ja katendi vähese kandevõimega kohtade avastamiseks. Seadet kasutatakse nii elastsete kui ka komposiitsete (elastne koos jäiga alusega) ja jäikade katendite katsetamisel. Seade on enamasti paigaldatud sõiduauto järeilhaagisena treilerile, mis olenevalt tootjast on kas ühe- või kaheteljeline, kuid on ka seadmeid, mis on integreeritud kaubikutele või maasturitele.

FWD võimaldab katendile rakendada lühikese koormusimpulsina koormust, mis on samaväärne nii suuruselt kui kestuselt veoki rattakoormusega. Koormusimpulss tekitatakse teatud massiga raskuse kukutamisel 300 mm läbimõõduga ümmargusele koormusplaadile kinnitatud vedrusüsteemile (kummipuksidele). Tekitatava koormuse suurust ja kestust on võimalik varieerida langeva massi ja selle langemise kõrguse muutmisega. Erinevad FWD seadmed võimaldavad rakendada koormusi 4.45 kN–156 kN ja koormusimpulsi kestust 30 – 90 ms. Katte läbipainet mõõdetakse piki teed reas paikneva 7 kuni 9 anduriga, millest üks paikneb koormusplaadi tsentris ja ülejäänud teatud kaugustel esimesest. Eestis kasutatav andurite asetuse on alates koormusplaadi keskmest järgmine: 0, 300, 600, 750, 900, 1200 ja 1500 mm. Mujal maailmas soovitatakse kasutada andurite teistsuguseid asetusi (vt aptk 1.5). Anduritena kasutatakse nii lineaarnihke- (kiirusandureid, *ingl k geophones / velocity transducers*) ja kiirendusandureid kui ka seismomeetreid (madalsageduslikud seadmed, mis

kasutavad mass-vedru süsteemi referentsina ja diferentsiaalmuundureid – LVDT). Esimesed kaks anduritüüpi registreerivad dünaamilisi liikumisi, kuid on iseseisvad seadmed ilma referentspunkti vajaduseta (Hildebrand 2002). Registreeritud andmed võetakse vastu protsessoriga, mis suunab informatsiooni edasi personaalarvutile. Läbipainde ehk vertikaalse nihke saamiseks tuleb kiirendusandurite mõõdetud andmeid kahekordselt integreerida, samal ajal kui kiirusandurite mõõteandmed vajavad vaid ühekordset integreerimist.

Katse käigus langetatakse hüdroseadmete abil koormusplaat ja mõõteandurid (kinnitatud eraldiseisva lati külge) teepinnale. Seejärel tõstetakse raskused teatud kõrgusele ja mõõdetakse koormuse kukkumise tagajärjel tekkinud teepinna deformatsioonid. Kuna koormamise järel deformeerub teepind kausikujuliselt, siis nimetatakse tekkinud depressioonilehtrit vajumikausiks (pilt 1.2). Tavaliselt võtab mõõtmisprotseduur ühes punktis aega ligikaudu üks minut, seega on võimalik teostada kuni 60 mõõtmist tunnis.

Üle maailma kasutatakse erinevate tootjate poolt valmistatud seadmeid, millest levinumad on Dynatest (Taani), Phonix (praegune Carl Bro Group, Taani/USA), KUAB (Rootsi/USA), Komatsu (Jaapan), JILS (Foundation Mechanics Inc, USA). Eestis on AS-s Teede Tehnokeskus kasutusel firma Dynatest seade FWD 8000 (pilt 1.1.). Võrgutasandi mõõtmisi teostatakse sõiduraja parema rattajälje kohal 100 meetrise sammuga ja tulemused säilitatakse Riiklikus Teeregistris.



Pilt 1.2 FWD-ga mõõdetav vajumikauss suurendatud mõõtkavas (Dynatest'i brošüür)

1.2 TAGASIARVUTUS JA KAASAAEGSED INTERPRETATSIOONIVAHENDID MATERJALIDE KÄITUMISMUDELITE KUJUTAMISEKS

Kuna teedehitus Eestis on oma olemuselt viimastel aastakümnetel muutunud uute teede ehitamisest olemasolevate rekonstrueerimiseks, siis on enne projekti koostamist kasulik määrata materjalide tugevusomadused NDT katsete abil ning mitte ennustada väheste puuraukude põhjal oletatavaid materjale ja nende omadusi. Puuraukudest saadav info katendimaterjalide ja muldkeha pinnaste kohta peab olema täiendav ja abistav, mitte ainus andmehulk. FWD katsetest materjalide elastsusmoodulite määramiseks tuleb kasutada tagasiarvutust (*ingl k Backcalculation / Back-Analysis*).

1.2.1 Tagasiarvutusprotseduuri kirjeldus ja selle puudused

Tagasiarvutuseks nimetatakse protseduuri katendikihtide materjalide üksikute elastsusmoodulite (Young'i moodulite) määramiseks kasutades mõõdetud teepinna läbipaindeid. Tagasiarvutuse nimi tuleneb sellest, et elastsete kihtide teooriat kasutatakse niiöelda tagurpidi. Enamik automatiseeritud tagasiarvutusprogramme kasutab mitmekihilise konstruktsiooni lineaarselt elastset mudelit. Iteratiivprotsessis antakse kihtidele algsed E-moodulid, seejärel arvutatakse teepinna vajumid vastava koormuse all ning võrreldakse saadud vajumikõverat mõõdetuga. Protsessi korratakse (kihtide E-mooduleid muudetakse) kuni arvutatud kõver ühtib mõõdetud kõveraga teatud tolerantside piires. Mõned programmid kasutavad eelnevalt loodud andmebaasi vajumikõverate võrdlemiseks. Sellisel juhul leitakse kihtide E-moodulid regressioonvõrrandeid kasutades (COST 336). Eduka tagasiarvutuse võti seisneb selles, et katendi mudeli peab määratlema võimalikult täpselt. Arvutusprotseduuri sisendandmetena tuleb määrata kihtide arv ja paksused ning Poisson'i tegurite väärtused. Väga tähtis on kihtide paksuste võimalikult täpne määramine, seega oleks hea, kui FWD mõõtmistega integreeritult oleksid teostatud ka kihtide mõõtmised maaradariga (*ingl k Ground Penetrating Radar – GPR*). Eestis on küll maaradar olemas, kuid suurema andmebaasi loomisel pole seda siiani kasutatud. Kuna FWD-ga mõõdetud läbipainete ja katendi kihtide E-moodulite vahelisi seoseid ei ole õnnestunud kontrollmõõtmispunktide (26 punkti) puuraukude põhjal leida, siis tuleks kaaluda maaradariga kihipaksuste mõõtmisi suuremal teedevõrgul.

Mitmekihilise konstruktsiooni elastsusteorial põhinevad tagasiarvutusprogrammid eeldavad, et kahjustuste mõju vajumikõverale võetakse arvesse nende kihtide E-moodulite vähendamisega, kus probleemid võiksid esineda. Y. R. Kim viitab oma uurimuses (Kim jt 2000) Jung' ja Stolle' 1992 aasta tööle, kus märgitakse järgmist: siiski on uurijate ja praktikute poolt järeldatud ja tõestatud (kinnitatud), et tagasiarvutusprogrammide algoritmid, mis põhinevad mitmekihilise konstruktsiooni elastsusteorial, tekitavad suuri erinevusi kahjustunud kihtide E-moodulite genereerimisel. Seetõttu pööravad mõned uurijad enam tähelepanu läbipainete interpreteerimisele, kui E-moodulite tagasiarvutusele.

Teine puudus mitmekihilise konstruktsiooni elastsusteorial põhineval tagasiarvutusprogrammidel on see, et nad kasutavad staatilise analüüsi metoodikat. Erinevate uurijate tööd on näidanud, et märkimisväärsed vead tagasiarvutatud E-moodulile lisanduvad staatilistest analüüsides, kuna kasutatavad andmed pärinevad olemuselt dünaamilisest katsest (Kim jt 2000). Kim viitab ka Chang et al. (1992) ja Lee (1997) töödele, kus avaldatakse järgmist: kui kasutatakse dünaamilisest katsest saadud deformatsioone, siis alahindavad staatilisel analüüsil põhinevad programmid tihti aluspinnase tugevust. Seetõttu on uute tagasiarvutusmetoodikate väljatöötamine tähtsal kohal.

1.2.2 Tagasiarvutusprogrammide täiendamine lõplike ja diskreetsete elementide meetoditega

Tavalised tagasiarvutusprogrammid vaatlevad tee konstruktsiooni elastse mitmekihilise mudelina ja eeldavad, et materjalid on lineaarselt elastsed, homogeensed ja isotroopsed. Muldkeha materjalid (mineraalmaterjalid ja pinnased) aga ei ole korduva liikluskooormuse all lineaarset tüüpi pinge-deformatsiooni käitumisega. Selleks, et võtta arvesse reaalseid materjalide mittelineaarseid omadusi, tuleb kaasata tagasiarvutusse lõplike elementide meetodil põhinevad programmid. Näiteks üks selline programm on ILLI-PAVE[®] (välja töötatud Illinois'i ülikoolis). ILLI-PAVE[®] on telgsümmeetriline lõplike elementide programm, mis modelleerib katendi kui kahemõõtmelise telgsümmeetrilise pöörleva keha ja kasutab mittelineaarseid pingest sõltuvaid katendi käitumise mudeleid (Gopalakrishnan jt 2006).

Lõplike elementide meetodiga on võimalik vaadelda mittelineaarseid sõltuvusi nii pingete ja elastsete deformatsioonide kui ka pingete ja plastsete deformatsioonide vahel. Lisaks saab võtta arvesse kas viskoosseid või visko-elastseid deformatsioone, kuid siiski on deformatsioonide tasand pidev, kuni ei ole kaasatud spetsiaalseid elemente lubamaks ebaühtlusi (katkevuskohti). Kivi- ja mineraalmaterjalid ei deformeeru oma olemuselt nii nagu seotud materjalid (või kehad). Nendes toimivad osakestevahelised kontaktjõud (normaal- ja nihkejõud), mille tagajärjel osakesed paigutuvad ümber. Mineraalmaterjalide deformeerumisel on just domineeriva tähtsusega omavahelistest liikumistest tekitatud paigutised. Selleks, et tegeleda selliste materjalide mehaanikaga tuleb kaasata diskreetsete elementide meetod. See meetod võimaldab kirjeldada elastseid ja plastseid deformatsioone samas protsessis. (Ullidtz 1998)

1.2.3 Katendikihtide käitumismudelite loomine kunstlike närvivõrkude süsteemi abil

Viimastel aastatel on kunstlike närvivõrkude süsteemid (*ingl k Artificial Neural Network Systems* – ANNs) üha rohkem kasutatavad vahendid katendi töötamise kujutamise seotud probleemide lahendamisel (Gopalakrishnan jt 2006). ANNi teooria kuulub tehisintellekti valdkonda ja selle eesmärk on püüda aru saada, kuidas käib informatsiooni töötlemine ajus ning välja töötada matemaatilised sõltuvused, mis suudaksid protsessi taasluua. ANN on projekteeritud sarnanema inimese aju võimalustega mõelda ja õppida läbi tajumise, järeldamise ja seletamise. ANNi moodustavad tajuobjektid ja kõikide objektide omavahelised sidemed mitmekihilises süsteemis. Süsteemi väljaõpetamiseks on vajalik hulk kindlaid väärtusi sõltumatutest muutujatest ja nendele vastavatest sõltuvatest muutujatest. Näiteks võib töötava mudeli sisendvektor koosneda elementidest, mis esindavad asfaldikihi paksuseid ja FWD andurite lugemeid ning väljundi ainus element määrata kvantitatiivse omaduse nagu kriitilise deformatsiooni asfaldikihi alapinnas või kattekihi järelejäänud eluea (Ferregut jt 1999). Kuigi varasematel aastatel kasutati ANN modelleerimist abivahendina katendi E-mooduli tagasiarvutusel, ei olnud andmebaasi väljatöötamiseks kasutatud struktuursed mudelid reaalseid pingesõltuvusi arvestavate omadustega (Gopalakrishnan jt 2006). Värskeamad tööd (Gopalakrishnan jt 2006) on näidanud tagasiarvutuse mudelil põhinevate süsteemide kasutusvõimalusi, mis

kujutavad mittelineaarseid sõltuvusi NDT-katse läbipainete ja katendikihtide elastsusmoodulite vahel.

Eelmainitud interpretatsioonivahendite rakendusi vajumikõvera parameetrite ja katendikihtide E-moodulite vaheliste seoste leidmiseks teostatud uurimustöödest on antud ülevaade alapeatükis 1.4.

1.3 FWD MÕÕTMISTULEMUSTEST ARVUTATAVAD PARAMEETRID

NDT-seadmete kasutamise aja vältel on nende vajumikõverate kirjeldamiseks välja töötatud erinevaid parameetreid. Parameetrite eesmärk on hinnata nii kogu katendi kui ka üksikute kihtide tugevust või seisukorda. Tabelis 1.1 on esitatud valikuline ülevaade maailmas kasutatust leidnud FWD mõõtmistulemustest arvutatud vajumikausi parameetritest. Erinevad uurimused (ptk 1.4) on näidanud parameetrite kasutusvõimalusi nii katendikihtide E-moodulite arvutamisel kui ka katendi struktuurse seisukorra hindamisel.

Antud töös keskendutakse kolmele põhilisele (SCI, BDI, BCI) vajumikausi parameetri uurimisele. Seni ei ole Eestis neid parameetreid katendi seisukorra hindamisel kasutatud, välja arvatud AS Teede Tehnokeskuses T. Kaalu poolt 2006 koostatud Niitvälja- Kulna maantee kandevõime uuringus (Kaal 2006). Lisaks sellele käsitles P. Paabo oma magistritöös (Paabo 2006) parameetrite seoseid katendi üldise elastsusmooduliga ja seotud kihtide paksusega ning leidis lähtuvalt minimaalsest katendi üldisest E-moodulist maksimaalsed lubatavad SCI, BDI ja BCI väärtused. 26 FWD kontrollmõõtepunkti andmete alusel leitud parameetrite hajuvus oli suhteliselt suur, kuna vaatluse all olnud katendite seisukord ja ka katendikonstruktsioonid olid väga erinevad. Seega ei saa leitud parameetrite piirväärtusi ilma täiendavate uuringuteta kehtestada.

Käesolevas töös vaatluse all olevate vajumikausi parameetrite lühiiseloostus:

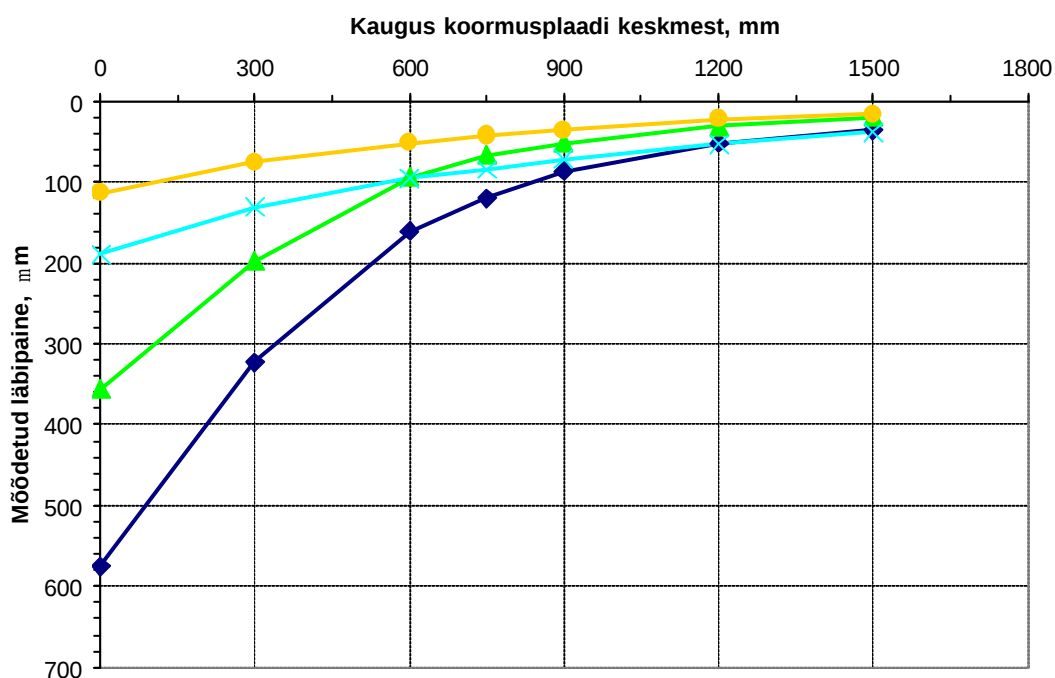
Surface Curvature Index (SCI) e. pinna kõverustegur – FWD läbivajumisandurite D1 ja D2 lugemite vahe ($d_0 - d_{300}$), mis iseloomustab ülemiste katendikihtide seisukorda;

Base Damage Index (BDI) e. aluse vigastatuse tegur – FWD läbivajumisandurite D2 ja D3 lugemite vahe ($d_{300} - d_{600}$), mis iseloomustab alusekihtide seisukorda;

Base Curvature Index (BCI) e. aluse kõverustegur – FWD läbivajumisandurite D6 ja D7 lugemite vahe ($d_{1200} - d_{1500}$), mis iseloomustab aluspinnase seisukorda.

Edaspidi on kasutatud inglise keelest pärinevaid lühendeid SCI, BDI ja BCI.

Graafikul 1.1 on toodud neli erinevat vajumikõverat, mis on koostatud reaalseste mõõtmistulemuste põhjal. Mõõdetud läbipainded on väga erinevad ja selgelt on eristatavad tugevamad ja nõrgemad katendid. Nõrka katendit iseloomustavad suured läbipainded koormusplaadi lähedal ja seetõttu on kõvera puutuja tõus suur. Tugeva katendi läbipainded on jaotunud ühtlasemalt ja kõvera puutuja tõus on väiksem. Laugem vajumikõver tuleb sellest, et konstruktsioon jaotab koormuse paremini aluspinnasele laiali. Kuna SCI, BDI ja BCI on erineval kaugusel asuvate andurite lugemite vahed, siis kirjeldavad nad vajumikõvera puutuja tõusu. Parameetri suurema väärtuse tingib järsem puutuja tõus ja võib eeldada, et vastavas katendikihis esineb probleeme, mis põhjustavad nõrga kandevõime. Antud töö eesmärk on välja selgitada vajumikausi parameetrite piirväärtused.



Graafik 1.1 Näiteid vajumikõverate kujudest

Tabel 1.1 Maailmas enamkasutatavad vajumikausi parameetrid

Vajumikausi parameetri nimetus inglise keeles	Arvutusvalem	Ühik	Parameetri põhiülesanne	Viide, sulgudes algallikas
Surface Curvature Index	$SCI = d_0 - d_{300}$ $SCI = d_0 - d_r$ (Kasutusel ka $r \in [450, 600]$)	µm või mm	Kirjeldab seotud kihtide väsimust	Kim jt 2001; (Scrivner jt 1968)
Base Damage Index	$BDI = d_{300} - d_{600}$	µm või mm	Kirjeldab aluse seisukorda	Kim jt 2001; (Scrivner jt 1968)
Base Curvature Index	$BCI = d_{600} - d_{900}$ (USA-s kasutatav) $BCI = d_{900} - d_{1200}$ (Soomes kasutatav) $BCI = d_{1200} - d_{1500}$ (Eestis kasutatav)	µm või mm	Kirjeldab muldkeha alumiste materjalide või aluspinnase seisukorda	Kim jt 2001; (Peterson jt 1972)
Area	$AREA = \frac{6(D_0 + 2D_1 + 2D_2 + D_3)}{D_0}$ $AREA = \frac{150(d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900})}{d_0}$	tollides	Kirjeldab vajumikausi kuhu koormuse lähedal vajumikõvera kohale jääva normaliseeritud pindala järgi	Tayabji ja Lukanen 2000; Kim jt 2001; WSDOT Pavement Guide 1998 (Hoffman ja Thompson 1981)
		mm		
Area Under Pavement Profile	$AUPP = \frac{5d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900}}{d_0}$		Kirjeldab ülemiste katendikihte seisukorda	Kim jt 2001; (Thompson)
Shape Factors	$F_1 = (d_0 - d_{600}) / d_{300}$ $F_2 = (d_{300} - d_{900}) / d_{600}$	ühikuta suurus	Ekvivalentsügavusel oleva kihi seisukorra määramine	Kim jt 2001 (Hoffman 1981)
Deflection Ratio	$DR = d_{600} / d_0$	ühikuta suurus	Ekvivalentsügavusel oleva kihi seisukorra määramine	Kim jt 2001 (Klassen 1976)

Märkused:

1. $d_0, d_{300}, d_{600}, d_{900}, d_{1200}, d_{1500}$ – mõõdetud deformatsioon (läbipaine) kaugusel 0, 300, 600, 900, 1200, 1500 mm koormusplaadi tsentrist;
2. D_0, D_1, D_2, D_3 – mõõdetud deformatsioon kaugusel 0 jalga, 1 jalg (305 mm), 2 jalga (610 mm), 3 jalga (914mm) koormusplaadi tsentrist.

1.4 ÜLEVAADE VAJUMIKAUSI PARAMEETRITEGA (SCI, BDI JA BCI) SEOTUD UURIMUSTÖÖDEST

1.4.1 BDI ja BCI kasutamine aluspinnase ja alusekihtide elastsusmoodulite määramisel

- USA-s North Carolina State University's teostati järgnevalt kirjeldatud töö (Kim jt 2000) elastse katendi seisukorra hindamiseks kasutades vajumikausi parameetreid, dünaamilisel lõplike elementide meetodil põhinevat analüüsi ja kunstlike närvivõrkude süsteemi (ANN) rakendust.

FWD mõõtmistulemuste töötlemiseks kasutati vajumikausi parameetreid ning ANNi kihtide E-moodulite määramiseks ja seisukorra hindamiseks. Analüüs teostati kahemõõtmelise dünaamilise lõplike elementide programmi ABAQUS abil, millega loodi läbipainete informatsiooni. Erinevalt enamikest kasutatavatest tagasiarvutusprogrammidest, mis iteratiivselt sobitavad kõikide kihtide E-moodulid kokku mõõdetud deformatsioonidega, määrab esitatud meetod kõigepealt aluspinnase deformatsioonimooduli kahe vajumikausi parameetri BDI ja kujuindeksi F2 (vt. tabel 1.1) abil. Seejärel rakendab arvutatud aluspinnase E-mooduli ja teised parameetrid sisendandmetena vastavalt kohaldatud ANN-süsteemi ülejäänud kihtide E-moodulite arvutamiseks. Lisaks kihtide tagasiarvutatud E-moodulitele esitatakse töös vajumikõvera parameetritel põhinev meetod asfaldikihi seisukorra hindamiseks.

Antud meetodi kasutusvõimaluste uurimiseks võrreldi seda MODULUS programmiga (tagasiarvutusprogramm) analüüsides tee peal FWD-ga mõõdetud deformatsioone. Uurimaks töös esitatud meetodeid, rakendatakse neid North Carolina elastsete katendite hindamisel.

Kirjeldatud töö piires selgus järgnev:

- 1) Kuna ainult üksikut vajumikausi parameetrit kasutades ei õnnestu täielikult kirjeldada katendi seisukorda, siis kasutati parameetrite kombinatsioone.
- 2) BDI ja F2 saab kasutada aluspinnase elastsusmooduli määramisel. Seejärel saab AB-katte ja mineraalmaterjalist aluse elastsusmoodulid määrata

kasutades teisi vajumikausi parameetreid, nagu ϕ , AREA ja BCI (vt tabel 1.1).

- 3) BDI-F2 sõltuvuse kaudu määratav E_{sg} leidmise protseduur tundub sobivat erinevate pinnaste mittelineaarsete pingede-deformatsiooni käitumiste seletamiseks. Lisaks võib seost kasutada ka katendi vigastatuse määramiseks.
- 4) Töö tulemused konstateerivad, et aluspinnase E-moodul on alahinnatud, kui FWD deformatsioone analüüsitakse kasutades staatilisel analüüsil põhinevaid programme. Parema hinnangu kihi E-moodulile saab anda kasutades FWD mõõtmiste töötlemiseks dünaamilisi analüüse.
- 5) Katendi kahjustatuse saab kindlaks teha kasutades parameetreid F2 ja AREA, mis siiski mingit kindlat liiki defekti määramiseks ei sobi.

1.4.2 Katendikihtide seisukorra hindamine SCI, BDI ja BCI abil

- H. M. Park kirjutas North Carolina State University's doktoritöö (Park 2001) teemal: FWD mitmetasandilisel koormamisel saadud andmete kasutamiseks katendi tugevuse seisukorra hindamisel. Järgnevalt on esitatud lühikokkuvõtte antud tööst.

Mitmetasandilise koormamise katsed erinevas seisukorras katenditüüpidel näitasid, et standardisel koormamisel (USA-s 40 kN) olid vajumikõverad praktiliselt identsed, kuid koormuse suurendamisega suurenesid kehvemas seisukorras (esinesid visuaalsed defektid) konstruktsiooni läbipainded märgatavalt rohkem kui aasta vanusel heas seisukorras katendil. Kuna sidumata materjalide E-moodul on pingest sõltuv, siis väiksema koormuse puhul on kogupinge veel piisavalt väike, et eirata puudujääke, mis kaasnevad lineaarsete mudelite kasutamisega. Mittelineaarse käitumise arvesse võtmiseks loodi dünaamiline lõplike elementide meetodil põhinev programm koos pingest sõltuva materjali mudeliga (NCPAVE). Lõplike elementide meetodiga genereeriti sünteetiline andmebaas, mille põhjal hakati otsima sõltuvusi teepinna vajumite ja katendikihtide kriitiliste deformatsioonide vahel. Andmebaas koosnes erineva paksusega kolmekihilistest mudelitest, teepinna vajumitest erinevatel kaugustel ning pingetest ja deformatsioonidest iseloomulikes katendi punktides. Andmebaasi analüüsi käigus selgitati välja vajumikausi parameetrid, mis on katendi

reaktsioonidele kõige tundlikumad. Parameetrid ja regressioonanalüüsi tulemused on esitatud tabelis 1.2.

Tabel 1.2 Parameetrite analüüsi tulemused elastsetele katenditele (Park 2001)

Defekti tüüp	Kriitiline reaktsioon	Vajumikausi parameeter	R ²
Väsimus-pragunemine	Tõmbedeformatsioon AB-kihi alumises pinnas	BDI _v	0,9808
		AUPP _v	0,9319
		BCI	0,9302
		SCI	0,8458
Roopad	Keskmise survedeformatsioon AB-kihis	SCI _v	0,9110
		AUPP	0,7476
		BDI	0,5206
		BCI	0,4182
	Survedeformatsioon aluse kihi peal	BDI _v	0,9675
		BCI	0,908
		AUPP	0,8824
		SCI	0,7830
	Survedeformatsioon aluspinna peal	BCI _v	0,7461
		BDI	0,7157

Analüüsis kasutati kriitiliste deformatsioonide prognoosimiseks järgnevalt esitatud valemeid

Tõmbedeformatsioonid asfaldikihi alapinnas leiti vastavalt:

$$\log(e_{ac}) = 1,082 \log (BDI) + 0,259 \log (H_{ac}) + 2,772; R^2 = 0,987, \quad (1.1)$$

kus e_{ac} – tõmbedeformatsioon AB-kihi alumises pinnas, [mikrodeformatsioon];

H_{ac} – asfaldikihi paksus, [mm].

Survedeformatsioonid asfaldikihis leiti vastavalt:

$$\log(e_{cac}) = 1,076 \log (SCI) + 1,122 \log (H_{ac}) + 0,315; R^2 = 0,911, \quad (1.2)$$

kus e_{cac} – survedeformatsioon AB-kihis, [mikrodeformatsioon].

Aluse survedeformatsioon leiti vastavalt:

$$\log(e_{abc}) = 0,938 \log(BDI) - 0,079 \log(H_{ac}) + 0,045 \log(H_{base}) + 3,826; R^2 = 0,970, (1.3)$$

kus e_{abc} – survedeformatsioon aluse kihis, [mikrodeformatsioon];

H_{base} – aluse kihi paksus, [mm].

Aluspinnase survedeformatsioon leiti vastavalt:

$$\log(e_{sg}) = 1,017 \log(BCI) - 0,042 \log(H_{ac}) - 0,494 \log(H_{base}) + 5,072; R^2 = 0,903, (1.4)$$

kus e_{sg} – aluspinnase survedeformatsioon, [mikrodeformatsioon].

Katendikihtide seisukorra määramiseks kasutati indikaatoritena vajumikausi parameetreid ja eelnevalt esitatud kriitilisi deformatsioone. Sünteetilise andmebaasi põhjal esitati elastsete katendite jaoks järgnevad seosed.

Asfaldikihi elastsusmooduli määramiseks:

$$\log(E_{ac}) = -1,183 \log(H_{ac}) - 1,103 \log(SCI) + 5,096, (1.5)$$

kus E_{ac} – asfaldi elastsusmoodul, [MPa]

Aluse seisukorra hindamiseks:

$$\begin{aligned} \log(BDI) &= -1,549 \log(H_{ac}) - 0,095 \log(H_{base}) - 0,572 \log(E_{ac}) - 0,013 \log(E_{ri}) + 4,072; \\ \log(e_{sg}) &= -1,583 \log(H_{ac}) + 0,001 \log(H_{base}) - 0,591 \log(E_{ac}) + 0,146 \log(E_{ri}) + 8,064 \end{aligned} (1.6)$$

kus E_{ri} – aluspinnase E-moodul 41 kPa deviatoorse pinge korral, [MPa]

Aluspinnase seisukorra hindamiseks:

$$\begin{aligned} \log(BCI) &= -1,280 \log(H_{ac}) - 0,150 \log(H_{base}) - 0,406 \log(E_{ac}) - 0,167 \log(E_{ri}) + 3,778; \\ \log(e_{sg}) &= -1,330 \log(H_{ac}) - 0,571 \log(H_{base}) - 0,446 \log(E_{ac}) - 0,474 \log(E_{ri}) + 9,348 \end{aligned} (1.7)$$

H. M. Park järeldas töö piires järgmist:

- 1) Vajumikausi parameetreid ja kriitilisi katendi reaktsioone saab kasutada elastse katendi aluste ja aluspinnaste tugevuse määramiseks. North Carolina Department of Transportation poolt kasutatav maksimaalne koormus (53 kN) FWD katsetel ei ole piisav aluse ja aluspinnase seisukorrale täpse hinnangu andmiseks.

- 2) Prognoositava AB-kihi elastsusmooduli (E_{ac}) ja kriitilise reaktsiooni (e_{ac}) põhjal on võimalik hinnata olemasoleva AB-kihi seisukorda.
- 3) Väsimuspragunemist on võimalik prognoosida esitatud meetodi põhjal, välja arvatud katendite puhul, mis on kiiresti suureneva pragunemiste hulga niisketes tingimustes. Vastaval juhul tuleks kaasata kliimaatilisi faktoreid.
- 4) Roobaste prognoosimiseks esitatud protseduur leiti olevat küllalt täpne roobaste arvutamiseks tegelike roobaste tekkimisega võrreldes.

1.4.3 SCI ja BCI kasutamine katendi elastsusmooduli määramiseks

- Soome Maanteeamet töötas 2006 a. teostatud uurimuse (Tiehallinnon selvityksiä 17/2006) käigus välja mudelid katendi kevadise üldise elastsusmooduli arvutamiseks FWD mõõtmistulemuste ja katendi seisukorda mõjutavate faktorite abil.

Uurimuse lähteandmed pärinesid paljudelt erinevas seisukorras olevatelt teedelt. Lisaks kandevõime mõõtmistele koguti andmed ka tasasus- ja sõidujälgede vahelise harja kõrguse mõõtmistega. Leiti, et katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks kasutatava FWD 0-anduri lugemi taandamiseks kevadisele olukorrale sobivad järgmised lineaarsed mudelid.

Asfaltkatetega teede jaoks:

$$Y = 1,123 \cdot \left[-326 + 373 \cdot X_1^{0,11} - 0,00012 \cdot X_2 + 8,67 \cdot X_3^{0,88} + 0,19 \cdot X_4^{1,23} + 0,089 \cdot X_5^{1,30} \right] - 82 \quad (1.8)$$

kus Y – temperatuurile korrigeeritud 0-anduri (d0) lugem kevadel;

X_1 – sõidujälgede vahelise harja kõrguse kasv;

X_2 – kumulatiivne standardtelgede koormus;

X_3 – BCI, temperatuurile korrigeeritud andurite (d900 – d1200) lugemite vahe;

X_4 – SCI, temperatuurile korrigeeritud andurite (d0 – d300) lugemite vahe;

X_5 – temperatuurile korrigeeritud 0-anduri (d0) lugem suvel.

$$Y = 1,189 \cdot \left| -241 + 173,7 \cdot X_1^{0,20} + 37,6 \cdot X_2^{0,49} + 6,5 \cdot X_3^{0,71} \right| - 151, \quad (1.9)$$

X_1 – sõidujälgede vahelise harja kõrguse kasv;

X_2 – BCI, temperatuurile korrigeeritud andurite (d900–d1200) lugemite vahe;

X_3 – temperatuurile korrigeeritud 0-anduri (d0) lugem suvel.

$$Y = 1,167 \cdot \left[-250 - 37,2 \cdot X_1 + 370,8 \cdot X_2^{0,29} + 4,9 \cdot X_3^{0,8} + 42,9 \cdot X_4^{0,6} \right] - 230, \quad (1.10)$$

X_1 – katte vanus;

X_2 – sõidujälgede vahelise harja kõrguse kasv;

X_3 – temperatuurile korrigeeritud 0-anduri (d0) lugem suvel;

X_4 – BCI, temperatuurile korrigeeritud andurite (d900 –d1200) lugemite vahe.

1.5 FWD MÕÕTEANDURITE ASETUSE MÕJU KIHITIDE

TAGASIARVUTATUD ELASTSUSMOODULITELE

Nagu eelpool mainitud kasutatakse üle maailma mitmete erinevate tootjate poolt valmistatud FWD-sid. Erinevad tootjad pakuvad kasutamiseks erineval hulgal andureid ja erinevaid andurite paiknemise võimalusi. 2001 a. mais viidi USA-s Florida Transpordiameti (FDOT) poolt läbi küsitlus 51 USA osariigi Transpordiametis kasutatavate FWD-de kohta. Küsitlusele vastanud 39 ametist 23 kasutab tüüpilistel rekonstruktsiooni objektide katsetamisel seitset andurit, 12 üheksat andurit, kaks kaheksat ja kaks kuut andurit (Nazef ja Choubane 2002).

Kokkuvõtte USA Transpordiametrite poolt ja Euroopa riikides ning Jaapanis kasutatavatest FWD-de erinevatest andurite asetusest on toodud tabelis 1.3. Nende andmete kõrval on Eestis kasutatav andurite asetuse (0, 30, 60, 75, 90, 120, 150 cm) erandlik. COST'i aruanne 336 soovib valida andurite paiknemise järgnevalt reast: 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100, 2400 mm. USA-s soovib FHWA LTPP Manual elastsete katendite katsetamisel kasutada: 0; 203; 305; 457; 610; 914;

1524 mm (FHWA – www). Suurbritannias soovitab Design Manual for Roads and Bridges: 0; 300; 600; 900; 1200; 1500; 2100 mm (DMRB – www). Kindlasti peaksid COST'i aruande kohaselt andurid asetsema järgmistel kaugustel koormuse keskmest: 0, 30, 60 ja 90 cm. Ülejäänud andurite asetused sõltub kogu katendi jäikusest, sest aluspinnase jäikus (deformatsioonimoodul) avaldab kõige suuremat mõju vajumikõvera kujule. Ideaalne paiknemisviis oleks vastavalt kaks andurit igal katendikihi sügavuse ekvivalentkaugusel.

Tabel 1.3 Kasutatavad FWD andurite asetused USA-s, Euroopas ja Jaapanis

Riik	Anduri tähis								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
USA ¹	0	20	30	45	60	90	120	150	180
	0	20	30	45	60	75	90	120	150
	0	30	60	75	90	105	120	150	180
	0	30	60	90	120	150	180		
	0	20	30	45	60	90	150		
	0	30	45	60	90	120	150		
Rootsi ²	0	20	30	45	60	90	120		
Taani ²	0	20	30	45	65	90	120		
Holland ²	0	20	30	60	90	120	180		
Jaapan ³	0	20	30	45	60	75	90	120	150

Märkused:

1. Andurite kaugused koormuse keskmest on esitatud sentimeetrites.
2. Tollimõõdustikust võetud andmed on sentimeetrites esitatuna ümardatud lähima täis- või poolkümnendini.
3. Paksemas kirjas esitatud read on enimkasutatavad andurite asetused USA-s.

Viited:

¹ Nacef ja Choubane, 2002

² Mork, H., 1998

³ Kameyama, S. jt. 1998

Nagu tabelist näha, kasutatakse andurite tihedamat asetust koormusplaadile lähemal. Selline asetused on soovituslik õhukeste katetega katenditele (COST 336). Õhukesteks

kateteks loetakse kuni 50 mm paksusi katteid, keskmise paksusega on kuni 150 mm katted. Eesti katendid on valdavalt õhukese kattega, seega võiksid kasutatava FWD andurid paikneda koormusplaadi lähedal tihedamalt. Eelneva põhjendus tuleb ilmekalt välja järgnevalt lühidalt kirjeldatud uurimusest.

Norras viidi 1990. aastate teises pooles läbi uurimus andurite optimaalse paiknemise leidmiseks kihtide elastsusmooduli tagasiarvutuse jaoks (Mork, H. 1998). Teostati statistiline analüüs nii FWD kui ka Dynaflect'i andurite parima asetuse leidmiseks. Vastavate FWD mõõtmiste korral paiknes üks andur koormusplaadi keskmises ja ülejäänud 20 kuni 150 sentimeetrit esimesest. Tagasiarvutuse protseduur sisaldas iteratiivprotsesse, kus aluspinnase E-moodul põhines üldisel E-moodulil ja kihtide paksustel kolmekihilises (kate, alus ja aluspinnas) lineaarses elastses konstruktsioonis ning arvutati empiirilise seose järgi. Tehtud analüüsi tagajärjel leiti omavahel väga heas korrelatsioonis olevat tabelis 1.4 esitatud vastavate andurite asetuste korral mõõdetud läbipainded ja vastavate kihtide elastsusmoodulid. Uurimuse tulemusena kasutatakse Norras USA FHWA poolt soovitatud standardasetust (0, 20, 30, 45, 60, 90, 150 cm).

Tabel 1.4 Katendikihtide tagasiarvutatud elastsusmoodulite ja mõõdetud läbipainete vahelised statistilised seosed FWD andurite asetuste korral (Mork, H. 1998)

Kiht	Andurite kaugused koormusplaadi keskmest, cm				R
Kattekiht	0	20	30		0,99
	0	25	30		0,99
Aluse kiht	30	45	75	90	0,964
	30	60	75	90	0,957
	30	45	60	90	0,944
Aluspinnas				120	0,99
				150	0,99

Tulenevalt eelnevast oleks vaja Eestis teostada täiendavaid uuringuid FWD mõõtmistest saadud läbipainete otseseks kasutamiseks katendikihtide E-moodulite leidmisel. Kindlasti tuleks kaaluda andurite asetuse tihedamaks muutmist koormusplaadi läheduses. Näiteks nihutada alates 75 cm kauguselt koormuse keskmest andureid järgmisele järjestusele: 0 – 20 – 30 – 60.

2 TEEREGISTRI PÕHJAL KOOSTATUD ANDMEBAAS JA SINNA KOONDATUD ANDMETE ANALÜÜS

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud parameetrite rakendusvõimalusi teekatendi seisukorra hindamisel Eesti tingimustes. FWD kontroll-mõõtmispunktide 1999-2006 a. mõõtmistulemuste ja muu nende kohta olemasoleva informatsiooni kasutamine analüüsis on piiratud, kuna need punktid esindavad ainult teatud teekatte tüüpe ning nende seisukorda. Analüüs aga peab põhinema laiemal lähteandmete baasil, mistõttu otsustati moodustada analüüsi lähteandmebaas riigimaanteede kattega teedevõrgu baasil. Seisukorra hindamise seisukohalt on olulised defektide, roopasügavuste ja kandevõime andmed. Võrreldavuse tagamiseks on vaja teada vastavate lõikude kattetüüpe, ehitus- ja pindamisaastaid ning liiklussagedusi (koos raskesõidukite osakaaluga). Kõik nimetatud andmed on kogutud Riiklikusse maanteeregistrisse.

Riikliku maanteeregistri eesmärk on arvestuse pidamine riigimaanteede üle ning nende kohta lühi- ja pikaajaliste teehoiukavade koostamiseks vajalike andmete kogumine, töötlemine ja säilitamine (Teeseadus). Käesolevas uurimuses koostati registri põhjal lähteandmebaas tuginedes riigimaanteede põhi- ja tugimaanteede (kattega teedevõrgu) andmetele. 2007 aasta 16. jaanuari seisuga on Eesti põhimaanteede kogupikkuseks 1601 km ja tugimaanteede kogupikkuseks 2391 km, mis teeb kokku 3992 km (Teeregister).

Lähteandmebaasi koondati järgnevad Teeregistri joonandmed põhi- ja tugimaanteedelt:

- defektid (inventeerimisandmed 29 790 lõigult);
- kandevõime (FWD mõõtmistulemused 37 936 lõigult);
- katted (vastavalt katte ehitamise alg- ja lõppaadressidele);
- liiklussagedused (vastavalt Teede Tehnokeskuse loenduspunktide jaotusele);
- pindamised (vastavalt pindamislõikude alg- ja lõppaadressidele);
- roopa sügavus (roopa sügavuse mõõtmistulemused 24 333 lõigult).

Kuna roopamõõtmisi on siiani teostatud vähe ja nendel lõikudel, kus defektid on inventeeritud, võivad roopa sügavuse andmed puududa, siis antud töös peeti otstarbekaks koostada kaks eraldi andmebaasi. Pärast andmete kokkupanekut tee asukoha aadresside alusel jäi defektide põhise andmebaasi suuruseks 28 577 lõiku (~2857 km) ja roopa sügavuse põhisel baasil 20 024 lõiku (~2002 km).

2.1 ANALÜÜSIGRUPPIDE KOOSTAMINE KOORMUSSAGEDUSE ALUSEL

Teekatendi seisukorra ja FWD mõõtmistulemuste vaheliste seoste uurimise eesmärk pikemas perspektiivis on hakata kasutama FWD mõõtmistulemusi rekonstruktsiooni-projektide koostamisel. Kuna katendiarvutuses lähtutakse prognoositavast koormussagedusest tee kasutusaja lõpus, siis on otstarbekas koostada antud töö analüüsigrupid vastavalt koormussageduse väärtustele. Koormussagedus on tee põiklõiget teataval (loendamise, ennustuslikul) ajal läbinud arvutusveokite aasta keskmine hulk ööpäevas (2001-52). Arvutusveokiks loetakse veoautot või bussi, mille rattakoormus on redutseeritud normkoormuse (100 kN üksikule teljele) rattakoormuseks (50 kN paarirattale). Kuigi leitavad koormussagedused on vastavalt hetkeolukorrale (loendusandmed 2006 aastast), on paljud Eesti teed jõudnud oma kasutusaja lõppu või isegi ületanud selle.

Teeregistris on liiklusloenduste andmed antud aasta keskmiste ööpäevaste liiklussagedustena koos kerge- ja raskeveoautode ning autobusside (VA/AB %) ja autorongide (AR %) osaga kogu liiklusest. Kui reeglina teatakse koormussageduse määramisel ka sõiduliikide (VA, AR, AB) eri tüüpide jaotust (väiksed, keskmised, rasked) ja 100 kN teljekoormusele taandamisel saab kasutada vastavaid siirdetegureid, siis siinkohal on teada vaid autorongide (AR) ja teiste raskete sõidukite (VA/AB) osa. "Maanteede projekteerimismõnide" (Metsvahi jt 2005) alusel on AR klassi keskmiseks siirdeteguriks 2,0. VA/AB jaoks taolist ühist keskmist siirdetegurit ei ole. T. Metsvahi (TTÜ Teedeinstituut) eksperthinnangu alusel võiks VA/AB siirdeteguriks üle Eesti võtta alumise piirina 0,8 ja ülemisena 1,1. Seetõttu on antud töös koormussageduse leidmisel VA/AB keskmiseks siirdeteguriks valitud 0,95.

Aasta keskmine ööpäevane koormussagedus Q_a leitakse (Metsvahi jt 2005):

$$Q_a = a' \sum_{j=1}^m Q_j K_j, \quad (2.1)$$

kus m – sõidukitüüpide arv;

Q_j – j tüüpi sõidukite arv ööpäevas mõlemas suunas;

K_j – j tüüpi sõidukite siirdetegur;

a' – rajategur, mis arvestab enamkoormatud sõidurajale langeva koormussageduse osa

Rajategur a' on valitud antud töös üldjuhul 0,55 (kaherajaline üle 6 m laiune tee) ja I klassi tee lõikudel 0,9 (kaherajaline, ühesuunaline).

Analüüsigruppideks jaotamisel lähtuti “Maanteeede projekteerimisnormide” (Metsvahi jt 2005) tabelist 4.14, kus on esitatud katendi vähimad nõutavad elastsusmoodulid ja ennustuslikud koormussagedused. Analüüsigruppide vastavad väärtused on esitatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Analüüsigrupid ja neile vastavad koormussagedused ning vähimad nõutavad elastsusmoodulid

Analüüsigrupp	Koormussagedus, normtelge ööpäevas	Vähim nõutav elastsusmoodul, MPa
1	<30	140
2	30-59	160
3	60-114	180
4	115-224	200
5	225-439	220
6	440-869	240
7	>870	260

2.2 FWD MÕÕTMISTULEMUSTE TAANDAMINE NORMKOORMUSELE JA ARVUTUSLIKULE TEMPERATUURILE

Kuigi koormuse suurus ja langemise kõrgus on igal standardsel mõõtmisel sama, on FWD poolt katte pinnale rakendatav koormus tingimustest sõltuvalt erinev. Tegelikult rakendatud (ja mõõdetud) koormust mõjutavad näiteks katendi jäikus, tee profiili kaldenurk ja koormusplaadi peal olevate kummipuhvrite jäikus. Selleks, et võrrelda FWD-ga mõõdetud erinevaid deformatsioone, tuleb need taandada teatud kindlale koormusele ehk korrutada deformatsioonid läbi surveteguriga ($p_{\text{vajalik}}/p_{\text{mõõdetud}}$). Normkoormuse (50 kN) korral on vajalik kontaktsurve ekvivalent 300 mm plaadil 707 kPa (COST 336).

Bituumensideainega töödeldud kihtide E-moodul on sõltuv temperatuurist. Seetõttu on erinevate temperatuuride juures sama konstruktsiooni puhul mõõdetud läbipainded kattekihi jäikusest sõltuvad. Asfaldikihi temperatuur võib FWD mõõtmiste ajal varieeruda vahemikus +5...+35°C. Seega tuleks deformatsioonid taandada ka arvutuslikule temperatuurile. Kindlasti ei ole temperatuuri mõju kõikide andurite mõõtetulemustele samasugune – ilmselt avaldab temperatuur koormusest kaugemal paiknevate andurite mõõtmistulemustele vähem mõju.

Eestis ei ole FWD mõõtmistulemuste temperatuuriparandustegureid seni leitud. Elastsete katendite projekteerimisjuhendi (2001-52) alusel arvutatakse katend elastsele vajumile temperatuuril +10°C. A. Aavik leidis doktoritöös (Aavik 2003) FWD mõõtmistulemuste alusel arvutatud katendi üldise E-mooduli temperatuuriparandustegurid (K_t) baastemperatuurile (10°C) sõltuvalt bituumensideainega töödeldud kihi tüübist ja keskmisest temperatuurist (T). Käesolevas töös on lihtsustatud lähendusena kasutatud kõikide deformatsioonide taandamiseks arvutustemperatuurile A. Aaviku leitud temperatuuriparandustegureid (tabel 2.2).

Tabel 2.2 Temperatuuriparandustegurid

Katte tüüp	Temperatuuriparandustegur (K_t)
Asfaltbetoon	$K_t = 0,000203 T^2 - 0,014841 T + 1,127603$
Mustkate	$K_t = 0,000205 T^2 - 0,015198 T + 1,135192$

2.3 VAJUMIKAUSI PARAMEETRITE SEOSSED DEFEKTIDEGA

Lähteülesandes püstitatud eesmärk oli uurida vajumikausi parameetrite seoseid teekatte defektidega. Antud töös võeti vaatluse alla teekatte paljudest defektitüüpidest kaks – kitsas pikipragu (pilt 2.1) ja võrkpragu (pilt 2.2). Need on põhilised defektitüübid, mis tekivad katendi või üksikute kihtide puuduliku kandevõime tõttu. Ülejäänud defektitüüpide tekkepõhjusteks on enamasti temperatuurimuutused, ebakvaliteetsed töövõtted või materjalid.



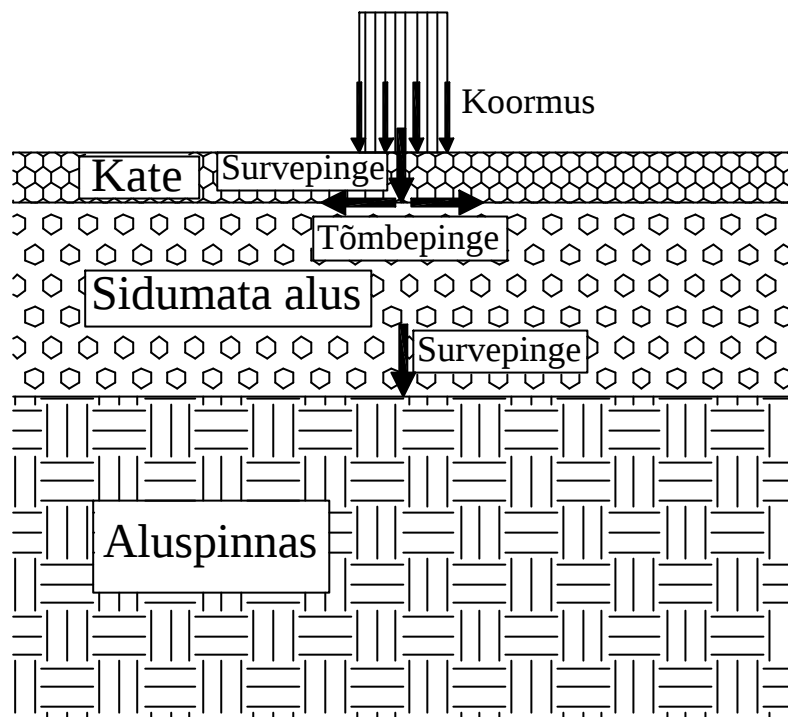
Pilt 2.1 Numbritega 1, 2, 3, 4 ja 5 on tähistatud kitsad pikipraad (2003-43)



Pilt 2.2 Pragude võrgustik e võrkpragu (2003-43)

Igal ületuskorral põhjustab teed koormava veoki ratas katendi vajumise, mis omakorda tekitab seotud kihtide pealispinnal survepinge ja alapinnas tõmbepinge (joonis 2.1) ning sellest põhjustatud tõmbedeformatsiooni. Tõmbedeformatsiooni ülemäärasel kordumisel hakkab seotud kihi alapinnas tekkima pikipragu, mis teatud aja möödudes tungib läbi katte pinnale välja. Defektide arenedes pragude arv kasvab ja kattes tekivad hulknurksed rebendid ehk võrkpraod. Sellist defekti tekkimise protsessi nimetatakse katte väsimiseks. Väsimine tekib seetõttu, et bituumenit

sisaldavatel kattekihtidel on nii elastseid kui viskoosseid omadusi. Suurema läbipainde ja seeläbi katte väsimise põhjuseks on alusekihtide ebapiisav kandevõime, mis väljendub aluse ja aluspinnase kihtide püsivate deformatsioonidena. Sidumata alusekihtide püsivate deformatsioonide põhjustajateks on vertikaalsed survepinged kihtide pealispinnal (joonis 2.1).



Joonis 2.1 Kriitilised pinged kolmekihilises konstruktsioonis

Parema võrdlusmomendi loomiseks võeti kasutusele osalise defektisumma parameeter (ODS), mis iseloomustab arenenud pragude ulatust protsentides sõidutee pindalast 100 m lõigul (valem 2.2). Valem on leitud EPMS-is kasutatava defektisumma (DS) valemi põhjal, kus on esindatud kõik defektitüübid vastavate kordajatega. Parameetri ODS väärtuseks on 100 % näiteks juhul, kui terve lõik kogu tee laiuses oleks kaetud võrkpragudega (750 m²).

$$ODS = \frac{(0,5 \cdot KPIKIPR + 1,0 \cdot VORK) \cdot 100}{SLAI \cdot 100} [\%], \quad (2.2)$$

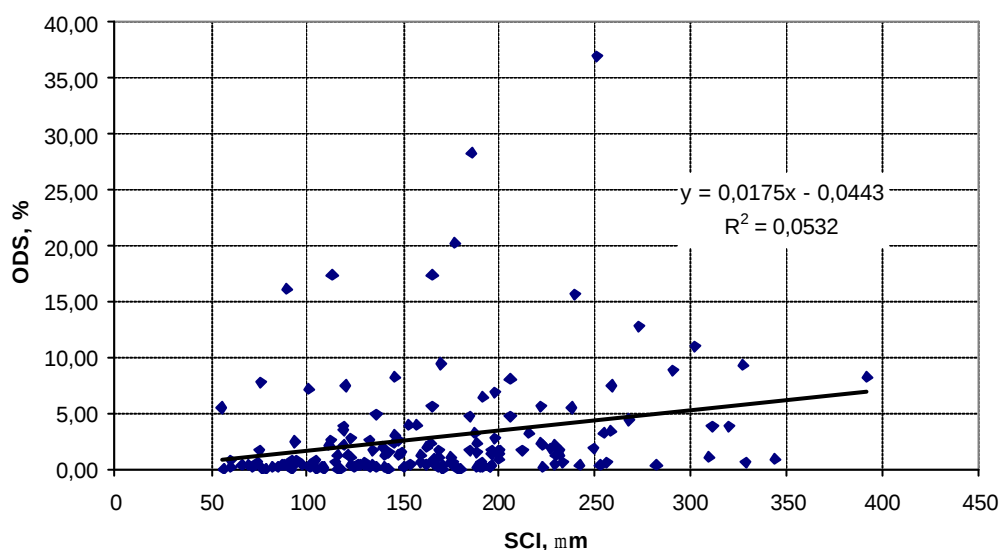
kus *KPIKIPR* – pikipragude pikkus, jm;

VORK – võrkpragude ulatus, m²;

SLAI – sõidutee laius, võetud lihtsustatult kõikidel teedel 7,5 m

Eeldati seoseid vajumikausi parameetrite ja defektide vahel, kuid andmebaasi analüüsi käigus selgus, et selgeid seoseid ei esine ühegi parameetri ega inventeeritud defektide vahel. Esitades ükskõik millise vajumikausi parameetri ja ODS väärtused hajuvusdiagrammil, on selgelt näha, et defekte esineb väga erinevate parameetrite väärtuste korral ja punktide hajuvus on suur. Mõningal juhul on märgata küll parameetrite suurenedes defektide ulatuse laienemist, kuid seose tugevust iseloomustavate determinatsioonikordajate väärtused näitavad põhimõtteliselt seoste puudumist ($R^2 < 0,1$). Järgnevalt on näidetena toodud iseloomulikud graafikud parameetrite võrdluses osalise defektisummaga. Graafikud 2.1–2.3 on koostatud analüüsigrupi 2 (30-59 normtelge/ööp) tiheda asfaltbetoonist kattega teede põhjal. Graafikutel esitatud regressioonijoone võrranditel on ainult illustreeriv tähendus.

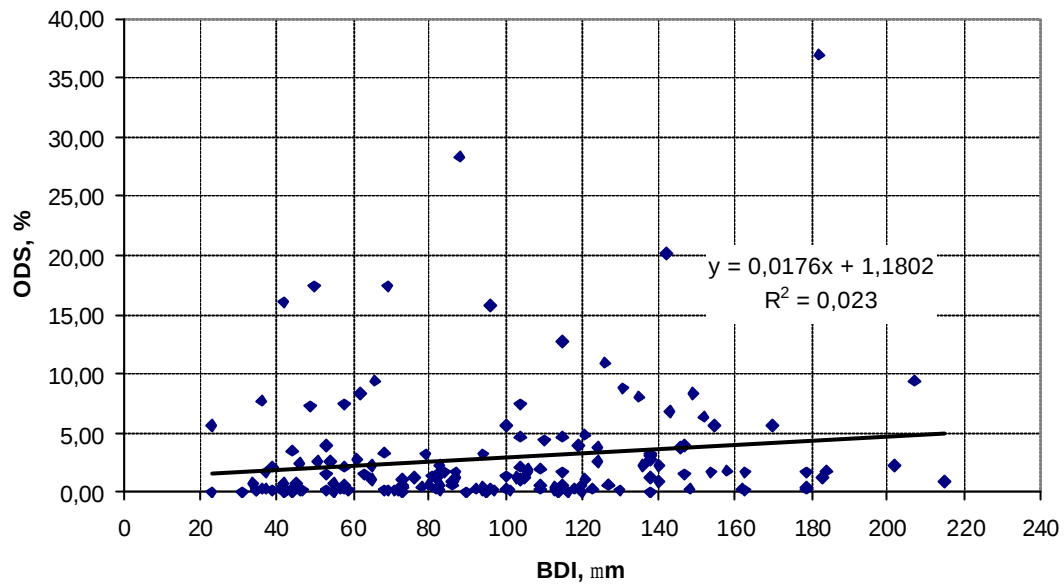
TAB-kate, defektidega, 30-59 normtelge/ööp



Graafik 2.1 SCI väärtused võrdluses osalise defektisummaga (ODS)

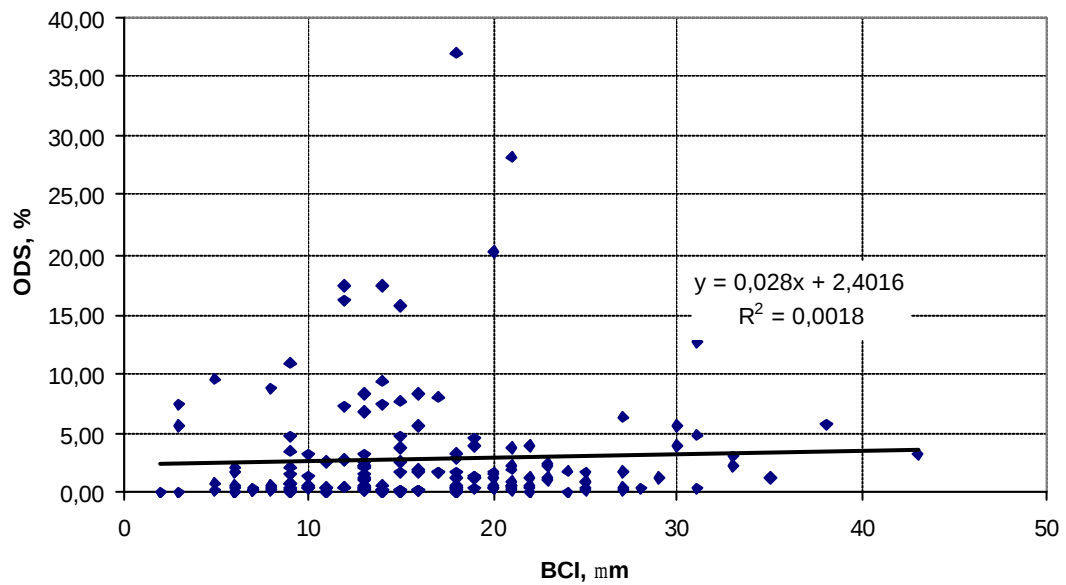
Seoste puudumise (mitteranguse) peamiseks põhjuseks võib pidada seda, et FWD mõõtmised on lokaalsed (ehk mingis punktis) ja kirjeldavad teekatendi tugevust vastaval mõõtmiskohal, defektide andmed on aga inventeeritud 100 m lõikudel ning andmebaasi alusel ei saa kindlalt väita, kus on defektide ulatus suurem. Lisaks võib mõjutada ka see, et defektide inventeerimine ja kandevõime mõõtmine on toimunud valdavalt erinevatel aastatel. Mõningad defektid võivad olla peidetud hiljutiste pindamiste alla. Siiski ei õnnestunud ka värskemaid pindamislõike välja jättes oluliselt tugevamaid seoseid leida.

TAB-kate, defektidega, 30-59 normtelge/ööp



Graafik 2.2 BDI väärtused võrdluses osalise defektisummaga (ODS)

TAB-kate, defektidega, 30-59 normtelge/ööp



Graafik 2.3 BCI väärtused võrdluses osalise defektisummaga (ODS)

2.4 VAJUMIKAUSI PARAMEETRITE SEOS ROOPASÜGAVUSEGA

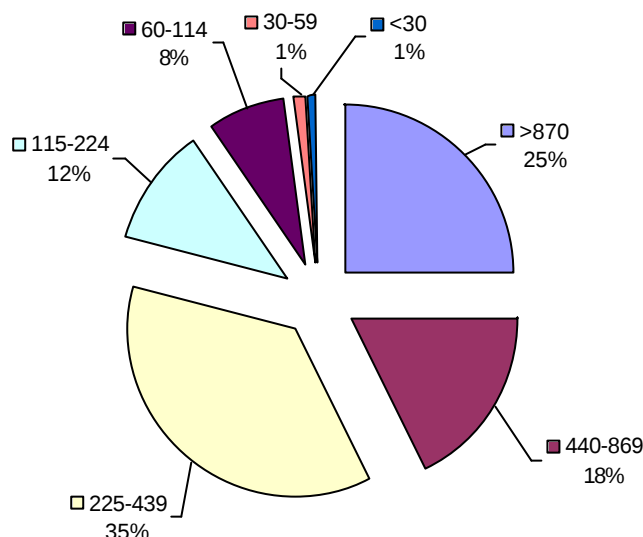
Põiksuunaliste ebatasasuste ehk roobaste tekke peamised põhjused on katte kulumine ning katte, katendi sidumata kihtide ja aluspinnase püsivad deformatsioonid. Katte kulumise peamine põhjus on naastrehvide kasutamine talvetingimustes, mille tulemusena tekivad järskude servadega roopad. Katte kulumine sõltub lisaks liiklussagedusest ja naastrehvide kasutamisest ennekõike ka katte skeleti moodustavast kivimaterjali omadustest (tugevusest). Raskeliiklus tekitab kattes plastilisi deformatsioone ja tihenemist. Liikluskoormuse põhjustatud lõikepinged tekitavad plastilisi deformatsioone, mille tunnuseks on materjali nihkumine külgsuunas. Tihenemine tuleneb raskeliikluse poolt tekitatud järeltihenemisest. Katte püsivate deformatsioonide põhjusteks on bituumeniga seotud kihtide visko-elastsus, mille tulemusena osa koormuste tekitatud deformatsioonidest jääb püsivateks.

Katte püsivate deformatsioonide suurus sõltub välistest koormus- ja tingimusfaktoritest (koormussagedus, koormuse suurus, koormuskestus, koormuste jagunemine tee ristlõikes ja katte temperatuur) ning katte jäikust mõjutavatest omadustest. Teepinnal nähtavates roobastes väljenduvad lisaks kattes tekkivatele roobastele ka katendi sidumata kihtides ja aluspinnases tekkivad deformatsioonid. Katendi sidumata materjal püüab sõidujälgede kohal liikluskoormuse all nihkuda allapoole, lükates kõrvale kõrvalasetseva materjali. Kõrvalasetsev materjal nihkub kõrvale ja ülespoole, kus vastusurve on kõige väiksem. Kattealuse konstruktsiooni püsivad deformatsioonid on sõidujälgede kohal toimuva sidumata materjali vajumise ja sõidujälgede vahel toimuva kerkimise tulemus.

Roopasügavuse mõõtmisi teostatakse Eesti teedel kaks korda aastas: kevadel ja sügisel. Kevadine roopasügavus on tavaliselt väiksem, sest autode sõidutrajektoor on talvel teistsugune kui suvel ja naastrehvidega kulutatakse sõidujälgede vahelist harja madalamaks. Samas võib esineda ka vastupidiseid juhuseid, kus talvel kulutati roopad hoopis sügavamaks. Selleks, et vähendada naastrehvide mõju roopasügavusele ja vaadelda paremini tekkinud püsivaid deformatsioone, valiti seoste analüüsimiseks sügisel mõõdetud roopasügavused. Lõikudel, kus sügisesed andmed puudusid, võeti andmetehulga suurendamise eesmärgil kevadine roopasügavus. Roopasügavusi

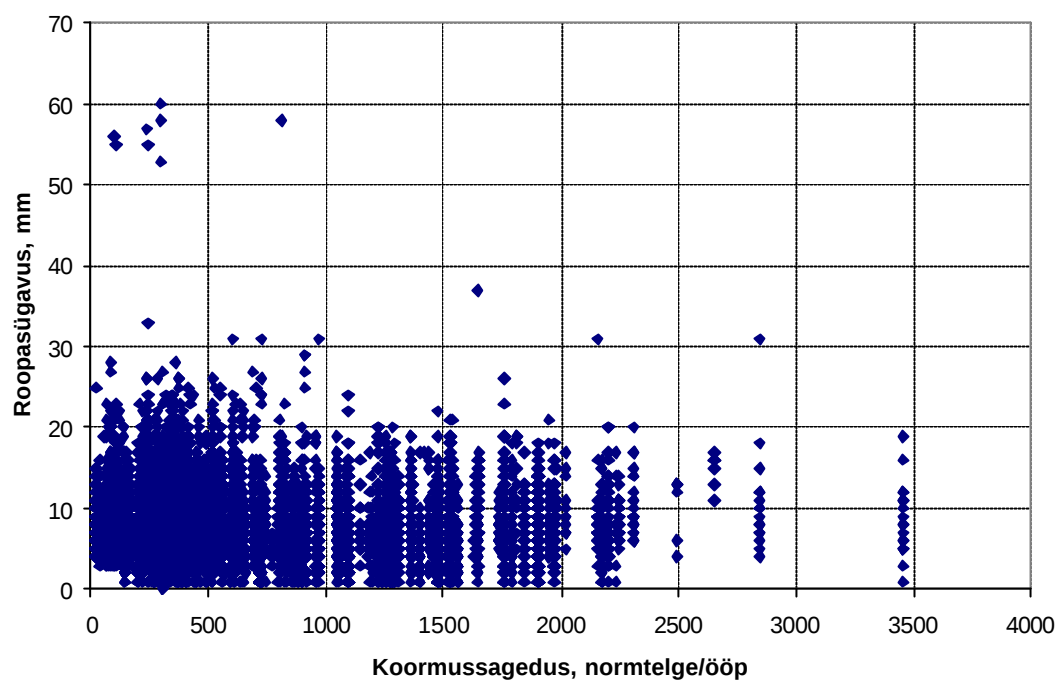
mõõdetakse kõikidel sõiduradadel mõlemast sõidujäljest. Siin ja edaspidi mõistetakse “roopasügavuse” all parempoolse sõiduraja parema rattajälje roopasügavust.

Nagu näha graafikult 2.4 on roopasügavuse mõõtmisi seni teostatud enamasti suurema koormussagedusega (liiklussagedusega) maanteedel. 90 % mõõtmistest on teostatud teedel, kus koormussagedus on suurem kui 115 normtelge ööpäevas.

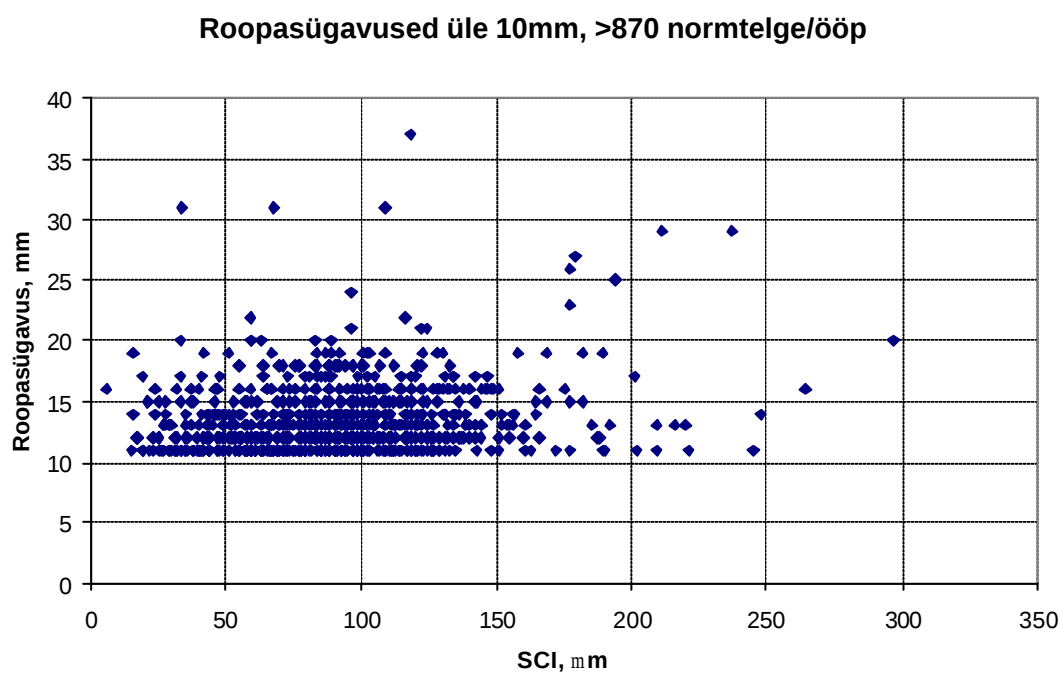


Graafik 2.4 Roopasügavuse põhise andmebaasi jaotus koormussageduse alusel

Graafikult 2.5 on näha, et andmebaasis sisalduvad roopasügavused jäävad valdavalt alla 20 mm, mis vastavalt kehtestatud roopasügavuste piirväärtustele tähendab vähemalt rahuldavat tee seisukorda. Pidades silmas roobaste tekkimise protsesse, eeldati seoseid vajumikausi parameetrite, kui katendi põhimõtteliste kihtide seisukorda iseloomustavate näitajate, ja roopasügavuse vahel. Graafikul 2.6 on esitatud 7. analüüsigrupi SCI väärtused üle 10 mm roopasügavuste korral. Selgelt on näha, et sarnaseid roopasügavusi esineb väga erinevate SCI väärtuste korral. Seega ei ole seoste otsimine millimeetri täpsusega esitatud roopasügavuste ja vajumikausi parameetrite vahel otstarbekas. Seoste määramist raskendab ka asjaolu, et roopasügavused on antud 100 m lõikude keskmistena, aga vajumikausi parameetrid esindavad katendi seisukorda mingis kindlas punktis.



Graafik 2.5 Roopasügavuste jagunemine koormussageduse alusel



Graafik 2.6 SCI väärtused roopasügavustel üle 10 mm, analüüsigrupp 7

2.5 VAJUMIKAUSI PARAMEETRITE SEOSSED KATENDI ÜLDISE ELASTSUSMOODULIGA

2.5.1 Katendi üldise elastsusmooduli arvutamine

Üldtunnustatud valem katendi üldise elastsusmooduli leidmiseks koormusplaadi keskmes mõõdetud vajumi alusel põhineb Boussinesq' võrranditel ja on esitatav kujul (COST 336; Ullidtz 1998; Craig 2004):

$$E_0 = \frac{2 \cdot (1 - n^2) \cdot s_0 \cdot a}{d_0}, \quad (2.3)$$

- kus E_0 – üldine E-moodul koormusplaadi keskmes, MPa;
 n – Poisson' tegur;
 s_0 – kontaktsurve koormusplaadi all, kPa;
 a – koormusplaadi raadius, mm;
 d_0 – vajum koormusplaadi keskmes, μm

Endise Nõukogude Liidu katendite dimensioneerimisjuhendi VSN 46-83 järgi, millel põhineb praegune “Elastsete teekatendite projekteerimise juhend” (2001-52), esitatakse üldise E-mooduli arvutamise valem järgmisel kujul (Aavik 2003):

$$E_{eq} = \frac{0,25p \cdot (1 - n^2) \cdot F \cdot S}{d_0}, \quad (2.4)$$

- kus E_{eq} – üldine E-moodul koormusplaadi keskmes, MPa;
 n – Poisson' tegur;
 F – kontaktsurve koormusplaadi all, kPa;
 S – koormusplaadi diameeter, mm;
 d_0 – vajum koormusplaadi keskmes, μm

Asendades valemis 2.4 koormusplaadi diameetri S kahekordse raadiusega $2a$, saame üldise E-mooduli arvutamise valemi kujul:

$$E_0 = \frac{0,5p \cdot (1 - n^2) \cdot F \cdot a}{d_0}, \quad (2.5)$$

Nagu näha, VSN 46-83 metoodikas on vähendatud koormusplaadi kuju arvestavat tegurit (2) 0,5p väärtusele (1,57).

A. Aavik leidis (Aavik 2003), et FWD mõõtmistulemuste alusel katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks Eesti teekatendite hoiu süsteemis (EPMS) sobib Cobb-Douglas' võrrandi alusel tuletatud valem:

$$E_{eq2001-52} = C \cdot E_{eq}^e \cdot T^t \cdot R^r \cdot M_i \cdot H_j, \quad (2.6)$$

kus E_{eq} – üldine E-moodul koormusplaadi keskmises, arvutatud valemiga 2.4;

T – bituumensideainega töödeldud kihi keskmine temperatuur FWD mõõtmise ajal, °C;

R – 30 päeva summaarne sademete hulk enne FWDga mõõtmist, mm;

M_i – tegur, mis arvestab konkreetset kuud, millal toimus FWDga mõõtmine ($i = 4, \dots, 10$, aprill – oktoober);

H_j – tegur, mis võtab arvesse mulde kõrguse FWD mõõtmispunktis ($j = <0,5 \text{ m}; 0,5 \dots 1,0 \text{ m}; >1,0 \text{ m}$);

C, e, t, r – empiirilised konstandid

Kuna teedevõrgu tasandil tehtud mõõtmiste korral pole teada mulde kõrgust ega sademete hulka igas mõõtmispunktis, siis taandub valem järgmisele kujule:

$$E_{eq2001-52} = C \cdot E_{eq}^e \cdot T^t \cdot M_i, \quad (2.7)$$

mille puhul empiiriliste konstantide väärtused on järgmised:

$e = 0,793$; $t = 0,098$; $C = 2,039$

ja kuutegurite väärtused on vastavalt tabelile 2.3.

Nimetatud teadaolevate katendi üldist E-moodulit mõjutavate tegurite korral annab valem 2.7 2001-52 meetodika alusel arvutatud E-moodulitega võrreldes determinatsioonikordaja R^2 väärtuseks 0,574.

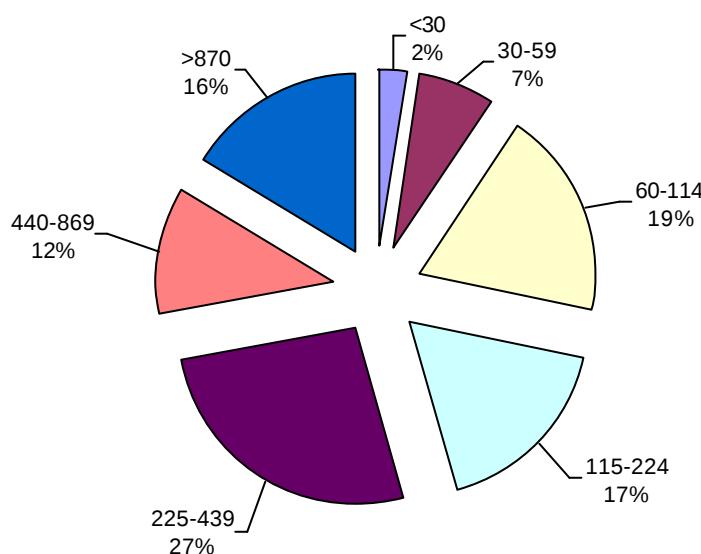
Tabel 2.3 M_i väärtused, mis arvestavad kuud, millal toimus FWD mõõtmine

M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
1,000	0,911	0,830	0,816	0,831	0,825	0,817

Edasises analüüsis käsitletud katendi üldised E-moodulid $E_{\text{üld}}$ on arvutatud valemi 2.7 alusel.

2.5.2 Seosed parameetrite ja üldise elastsusmooduli vahel

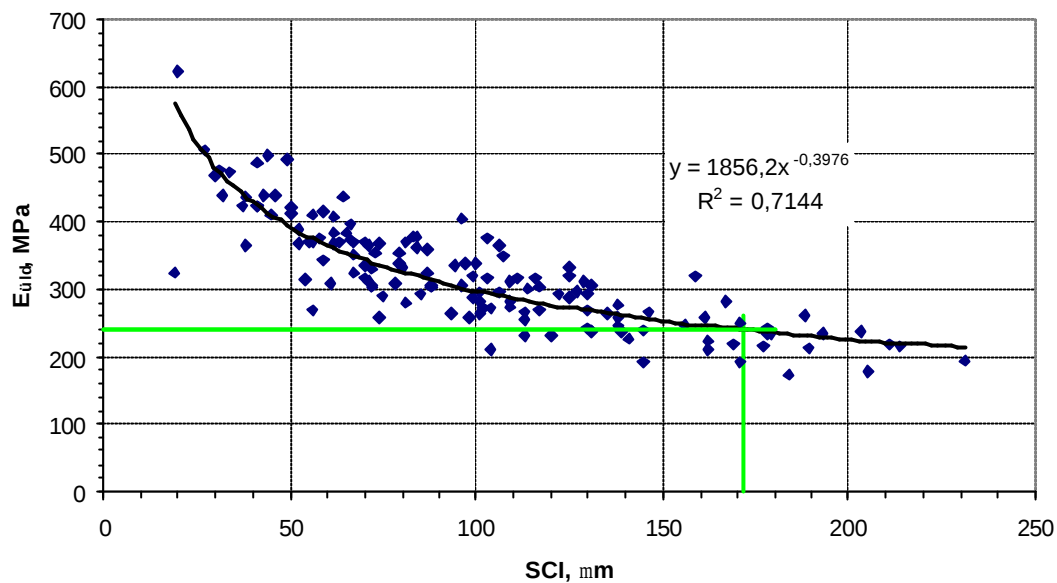
Uuriti vajumikausi parameetrite ja FWD esimese läbivajumisanduri d_0 alusel arvutatud katendi üldise elastsusmooduli vahelisi seoseid. Analüüsigrupid moodustati defektide põhise andmebaasi põhjal. Seega oli uurimisse haaratud ligikaudu 2850 km Eesti põhi- ja tugimaanteid. Inventeerimistulemuste alusel esinesid defektid 43 % katetest ehk 1225 kilomeetril (12 250 lõigul). Kõikides analüüsigruppides vaadeldi erinevaid katteliike eraldi. Suurema koormussagedusega gruppides eristati tihedast asfaltbetoonist katetel teeregistrisse kantud ehitamismeetodite põhjal ka erinevaid aluse tüüpe. Graafikul 2.7 on esitatud analüüsis kasutatud andmebaasi jaotus koormussageduse alusel. Tuleb tõdeda, et suure koormussagedusega maanteede osakaal on üsna suur. 16 % ehk ligikaudu 450 km andmebaasi kaasatud maanteedel on hetke koormussagedus üle 870 normtelje ööpäevas. Selliste koormussageduste juures peab vajalik katendi üldine E-moodul olema vähemalt 260 MPa.



Graafik 2.7 Defektide põhise andmebaasi jaotus koormussageduse alusel

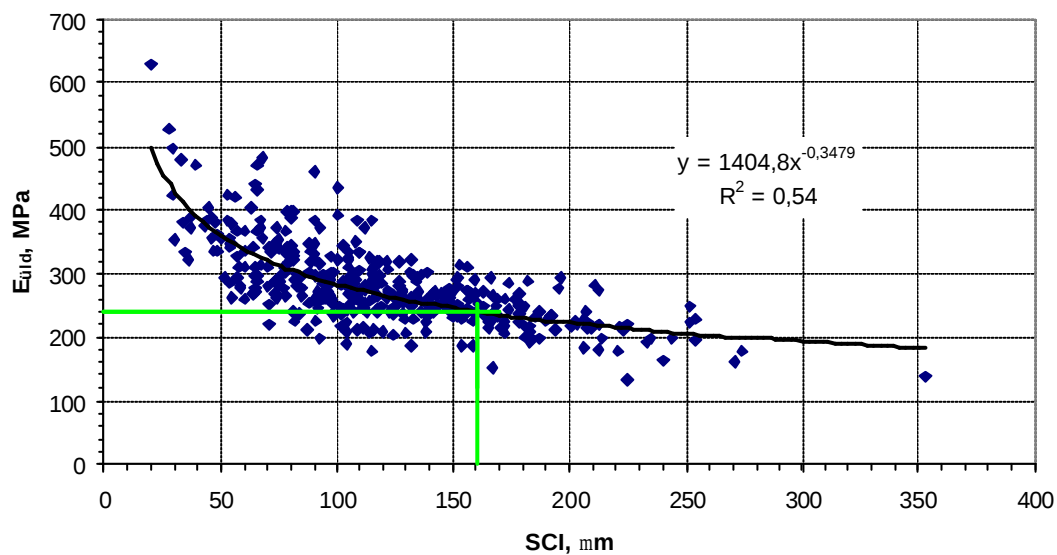
Seoste uurimisel vaadeldi defektidega ja defektideta katteid eraldi, et selgitada, kas kahjustunud katendite E-moodulid ja vajumikausi parameetrid erinevad pragunemata katetega teede vastavatest näitajatest. Tunnuste omavahelistest sõltuvustest visuaalse ülevaate saamiseks paigutati nad MS Excel'i keskkonnas hajuvusdiagrammile ja lisati sobivad regressioonijooned. Uurimuse käigus koostatud graafikud ja leitud seoseid kirjeldavad matemaatilised võrrandid on esitatud lisades (Lisad A ...G). Siinkohal on ära toodud iseloomulikumat graafikud.

TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



Graafik 2.8 $SCI - E_{uld}$, TAB-kate olemasolevale kattele, 440-869 normtelge/ööp, defekte ei esinenud

TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



Graafik 2.9 $SCI - E_{uld}$, TAB-kate olemasolevale kattele, 440-869 normtelge/ööp, defektid esinesid

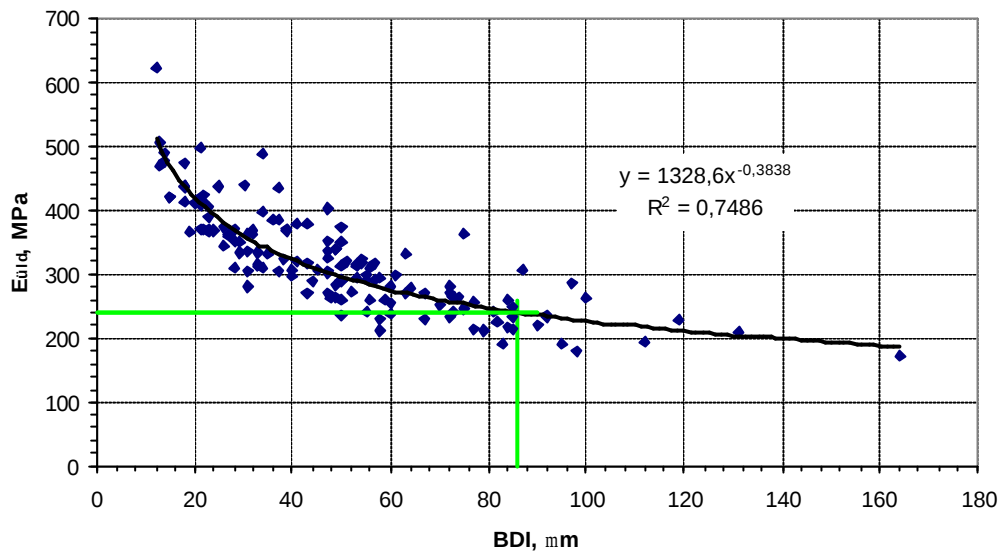
Hajuvusdiagrammide kujutamisel paigutati mõõtmistulemuste taandatud väärtustest arvutatud vajumikausi parameetrid (SCI, BDI, BCI) abstsisssteljele ja valemiga 2.7 arvutatud katendi üldised E-moodulid ($E_{\text{üld}}$) ordinaatteljele. Graafikutelt 2.8 ja 2.9 on näha, et sellisel viisil tunnuste vahelise seose kirjeldamiseks regressioonijoonega sobib kõige paremini astmefunktsioon kujul $y = a_0 x^{a_1}$. MS Excel leiab parameetrid a_0 ja a_1 vähimruutude meetodil. Vaid mõnedel juhtudel kasutati lineaarset regressioonijoont, kui seost ei õnnestunud punktide suure hajuvuse tõttu astmefunktsiooniga kirjeldada.

Selgub, et vajumikausi parameetrite ja $E_{\text{üld}}$ vahelised seosed on üsna tugevad. Seosed SCI – $E_{\text{üld}}$ ja BDI – $E_{\text{üld}}$ on kirjeldatavad matemaatiliste funktsioonidega, mis annavad determinatsioonikordaja väärtusi 0,5...0,9. BCI – $E_{\text{üld}}$ vaheliste seoste korral jäävad R^2 väärtused tavaliselt alla 0,5. See näitab seda, et andmebaasi moodustanud teedel esineb sarnaste E-moodulite väärtuste juures väga erinevaid aluspinnase seisukorda kirjeldava parameetri BCI väärtusi. Samas on katendikihtide seisukorda kirjeldavate parameetrite SCI ja BDI erinevate väärtuste juures katendi üldised E-moodulid küllaltki sarnaselt jaotunud. Sellest võib järeldada, et Eesti teedel on erinevate aluspinnaste puhul katendi üldised tugevused tagatud kui nõrga aluspinnase peal asetsevad tugevad katendikihid. Kui aga katendikihid on jäänud nõrgaks, siis on ka terve konstruktsiooni kandevõime nõrk. Võrreldes analüüsigrupile vastava katendi vähima E-mooduli taustal erinevaid parameetreid kirjeldavaid graafikuid, võib määrata, millistes kihtides puudujäägid esinevad.

Vaadates graafikuid 2.8 ja 2.9, kus on esitatud SCI – $E_{\text{üld}}$ seosed defektideta ja defektidega katete puhul, on näha, et defektidega teedel esineb rohkem väiksemaid $E_{\text{üld}}$ ja samuti ka suuremaid SCI väärtusi. Tõmmates graafikule horisontaalse sirge vähima vajaliku E-mooduli kõrguselt (vastaval grupil 240 MPa) lõikab see regressioonijoont punktis, millele vastab defektideta katte puhul SCI väärtus 172 μm ja defektidega kattel 161 μm . Samad väärtused on leitavad ka regressioonijoonte võrranditega. Kuigi väiksem parameetri väärtus peaks tähendama kattekihi paremat seisukorda, tuleb olukorda mõista nii, et defektidega katte korral on katendi üldised E-moodulid väiksemad, mistõttu asetseb regressioonijoon madalamal ja vajalikule E-moodulile vastab seega väiksem SCI väärtus.

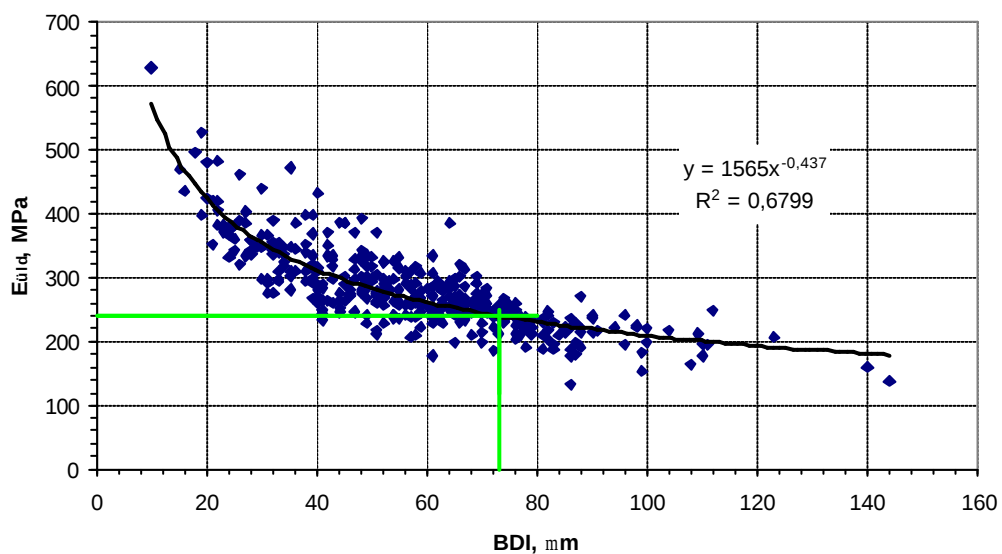
Analüüsid graafikuid 2.8 ja 2.9 edasi, võib arvata, et graafikutel kujutatud horisontaalsirgest alla ja vertikaalsirgest vasakule jäävate punktide puhul on väike katendi E-moodul tingitud aluse või aluspinnase nõrgast kandevõimest, kuna SCI väärtused väga suured ei ole.

TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



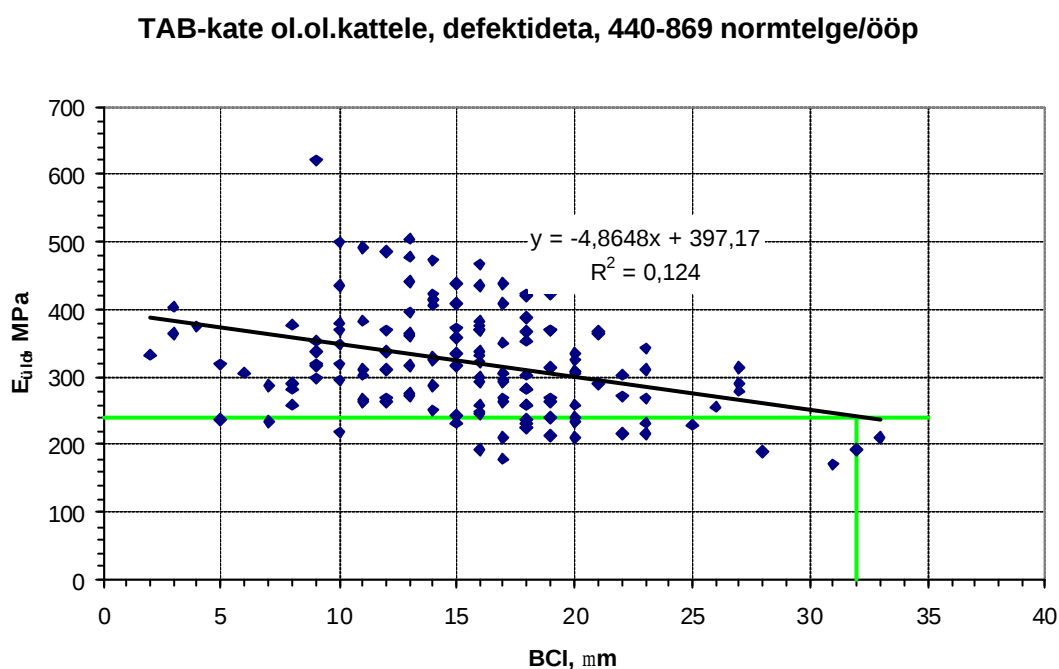
Graafik 2.10 BDI – E_{üld}, TAB-kate ol.ol.kattele, 440-869 normtelge/ööp, defektideta

TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



Graafik 2.11 BDI – E_{üld}, TAB-kate ol.ol.kattele, 440-869 normtelge/ööp, defektidega

Vastavalt regressioonijoonte võrranditele leiti ka graafikutelt 2.10 ja 2.11 vähimale nõutavale E-moodulile vastavad parameetrite (BDI) väärtused. Jällegi on defektideta katetel parameetri väärtus suurem kui defektidega katetel, vastavalt 86 μm ja 73 μm . Siinkohal tuleb öelda, et mitte kõikide katteliikide ja erinevate parameetrite korral polnud defektidega katetel vastavad parameetrid väiksemad. Lõikudel, kus esinevad defektid, ei pruugi katendi üldised E-moodulid olla väiksemad, kuna üldine E-moodul ei ole parim näitaja defektide tekke kirjeldamiseks.

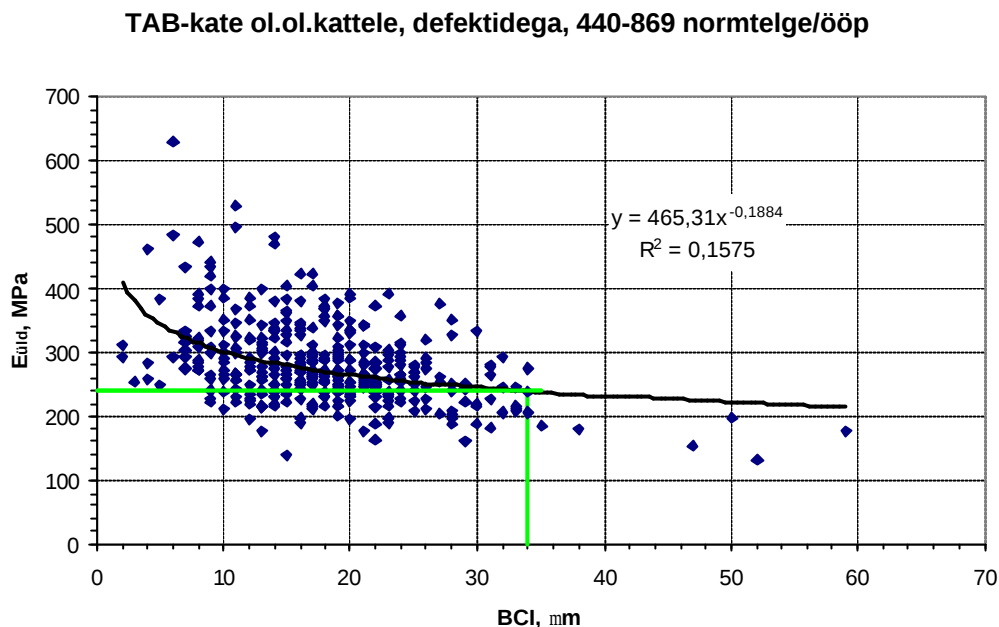


Graafik 2.12 BCI – E_{üld}, TAB-kate ol.ol.kattele, 440-869 normtelge/ööp, defektideta

Graafikul 2.12 on näha olukord, kus BCI – E_{üld} seose kirjeldamiseks ei sobinud astmefunktsioon ja tuli kasutada sirge võrrandit. Kuna punktide hajuvus on üsna suur, siis ka R^2 väärtus tuleb väike (0,124). Graafikute 2.12 ja 2.13 järgi leitud BCI väärtused on vastavalt 32 μm ja 34 μm . Seekord tuleneb defektidega katte BCI suurem väärtus kasutatud regressioonijoonte erinevast iseloomust.

Võrreldes omavahel graafikuid 2.9, 2.11 ja 2.13 selgub, et mõnedel juhtudel on katendi nõrk kandevõime tingitud kõikide üksikute kihtide väiksest kandevõimest. Nende punktide kohta, mis on graafikul 2.13 leitud BCI väärtusest ja vajalikust vähimast E-moodulist väiksema väärtusega, võib eeldada, et puudulik kandevõime on tingitud ülemiste kihtide madalatest E-moodulitest. Seda kinnitab ka fakt, et graafikul

2.13 leitud BCI piirväärtusest suuremate punkte tunduvalt vähem võrreldes graafikul 2.11 leitud BDI piirväärtusest suurematega,. Seetõttu võib öelda, et vaadeldud lõikude hulgas on aluse kihtides rohkem probleeme kui aluspinnastes.



Graafik 2.13 BCI – $E_{\text{üld}}$, TAB-kate ol.ol.kattele, 440-869 normtelge/ööp, defektideta

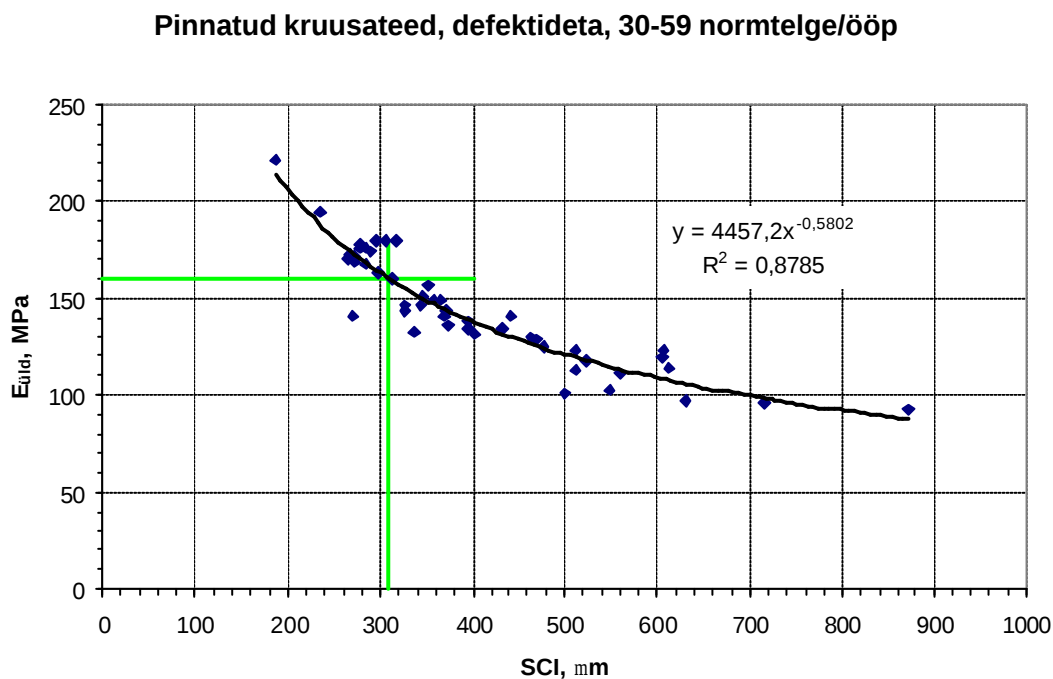
Kõikide analüüsigruppide vajumikausi parameetrite ja $E_{\text{üld}}$ seoseid kirjeldavate regressioonivõrrandite järgi arvutati vajalikule E-moodulile vastavad SCI, BDI ja BCI väärtused. Saadud tulemused on esitatud tabelis 2.3 koormussageduste ja katteliikide alusel. Tabelis on toodud iga koormussageduse vahemiku juures kaks parameetri väärtust – defektidega ja defektideta katetele. Seejuures on tähistatud kõrvuti asetsevatest parameetritest suurem oranži ja väiksem kollast värvi lahtriga. BCI – $E_{\text{üld}}$ graafikutel olid punktid tihti nii hajuvad, et neid kirjeldav regressioonijoon tuli väga lauge ning seetõttu tuli vajalikule E-moodulile vastav BCI väärtus ebaloomulikult suur. Selliste väärtuste lahtrid on tähistatud punase taustaga. Tabelist selgub, et mõningate eranditega parameetrite väärtused vähenevad koormussageduse e vajaliku E-mooduli suurenemise suunas. Viimatinimetatu konstateerib fakti, et suurema kandevõimega katendi läbipainded koormuse all on väiksemad. Tabeli põhjal koostati graafikud, mis on toodud järgmises peatükis (ptk 3).

Tabel 2.3 Koormussageduse alusel määratud vajalikule E-mooduli väärtusele vastavad vajumikausi parameetrite väärtused

Katteliik (ja aluse tüüp)	Vajumi- kausi para- meeter	Koormussagedus, normtelge/ööp													
		<30		30-59		60-114		115-224		225-439		440-869		>870	
		Defektide inventeerimistulemuste alusel defektid (kitsas pikipragu ja võrkpragu) esinevad või ei													
		jah	ei	jah	ei	jah	ei	jah	ei	jah	ei	jah	ei	jah	ei
TAB olemasolevale kattele	SCI	394	409	279	310	227	281	273	300	213	237	161	172	115	117
	BDI	200	225	176	177	137	145	158	194	112	105	73	86	55	94
	BCI	57	73	45	47	61	28	119	-	35	38	34	32	19	27
TAB tasandusfreesimisele	SCI							249	333			200	180		130
	BDI							154	172			93	71		69
	BCI							25	39			15	16		35
TAB tasanduskihiga	SCI					334	346	250	222			138	154	115	161
	BDI					123	133	125	163			67	138	70	106
	BCI					76	346	38	30			33	37	30	35
TAB bituumenstabiliseeritud alusega	SCI					253	249	286	277	174	216	244	217	168	162
	BDI					172	159	143	118	88	108	132	93	110	104
	BCI					111	37	-	44	19	26	22	46	25	29
TAB tuhkstabiliseeritud alusega	SCI							189	192	158	171			139	123
	BDI							128	134	69	81			101	92
	BCI							-	117	44	46			135	59
TAB kompleksstabiliseeritud alusega	SCI					241	277	214	177	240	213	137	103	171	144
	BDI					155	161	125	126	143	119	112	103	93	94
	BCI					30	70	37	31	81	75	61	43	28	27
TAB killustikalusega	SCI					280	255	251	221	200	192	208	186	156	144
	BDI					125	118	163	130	97	128	174	108	85	82
	BCI					81	45	58	47	88	32	57	38	35	26
PAB	SCI					201	368	187		124	120				
	BDI					145	169	136		64	61				
	BCI					32	55	104		20	25				
KAB	SCI					233	278	244	258						
	BDI					153	173	147	131						
	BCI					30	77	30	24						
Mustkate	SCI	416	393	318	338	252	276	205	236	191	205	157	176	171	151
	BDI	215	193	195	203	142	161	117	135	113	109	85	87	68	64
	BCI	74	40	47	39	28	30	21	27	24	21	18	20	38	-
(Põlevkivi)tuhkbetoonkate	SCI	211	324	298	306	286	227	230	230						
	BDI	194	210	110	116	127	113	105	92						
	BCI	58	130	39	32	59	60	28	28						
Pinnatud kruusatee	SCI	395	398		309	365	335	301	284						
	BDI	221	229		164	99	95	86	88						
	BCI	25	26		-	15	14	13	14						

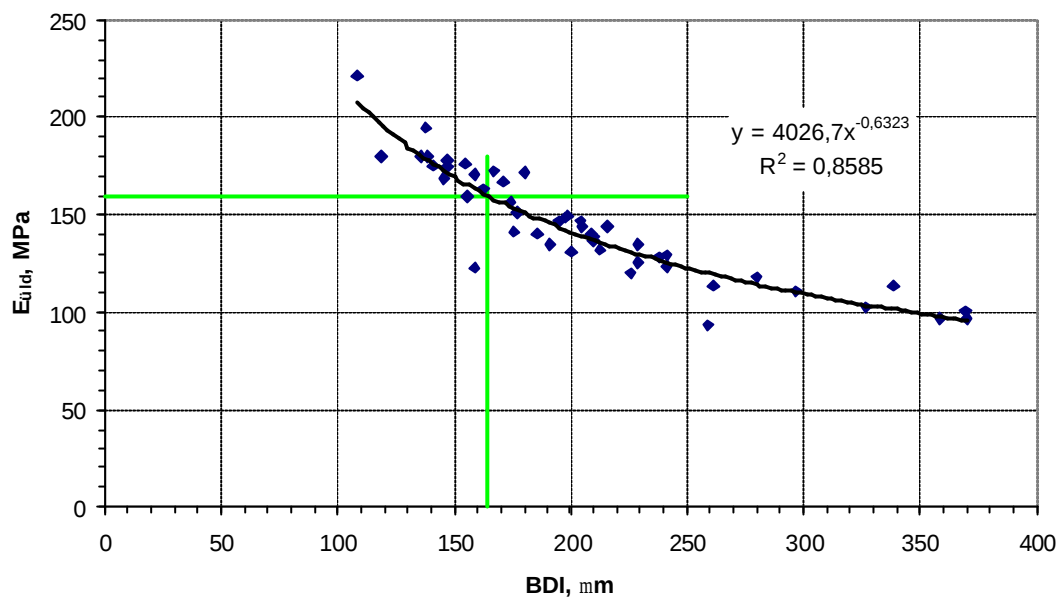
2.5.3 Seoste uurimise käigus ilmnenu tähelepanekuid

Üldiselt hakkas silma, et vajalikust E-moodulist suuremaid väärtusi esineb märgatavalt rohkem kui väiksemaid. Siinkohal on ära toodud üks erand. Analüüsigruppi 2 kuulus 2004 a. pinnatud kruusatee (T-77, Kuressaare – Sääre), kus FWD mõõtmised olid teostatud 2005 a. mai kuus. 2006 a. liiklusloenduste tulemuste põhjal on seal aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus 610 autot/ööp. VA/AB osakaal kogu liiklusest on 6% ja AR osakaal 5%, mis teeb keskmiseks koormusageduseks 53 normtelge/ööp. Sellisele koormusele vajalik minimaalne E-moodul on 178 MPa. Defekte küll ei ole ilmnenu, kuid mõõdetud E-moodulid on madalad. Graafikutelt 2.14...2.16 on näha, et antud analüüsigrupi vähimast vajalikust moodulist (160 MPa) väiksemaid väärtuseid on rohkem kui suuremaid ja arvutatud vajumikausi parameetrid on samuti üsna suured. BCI väärtused on nii hajuvad, et regressioonijoont lisada pole mõtet. Samas esineb BCI väärtuste hulgas vähem suuremaid väärtusi (näiteks üle 25 μm) kui SCI ja BDI hulgas üle määratud piirväärtuste. Antud graafikute taustal paistavad nõrgad just katendi ülemised kihid.



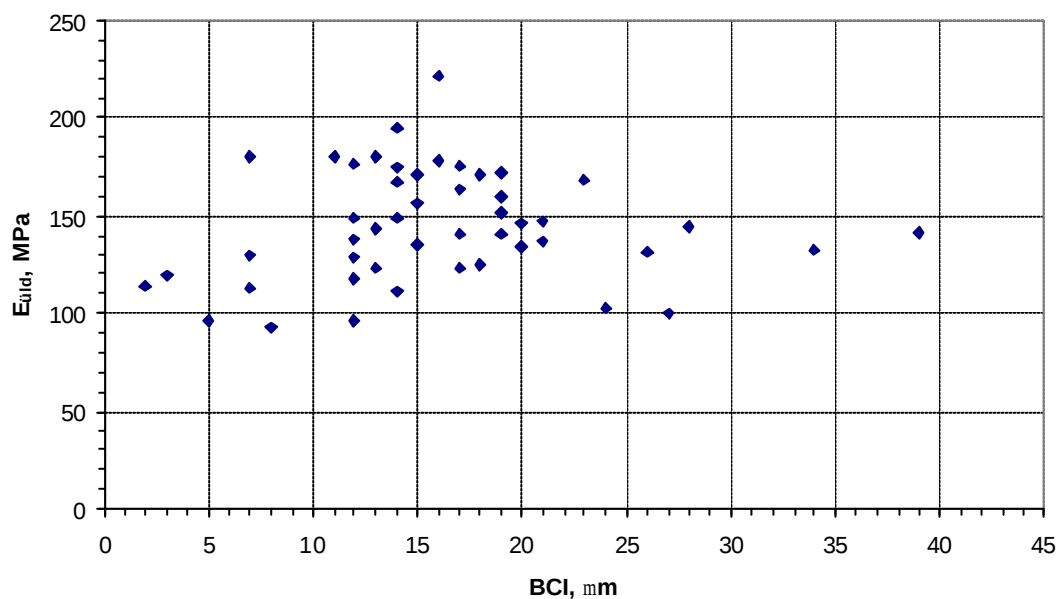
Graafik 2.14 SCI – $E_{\text{üld}}$, 2004 a. pinnatud kate (T-77), defekte ei ole ilmnenu

Pinnatud kruusateed, defektideta, 30-59 normtelge/ööp



Graafik 2.15 BDI – $E_{\text{üld}}$, 2004 a. pinnatud kate (T-77), defekte ei ole ilmnenud

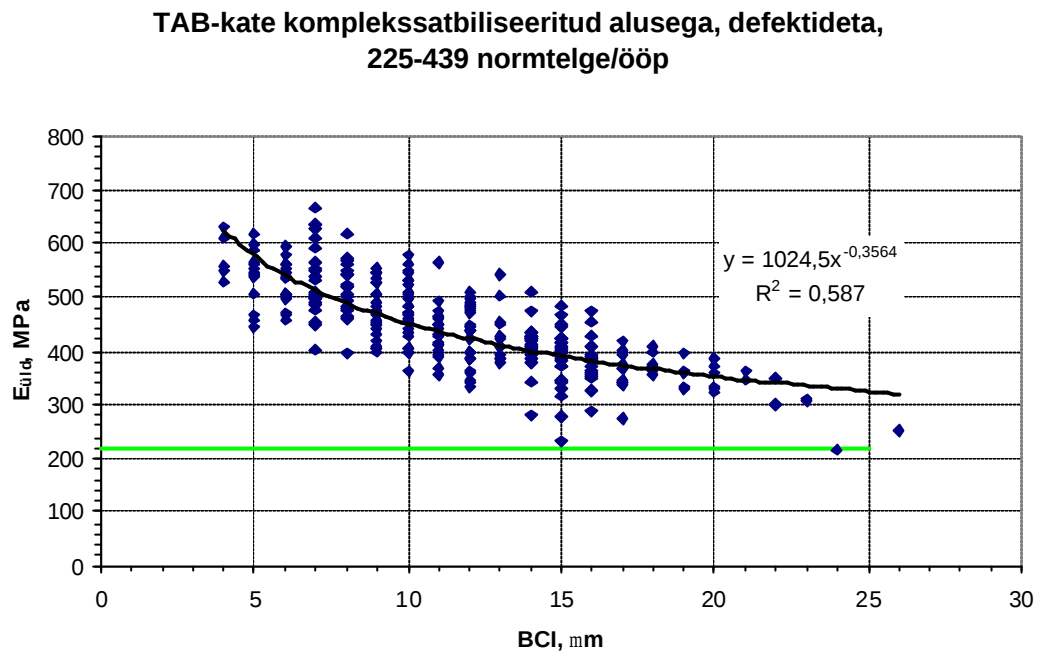
Pinnatud kruusateed, defektideta, 30-59 normtelge/ööp



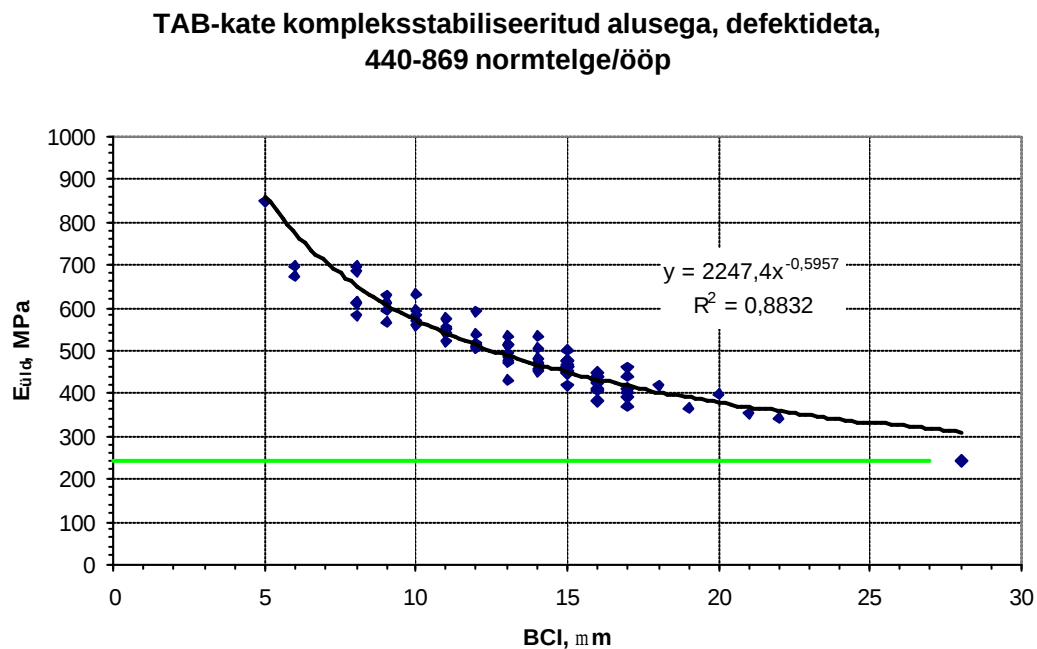
Graafik 2.16 SCI – $E_{\text{üld}}$, 2004 a. pinnatud kate (T-77), defekte ei ole ilmnenud

Kui üldiselt olid BCI – $E_{\text{üld}}$ seost kirjeldavate võrrandite determinatsioonikordajate R^2 väärtused alla 0,5 ja suures osas alla 0,3, siis kompleksstabiliseeritud alustega katenditel oli punktide jaotus diagrammil ühtlasem ja R^2 väärtused 0,55...0,88. Järgnevatel graafikutel 2.17 ja 2.18 on toodud kaks näidet. Tegemist on 2002, 2004 ja

2005 a. uue katendi saanud lõikudega Tallinn – Narva, Tallinn – Tartu ja Risti – Virtsu maanteedelt. Kuna need teed on alles hiljuti projekteeritud, siis on arvestatud suurema koormussagedusega kasutusaja lõpus kui see hetkel on. Hoolimata sellest on näha, et korralik alusekihtide ehitamine mõjutab BCI ja $E_{\text{üld}}$ sõltuvust tugevalt.



Graafik 2.17 BCI – $E_{\text{üld}}$, kompleksstabiliseeritud alusega, defekte ei ole ilmnenud



Graafik 2.18 BCI – $E_{\text{üld}}$, kompleksstabiliseeritud alusega, defekte ei ole ilmnenud

3 VAJUMIKAUSI PARAMEETRITE PIIRVÄÄRTUSED

3.1 EELNEVATES TÖÖDES VÄLJAPAKUTUD PIIRVÄÄRTUSED

P. Paabo uuris magistritöös (Paabo 2006) FWD kontrollmõõtepunktide (26 tk) mõõteandmete põhjal vajumikausi parameetrite seoseid katendi üldise E-mooduliga erinevates niiskuspaiikkondades ja eri katteliikide puhul. Kuna tulemuste kirjeldamiseks kasutati matemaatilise mudelina teist järku polünoomi või sirget, siis ei ole need teatud piiridest küllalt usaldusväärsed. Lõpuks esitati mõlema grupi kokkuvõttena $E_{\text{üld}}$ arvutamiseks järgmised matemaatilised võrrandid (valiti suurema R^2 väärtusega seosed):

katteliigist lähtuvalt

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

niiskuspaiikkonnast lähtuvalt

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

niiskuspaiikkonnast lähtuvalt

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

BCI – $E_{\text{üld}}$ hajuvusdiagrammil punktide silumiseks kasutatud kumer polünoom (valem 3.3) on loogika vastane, sest käesolev töö on näidanud, et seoste esitamiseks matemaatilisel kujul sobivad kõige paremini astmefunktsioonid, mis on olemuselt nõgusad. Teised seosed (valem 3.1 ja 3.2) esitati küll nõgusate teist järku polünoomidena, kuid funktsiooni omadustest tulenevalt peavad argumenttunnustena esinevad vajumikausi parameetrid jääma järgmistesse piiridesse:

$$0 \mu\text{m} < \text{SCI} = 240 \mu\text{m}; 0 \mu\text{m} < \text{BDI} = 200 \mu\text{m}; 0 \mu\text{m} < \text{BCI} = 40 \mu\text{m}$$

Valemite 3.1 – 3.3 põhjal arvutati lähtuvalt minimaalsest katendi E-moodulist maksimaalsed lubatavad parameetrite väärtused, mis on esitatud tabelis 3.1. Tühjad lahtrid tabelis ongi tingitud nn piiridest üleminekul ehk parameetri suurenemisel üle teatud väärtuse, hakkab suurenema ka E-moodul.

Tabel 3.1 Vähimale nõutavale E-moodulile vastavad
SCI, BDI ja BCI piirväärtused (Paabo 2006)

$E_{\min}$, 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

Tabelist 3.1 on näha, et parameetrite väärtuste kõikumine on lubatud küllaltki väikestes piirides, mis ei pruugi olla tõepärane. Hakkab silma, et kõrge E-mooduli (240 MPa) juures nõutakse BCI küllaltki väikest väärtust, mis on tingitud tulemuste esitamiseks kasutatud ebaõigest matemaatilisest funktsioonist.

Tulenevalt eelnevast ei saa leitud väärtusi pidada kasutuskõlblikeks. Lisaks tugineti analüüsi tegemisel vähestele ja väga erinevatele andmetele ja seetõttu on raske enamat soovida.

Esimeses peatükis mainiti, et seni ei ole Eestis vajumikausi parameetreid katendi seisukorra hindamisel kasutatud, välja arvatud AS Teede Tehnokeskuses T. Kaalu koostatud Niitvälja – Kulna maantee kandevõime uuringus (Kaal 2006). T. Kaal kasutas nimetatud töö piires katendi seisukorrale hinnangu andmisel järgmiselt esitatud parameetrite piirväärtusi, mis määrati 2005 a tehtud kandevõime mõõtmistulemuste põhjal:

$SCI > 150$, seotud kihtides esineb probleeme;

$BDI > 100$, aluskihis esineb probleem;

$BCI > 20$, aluspinnases esineb probleeme.

T. Kaalu kasutatud piirväärtusi võib pidada usaldusväärsemateks, sest need määrati tuginedes suuremale andmebaasile ja lähtuti vastavalt hetke koormussagedusele nõutavast E-moodulist.

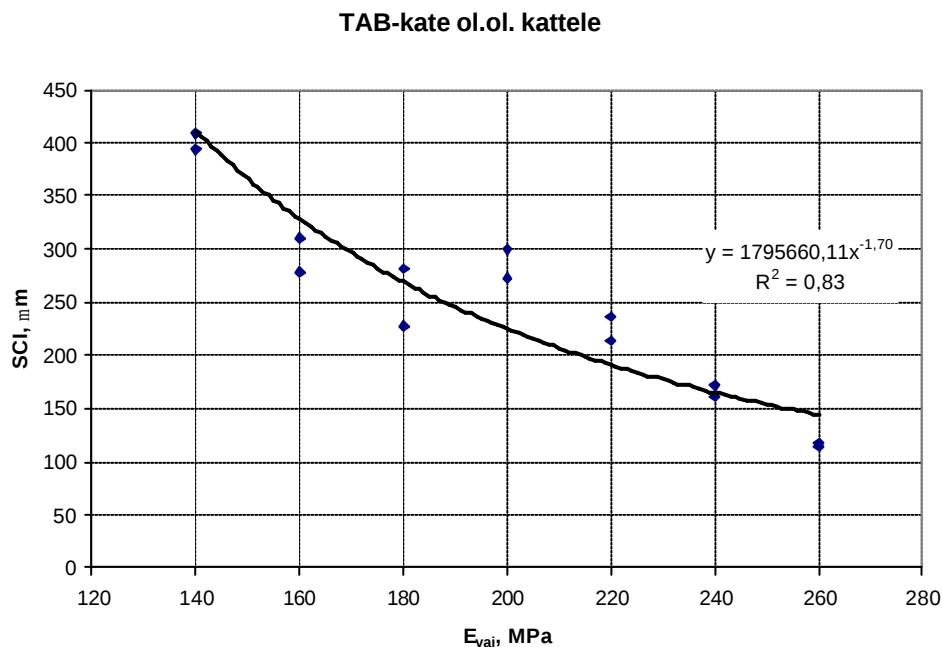
3.2 VAJUMIKAUSI PARAMEETRITE PIIRVÄÄRTE MÄÄRAMINE

Järgnevalt on leitud, lähtuvalt tabelis 2.3 esitatud analüüsi tulemustest, vajumikausi parameetrite piirväärtuste arvutamise kriteeriumid. Peaaegu iga katteliigi jaoks on võimalik koostada graafikud, kus esitatakse vajaliku E-mooduli ja vajumikausi parameetrite omavahelised seosed. Andmete tasandamisel kasutati astmefunktsioone (ka siis kui sirge sobinuks paremini), sest eelnevast analüüsist selgus parameetrite ja E-mooduli vaheline mittelineaarne sõltuvus. Pikemate andmeridade puhul, nagu TAB-kate olemasoleval kattel ja mustkate, on piirväärtused arvutatavad kõigile analüüsigruppidele ja determinatsioonikordajate (R^2) väärtused tulevad kõrged. Lühemate andmeridade puhul ei ole saadud võrrandid väljaspool regressioonijoonega määratud ala usaldusväärsed, kuid parameetrite väärtuste määramiseks nendes piirkondades pole ka vajadust, sest ilmselt pole taolise koormusega teid palju.

3.2.1 Tihedast asfaltbetoonist kate olemasoleval kattel

Graafikult 3.1 selgub, et $SCI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

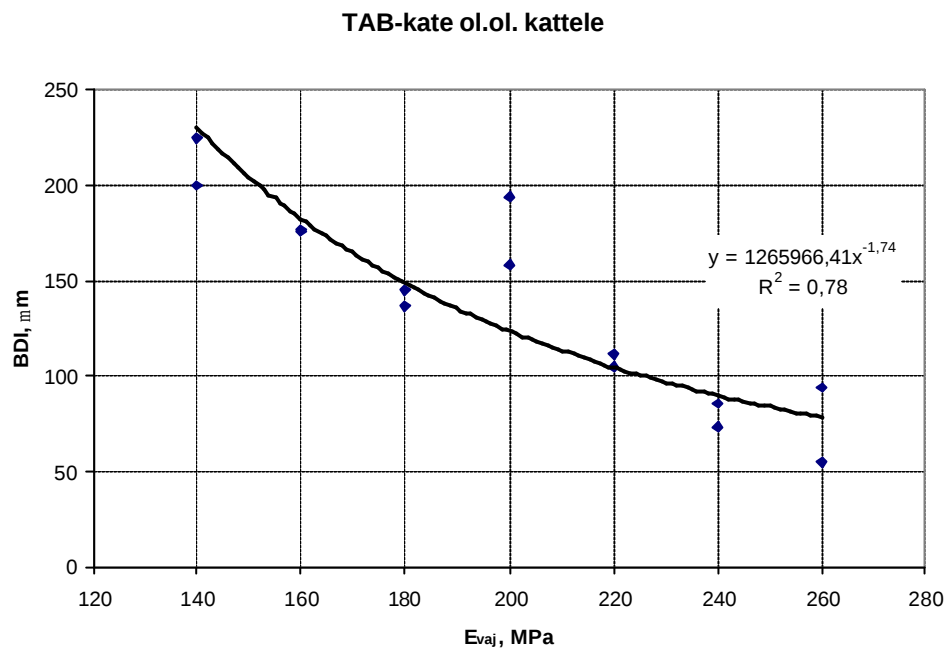
$$SCI = 1795660 \cdot E_{vaj}^{-1,70}, R^2 = 0,83 \quad (3.4)$$



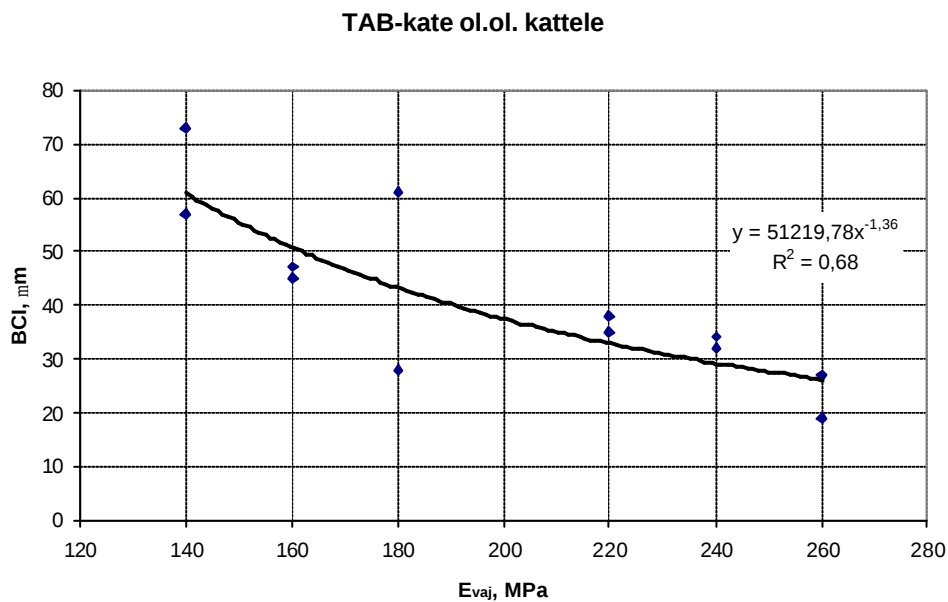
Graafik 3.1 $SCI - E_{vaj}$ seos, tihedast asfaltbetoonist katted olemasoleval kattel

Graafikult 3.2 selgub, et BDI – E_{vaj} vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

$$BDI = 1265966 \cdot E_{vaj}^{-1,74}, R^2 = 0,78 \quad (3.5)$$



Graafik 3.2 BDI – E_{vaj} seos, tihedast asfaltbetoonist katted olemasoleval kattel



Graafik 3.3 BCI – E_{vaj} seos, tihedast asfaltbetoonist katted olemasoleval kattel

Graafikult 3.3 selgub, et BCI – E_{vaj} vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

$$BCI = 51220 \cdot E_{vaj}^{-1,36}, R^2 = 0,68 \quad (3.6)$$

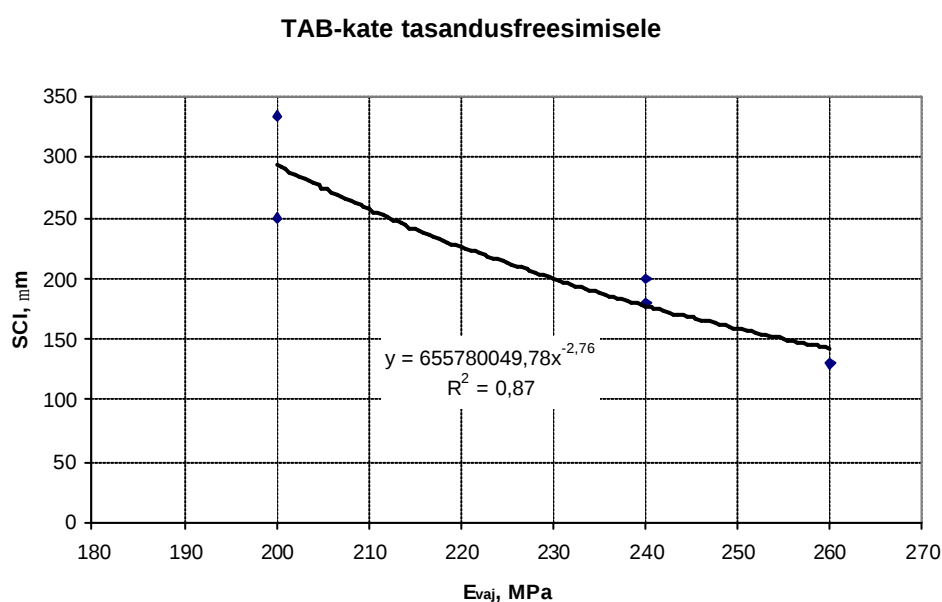
Seose (3.6) saamisel jäeti arvestamata 200 MPa vastavad BCI väärtused, kuna tulemuste hajuvuse tõttu oli seal üks väärtus ebaloomulikult suur ja teist polnud võimalik leida. Võrrandite (3.4) – (3.6) põhjal on võimalik arvutada vajalikule E-moodulile (E_{vaj}) vastavad vajumikausi parameetrite piirväärtused tihedast asfaltbetoonist katetega teedele, mis on rajatud olemasolevale kattele. Analüüsigruppide minimaalsetele moodulitele vastavad vajumikausi parameetrite piirväärtused on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2 Vajalikule E-moodulile vastavad parameetrid (TAB-kate ol.ol. kattel)

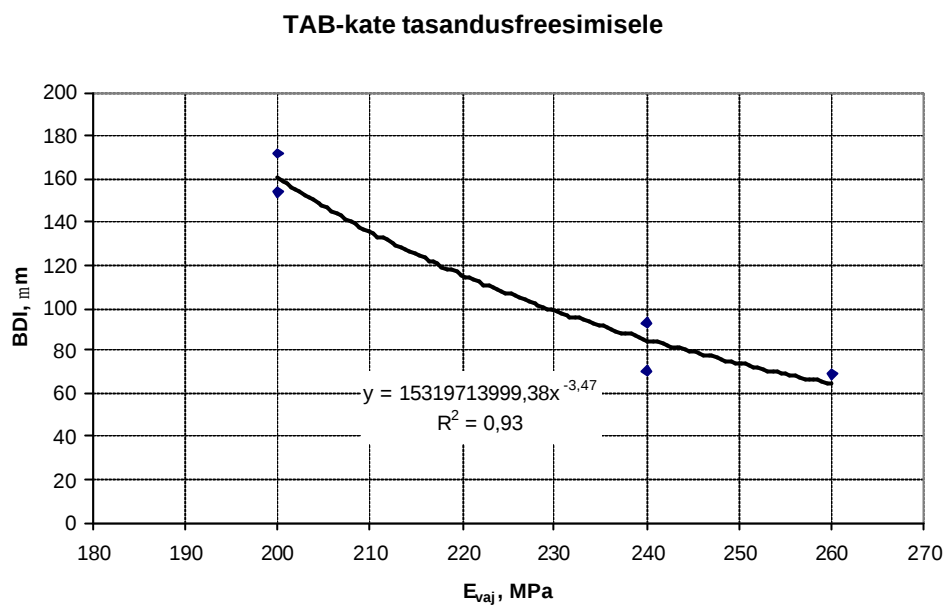
Evaj	SCI	BDI	BCI
140	403	233	62
160	322	185	51
180	263	151	44
200	220	125	38
220	187	106	33
240	161	91	30
260	141	80	27

3.2.2 Tihedast asfaltbetoonist kate freesitud kattel

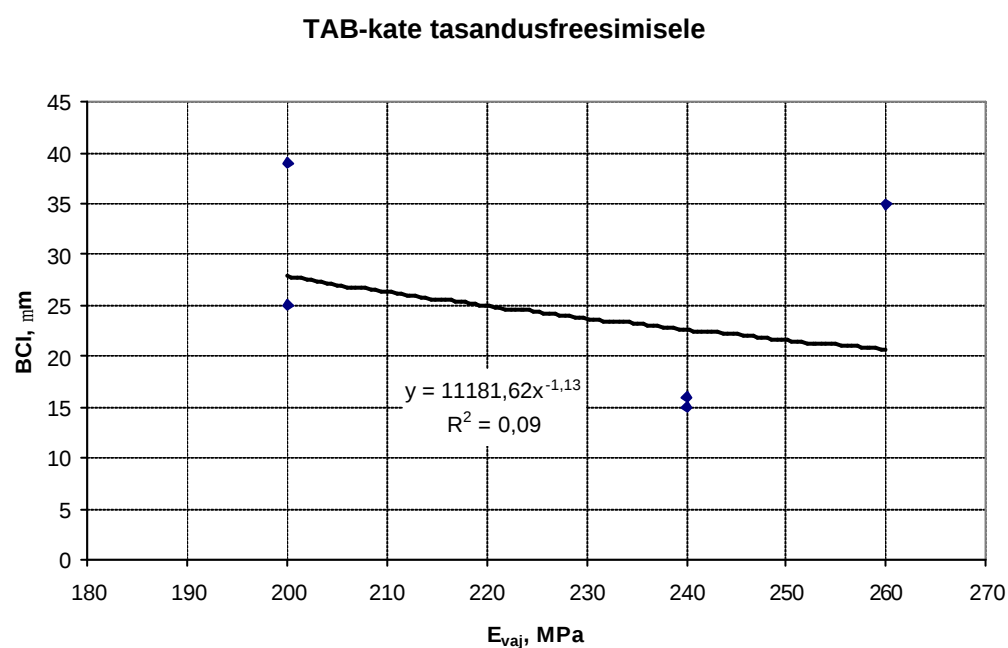
Graafikutelt 3.4 – 3.6 selgub, et SCI- E_{vaj} ja BDI- E_{vaj} seosed on tugevad, kuid BCI- E_{vaj} seos on punktide suure hajuvuse tõttu nõrk. Graafikutel esitatud seoste põhjal on tabelis 3.3 välja pakutud antud kattetüübile vastavad vajumikausi parameetrite piirväärtused. Tuleb pöörata tähelepanu sellele, et BCI väärtuste korral $R^2 = 0,09$.



Graafik 3.4 SCI – E_{vaj} seos, tihedast asfaltbetoonist katted freesitud kattel



Graafik 3.5 BDI – E_{vaj} seos, tihedast asfaltbetoonist katted freesitud kattel



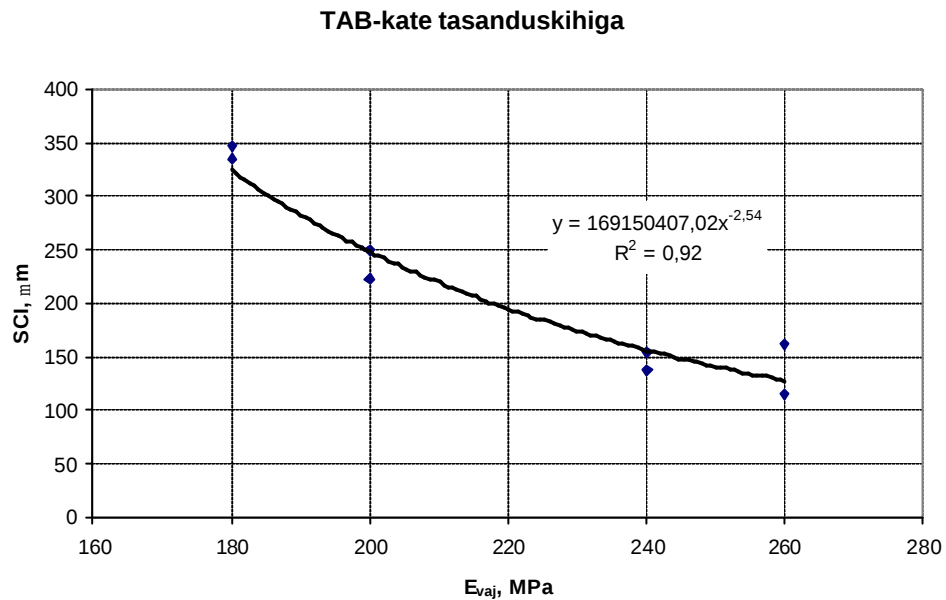
Graafik 3.6 BCI – E_{vaj} seos, tihedast asfaltbetoonist katted freesitud kattel

Tabel 3.3 Vajalikule E-moodulile vastavad parameetrid (TAB-kate fr. kattel)

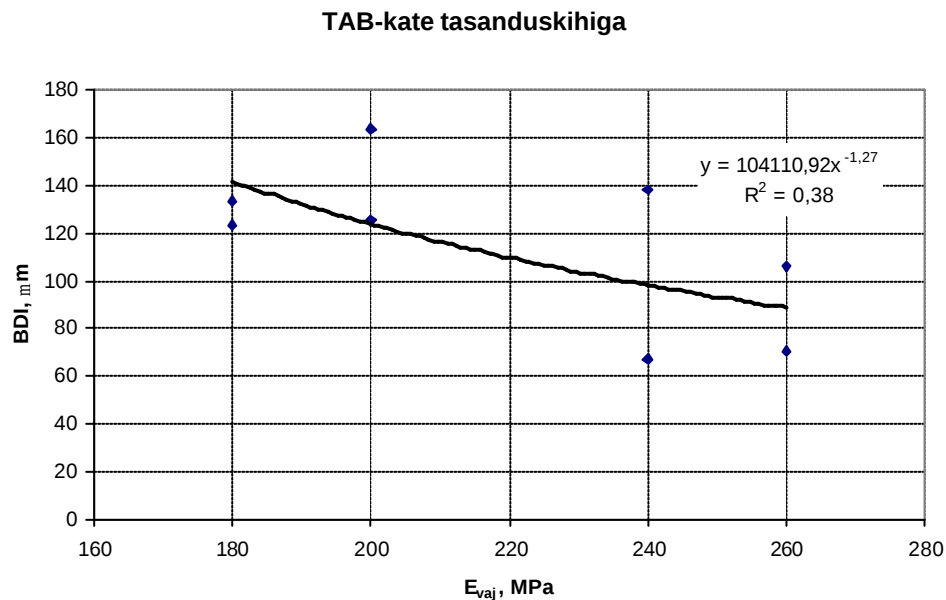
Evaj	SCI	BDI	BCI
200	292	159	28
220	225	114	25
240	177	84	23
260	142	64	21

3.2.3 Tihedast asfaltbetoonist kate tasanduskihiga

Graafikult 3.7 võib täheldada, et siingi on SCI – E_{vaj} vaheline seos tugev ($R^2 = 0,92$). Samas on aga BDI väärtused 200 ja 240 MPa juures (graafik 3.8) teistega võrreldes suured ja BDI – E_{vaj} vahelist seost kirjeldava võrrandi R^2 väike (0,38).



Graafik 3.7 SCI – E_{vaj} seos, tihedast asfaltbetoonist katted tasanduskihiga



Graafik 3.8 BDI – E_{vaj} seos, tihedast asfaltbetoonist katted tasanduskihiga

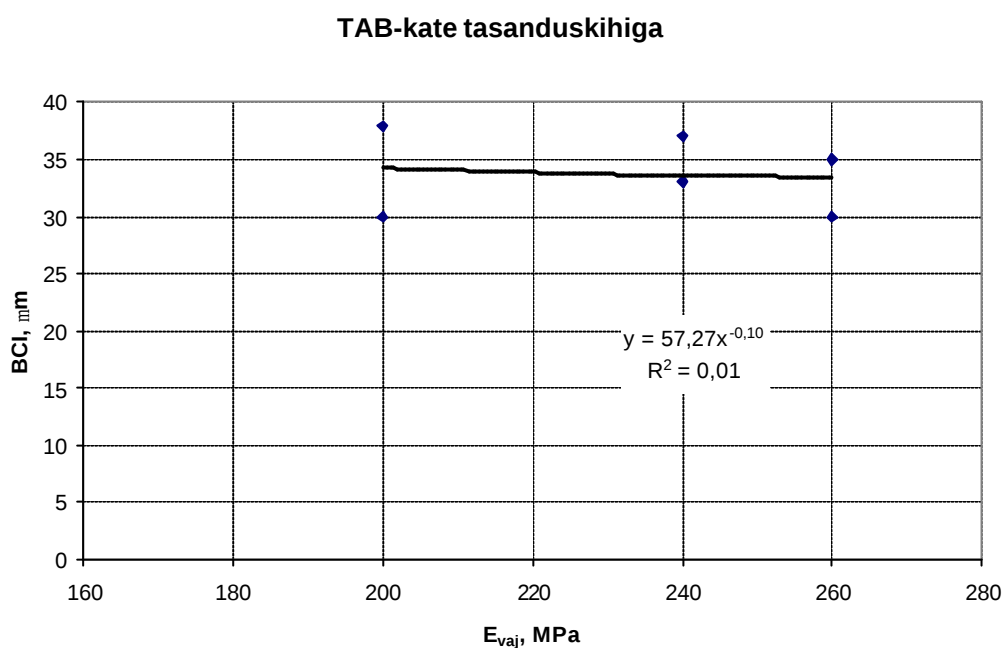
Graafikult 3.7 selgub, et SCI – E_{vaj} vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

$$SCI = 169150407 \cdot E_{vaj}^{-2,54}, R^2 = 0,92 \quad (3.7)$$

Graafikult 3.8 selgub, et BDI – E_{vaj} vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

$$BDI = 104111 \cdot E_{vaj}^{-1,27}, R^2 = 0,38 \quad (3.8)$$

Võrrandite 3.7 ja 3.8 alusel arvutatud SCI ja BDI piirväärtused on esitatud tabelis 3.4.



Graafik 3.9 BCI – E_{vaj} seos, tihedast asfaltbetoonist katted tasanduskihiga

Graafikult 3.9 on näha, et leitud võrrandit BCI arvutamiseks, ei saa madala determinatsioonikordaja väärtuse tõttu arvesse võtta. Graafiku koostamisel jäeti arvestamata arvutuslikult saadud 180 MPa vastavad üleloomulikult suured BCI väärtused (76 ja 346 μm). Samas on ülejäänud BCI väärtused jaotunud vastavate E -moodulite juures väga ühtlaselt. Võimalik, et antud lõikudel ei erinegi aluspinnaste omadused erinevate koormussageduste juures.

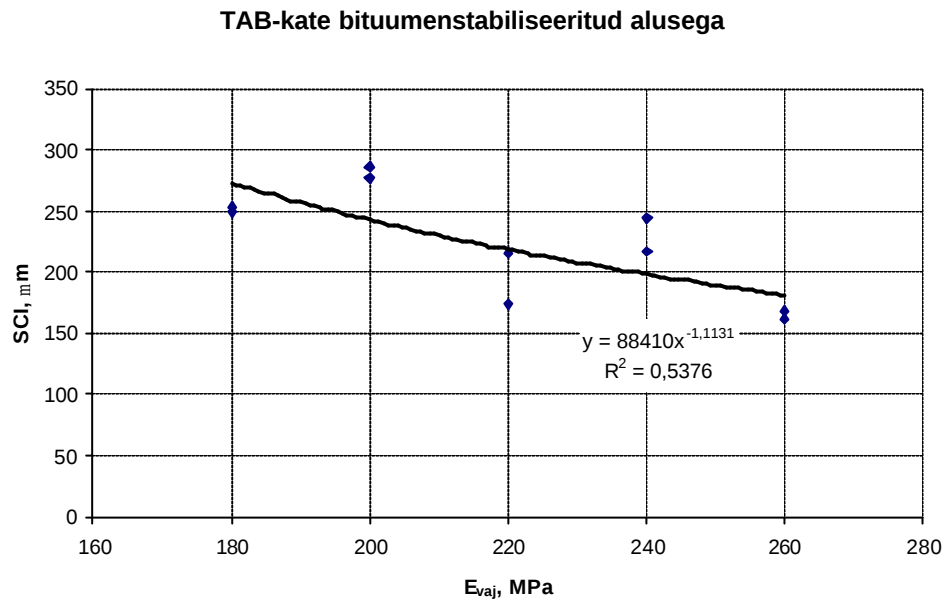
Tabel 3.4 Vajalikule E -moodulile vastavad parameetrid (TAB-kate tas. kihiga)

E_{vaj}	SCI	BDI
180	316	142
200	242	125
220	190	110
240	152	99
260	124	89

3.2.4 Tihedast asfaltbetoonist kate bituumenstabiliseeritud alusega

Graafikult 3.10 selgub, et $SCI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

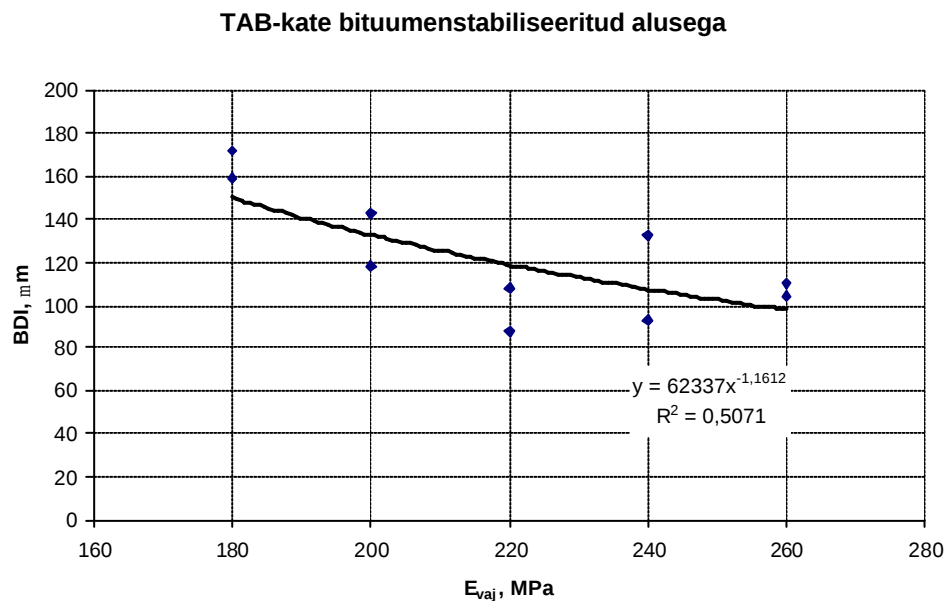
$$SCI = 88410 \cdot E_{vaj}^{-1,113}, R^2 = 0,54 \quad (3.9)$$



Graafik 3.10 $SCI - E_{vaj}$ seos, tihedast asfaltbetoonist katted bituumenstabiliseeritud alusega

Graafikult 3.11 selgub, et $BDI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

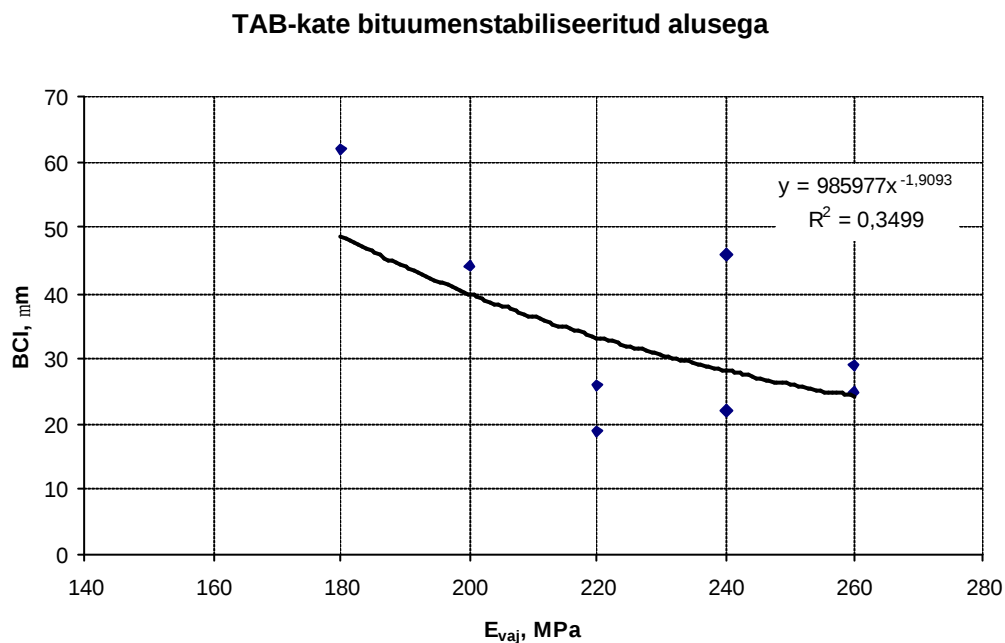
$$BDI = 62337 \cdot E_{vaj}^{-1,161}, R^2 = 0,51 \quad (3.10)$$



Graafik 3.11 $BDI - E_{vaj}$ seos, tihedast asfaltbetoonist katted bituumenstabiliseeritud alusega

Kuna 180 MPa juures oli BCI arvutuslikuks väärtuseks määratud defektidega katete puhul 111 μm , mis ei ole kindlasti reaalne väärtus, siis koostati nii defektidega kui defektideta lõikude põhjal ühine BCI – $E_{\text{võ}}$ hajuvusdiagramm ja määrati arvutuslikuks väärtuseks 62 μm . Seejärel koostati graafik 3.12, kus BCI – E_{vaj} kirjeldab järgmine võrrand:

$$BCI = 985977 \cdot E_{\text{vaj}}^{-1,909}, R^2 = 0,35 \quad (3.11)$$



Graafik 3.12 BCI – E_{vaj} seos, tihedast asfaltbetoonist katted bituumenstabiliseeritud alusega

Seoste (3.9) – (3.11) abil määrati bituumenstabiliseeritud alustega katendite jaoks tabelis 3.5 esitatud piirväärtused.

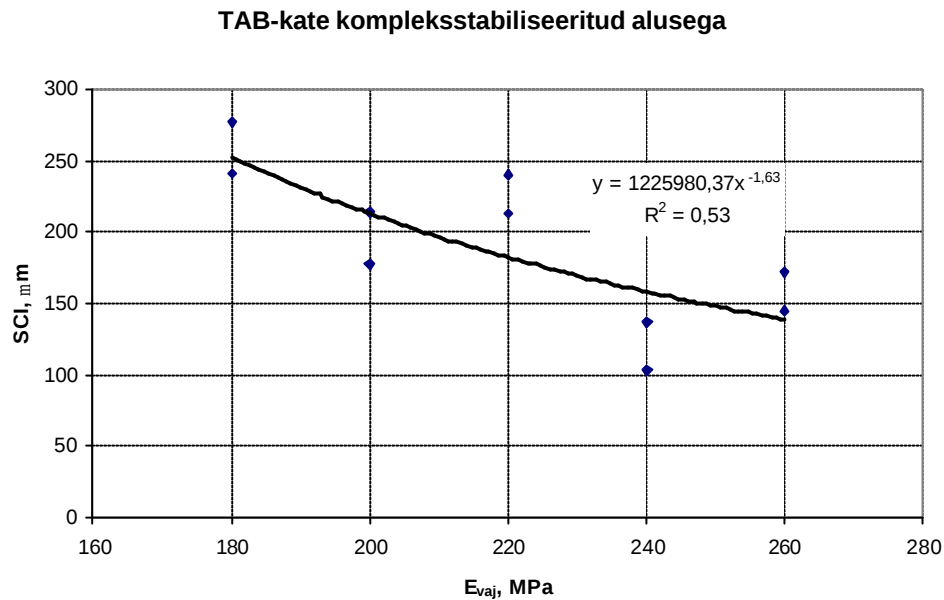
Tabel 3.5 Vajalikule E-moodulile vastavad parameetrid (TAB bit. stabil. alusega)

E_{vaj}	SCI	BDI	BCI
180	273	150	49
200	243	133	40
220	218	119	33
240	198	107	28
260	181	98	24

3.2.5 Tihedast asfaltbetoonist kate kompleksstabiliseeritud alusega

Graafikult 3.13 selgub, et $SCI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

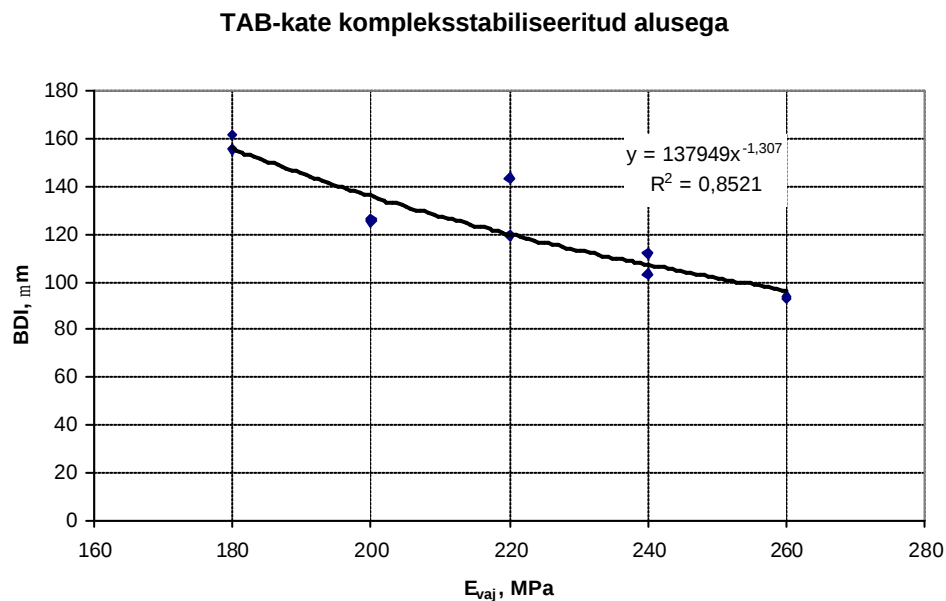
$$SCI = 1225980 \cdot E_{vaj}^{-1,63}, R^2 = 0,53 \quad (3.12)$$



Graafik 3.13 $SCI - E_{vaj}$ seos, tihedast asfaltbetoonist katted kompleksstabiliseeritud alusega

Graafikult 3.14 selgub, et $BDI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

$$BDI = 137949 \cdot E_{vaj}^{-1,307}, R^2 = 0,85 \quad (3.13)$$



Graafik 3.14 $BDI - E_{vaj}$ seos, tihedast asfaltbetoonist katted kompleksstabiliseeritud alusega

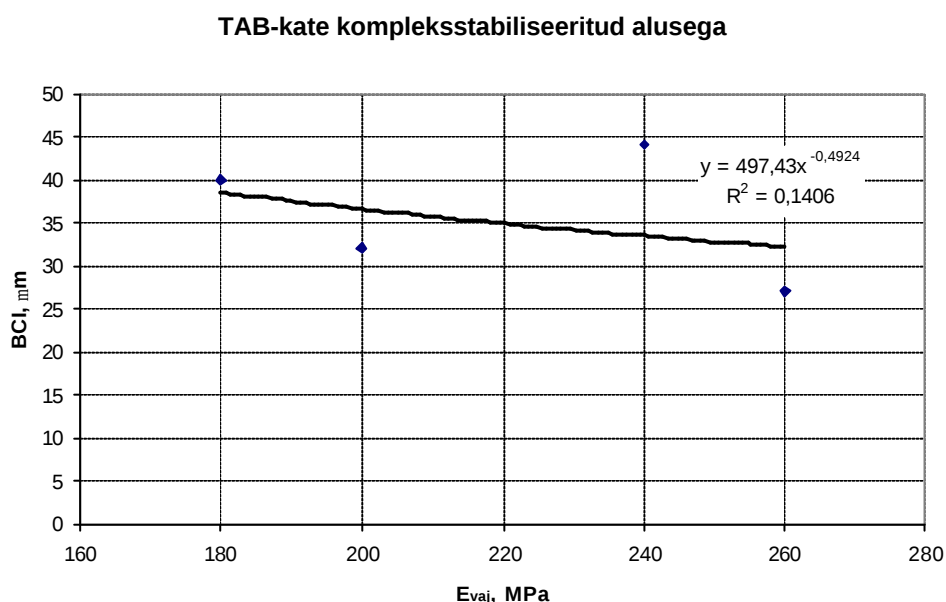
Kuna kompleksstabiliseeritud alustega katendid on alles üsna uued ja defekte esineb vähe, siis otsustati leida seose paremaks kirjeldamiseks ühised arvutuslikud BCI väärtused nii defektidega kui ka defektideta katetele. Nii saadi tabelis 3.6 esitatud andmerida.

Tabel 3.6 BCI arvutuslikud väärtused erinevatele üldistele E-moodulitele

$E_{\text{üld}}$, MPa	180	200	240	260
BCI, μm	40	32	44	27

Saadud väärtuste põhjal koostati graafik 3.15, kus $BCI - E_{\text{vaj}}$ kirjeldab järgnev võrrand:

$$BCI = 497,43 \cdot E_{\text{vaj}}^{-0,492}, R^2 = 0,14 \quad (3.14)$$



Graafik 3.15 $BCI - E_{\text{vaj}}$ seos, tihedast asfaltbetoonist katted kompleksstabiliseeritud alusega

Seoste (3.12) – (3.14) abil määrati kompleksstabiliseeritud alustega katendite jaoks tabelis 3.7 esitatud vajumikausi parameetrite piirväärtused. Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et madala R^2 väärtusega (0,14) määratud BCI väärtused ei ole nii usaldusväärsed kui teised.

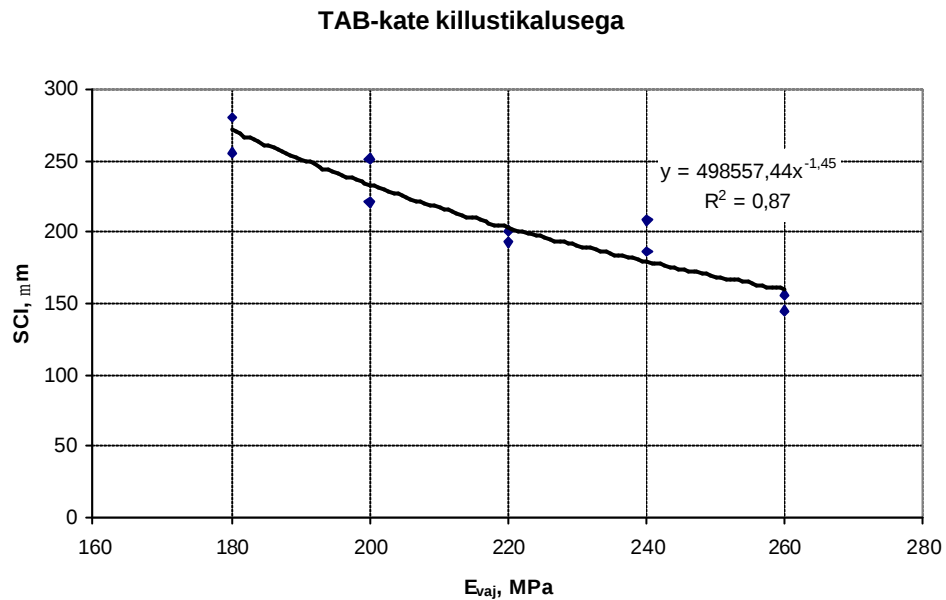
Tabel 3.7 Vajalikule E-moodulile vastavad parameetrid (TAB, kompleksstabil.)

E_{vaj}	SCI	BDI	BCI
180	258	156	39
200	218	218	37
220	186	186	35
240	162	162	33
260	142	142	32

3.2.6 Tihedast asfaltbetoonist kate killustikalusega

Graafikult 3.16 selgub, et $SCI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

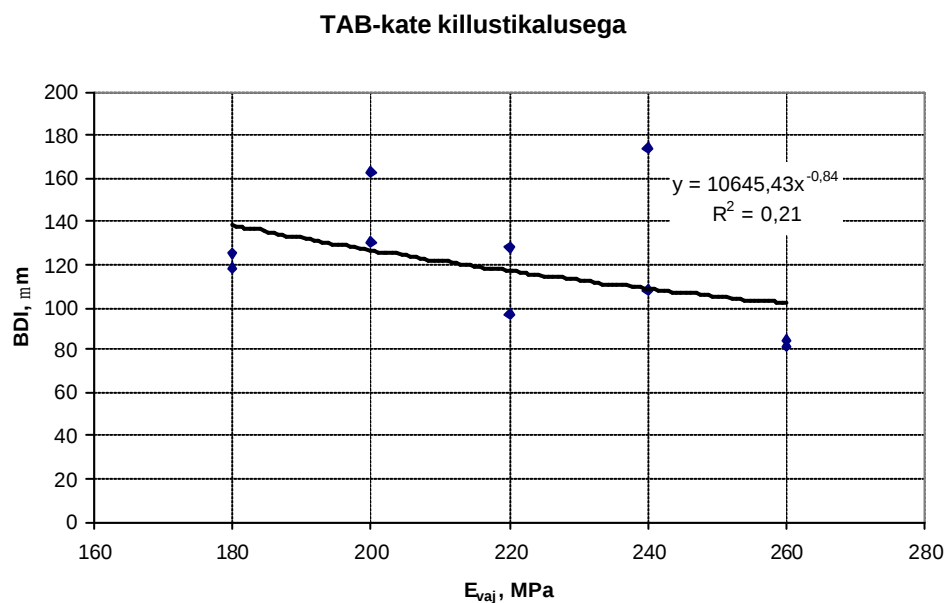
$$SCI = 498557 \cdot E_{vaj}^{-1,45}, R^2 = 0,87 \quad (3.15)$$



Graafik 3.16 $SCI - E_{vaj}$ seos, tihedast asfaltbetoonist katted killustikalusega

Graafikult 3.17 selgub, et $BDI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

$$BDI = 10645 \cdot E_{vaj}^{-0,84}, R^2 = 0,21 \quad (3.16)$$



Graafik 3.17 $BDI - E_{vaj}$ seos, tihedast asfaltbetoonist katted killustikalusega

Sarnaselt kompleksstabiliseeritud katenditele, leiti ka killustikalusega katenditele ühised arvutuslikud BCI väärtused arvestades defektidega kui ka ilma defektideta katteid. Nii saadi tabelis 3.8 esitatud andmerida.

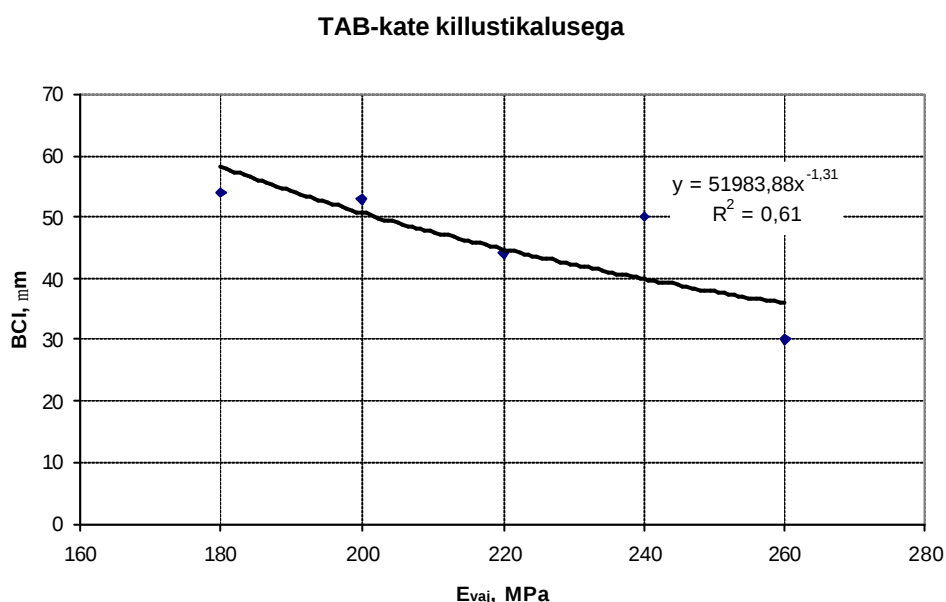
Tabel 3.8 BCI arvutuslikud väärtused erinevatele üldistele E-moodulitele

$E_{\text{üld}}$, MPa	180	200	220	240	260
BCI, μm	54	53	44	50	30

Saadud väärtuste põhjal koostati graafik 3.18, kus BCI – E_{vaj} kirjeldab järgnev võrrand:

$$BCI = 51984 \cdot E_{\text{vaj}}^{-1,31}, R^2 = 0,61 \quad (3.17)$$

Siinkohal on kõrgem R^2 väärtus tingitud väiksemast punktide hulgast, mis asetsevad regressioonijoonel küllalt lähedal.



Graafik 3.18 BCI – E_{vaj} seos, tihedast asfaltbetoonist katted killustikalusega

Seoste (3.15) – (3.17) abil määrati killustikalustega katendite jaoks tabelis 3.9 esitatud vajumikausi parameetrite piirväärtused.

Tabel 3.9 Vajalikule E-moodulile vastavad parameetrid (TAB, killustikalusega)

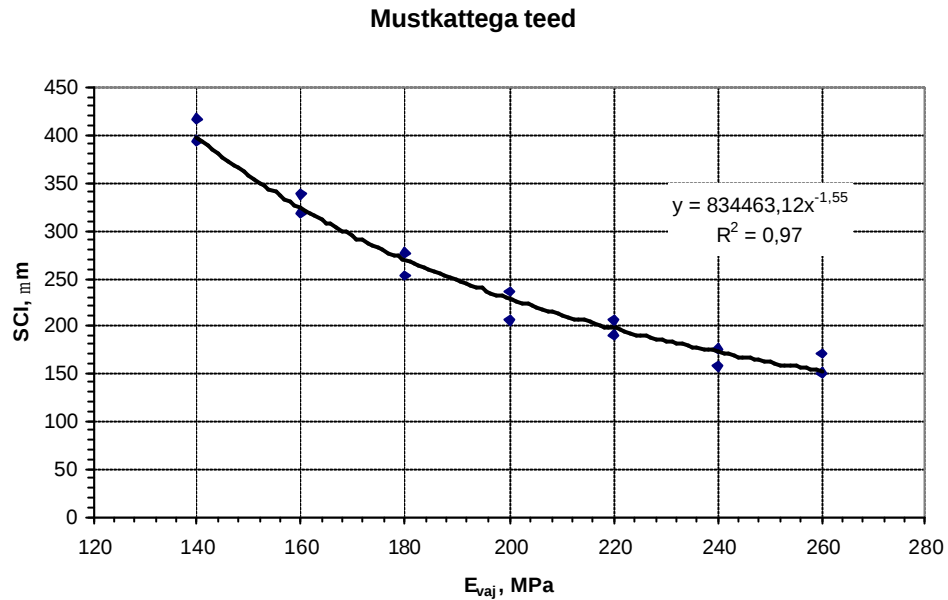
E_{vaj}	SCI	BDI	BCI
180	268	136	58
200	230	124	50
220	200	115	44
240	176	107	40
260	157	100	36

3.2.7 Mustkattega teed

Mustkattega teede korral ilmnesid väga tugevad seosed.

Graafikult 3.19 selgub, et SCI – E_{vaj} vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

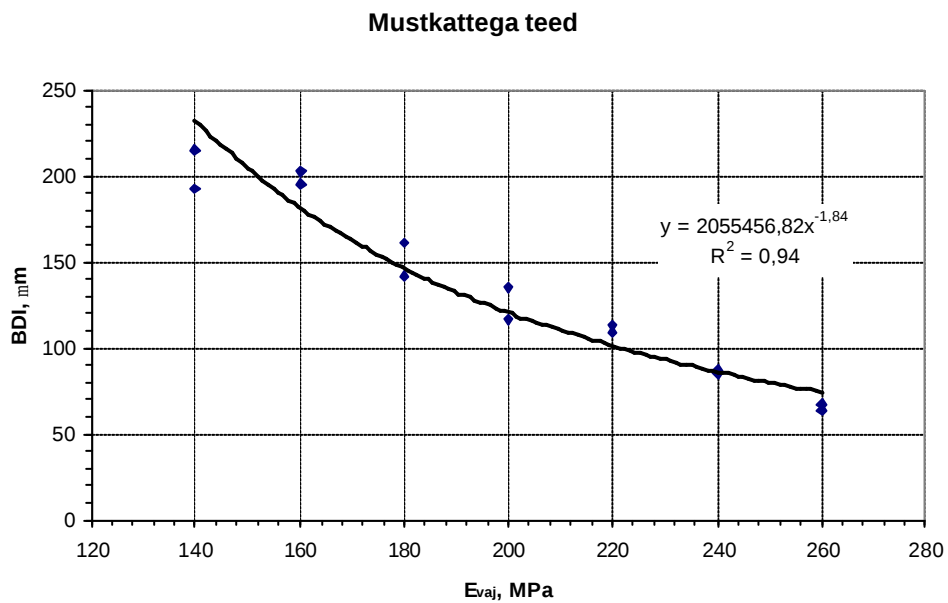
$$SCI = 834463 \cdot E_{vaj}^{-1,55}, R^2 = 0,97 \quad (3.18)$$



Graafik 3.19 SCI – E_{vaj} seos, mustkattega teed

Graafikult 3.20 selgub, et BDI – E_{vaj} vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

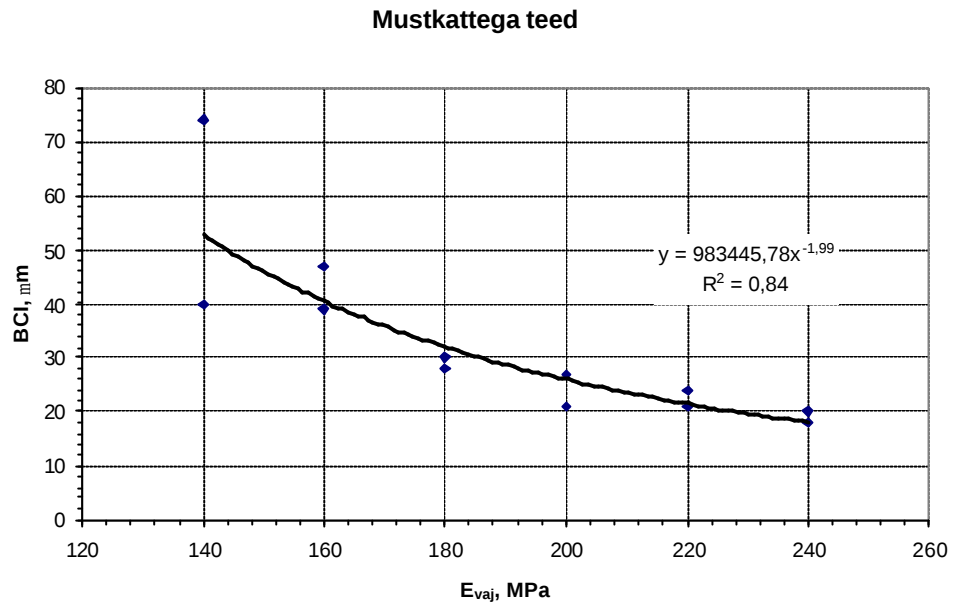
$$BDI = 2055457 \cdot E_{vaj}^{-1,84}, R^2 = 0,94 \quad (3.19)$$



Graafik 3.20 BDI – E_{vaj} seos, mustkattega teed

Graafikult 3.21 selgub, et BCI – E_{vaj} vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

$$BCI = 983446 \cdot E_{vaj}^{-1,99}, R^2 = 0,84 \quad (3.20)$$



Graafik 3.21 BCI – E_{vaj} seos, mustkattega teed

Seoste (3.18) – (3.20) abil määrati mustkattega katendite jaoks tabelis 3.10 esitatud vajumikausi parameetrite piirväärtused.

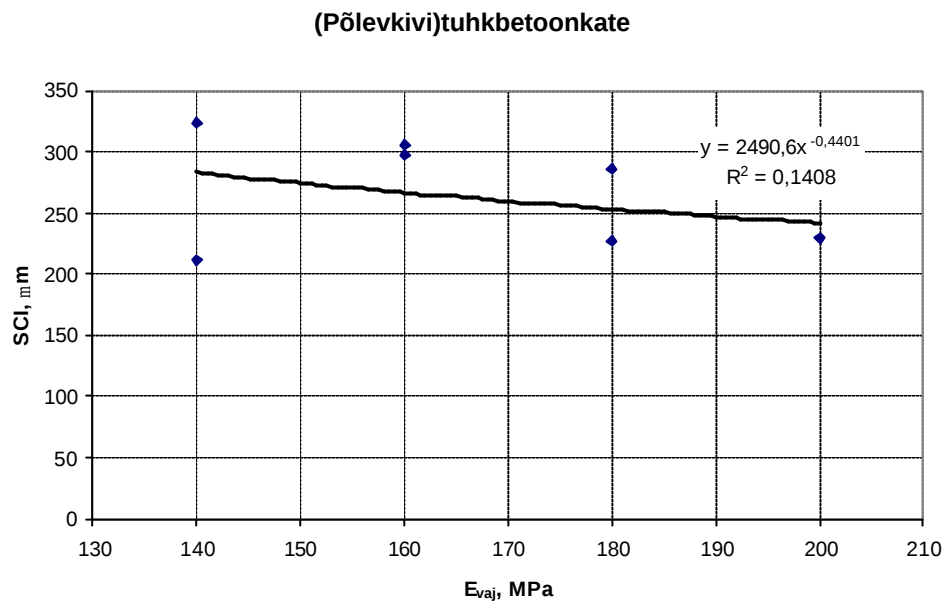
Tabel 3.10 Vajalikule E-moodulile vastavad parameetrid (mustkattega teed)

Evaj	SCI	BDI	BCI
140	393	231	53
160	320	181	40
180	267	146	32
200	226	120	26
220	195	101	21
240	171	86	18
260	151	74	15

3.2.8 Põlevkivituhkbetoonkattega teed

Graafikult 3.22 selgub, et $SCI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

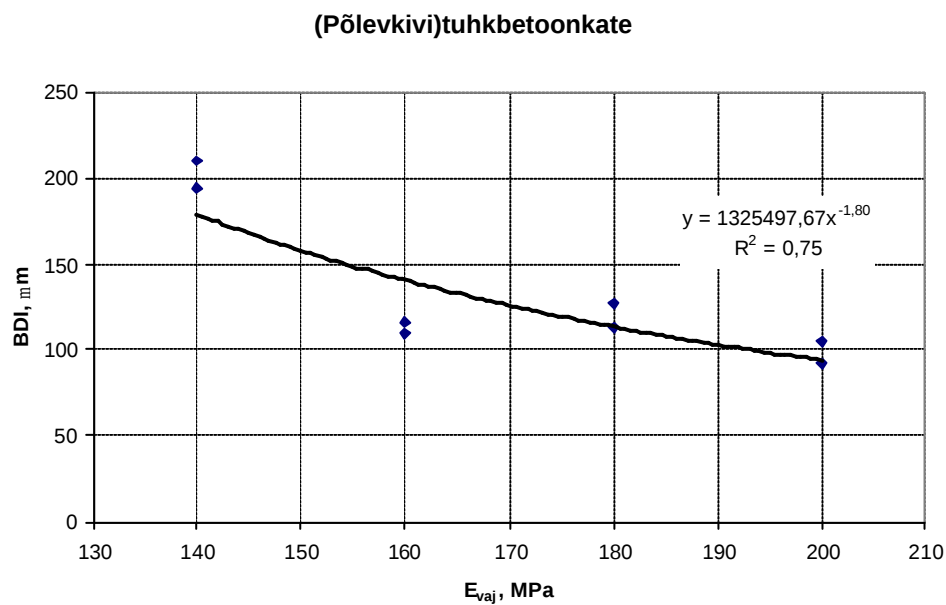
$$SCI = 2491 \cdot E_{vaj}^{-0,44}, R^2 = 0,14 \quad (3.21)$$



Graafik 3.22 $SCI - E_{vaj}$ seos, põlevkivituhkbetoonkattega teed

Graafikult 3.23 selgub, et $BDI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

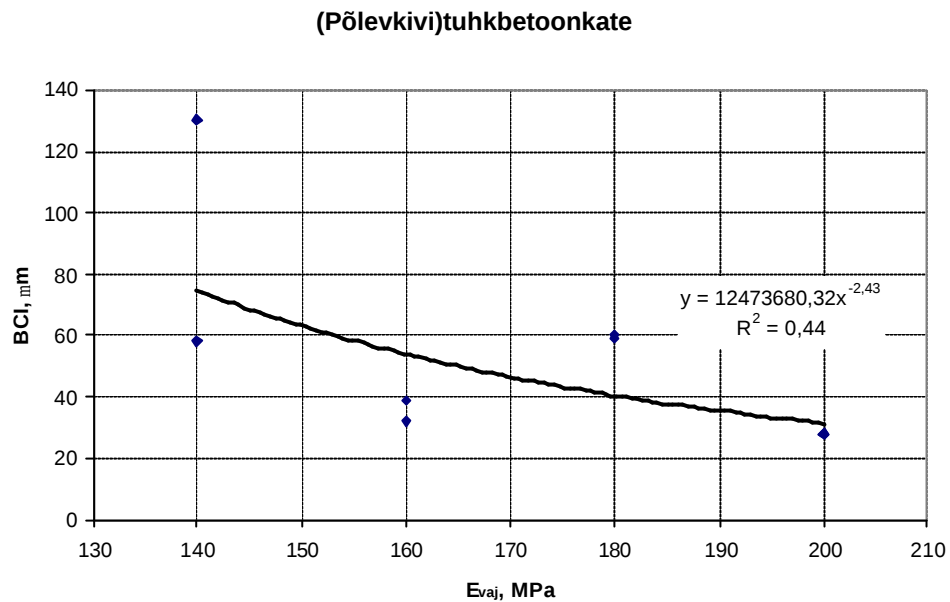
$$BDI = 1325498 \cdot E_{vaj}^{-1,8}, R^2 = 0,75 \quad (3.22)$$



Graafik 3.23 $BDI - E_{vaj}$ seos, põlevkivituhkbetoonkattega teed

Graafikult 3.24 selgub, et BCI – E_{vaj} vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

$$BCI = 12473680 \cdot E_{vaj}^{-2,43}, R^2 = 0,44 \quad (3.23)$$



Graafik 3.24 BCI – E_{vaj} seos, põlevkivituhkbetoonkattega teed

Seoste (3.21) – (3.23) abil määrati põlevkivituhkbetoonkattega katendite jaoks tabelis 3.11 esitatud vajumikausi parameetrite piirväärtused.

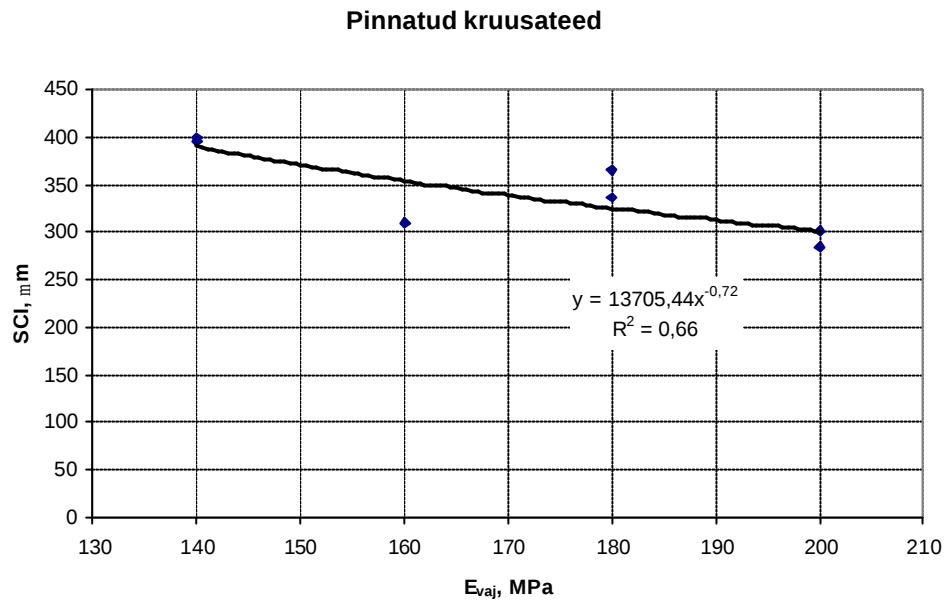
Tabel 3.11 Vajalikule E-moodulile vastavad parameetrid (tuhkbetoonkattega teed)

E_{vaj}	SCI	BDI	BCI
140	283	182	76
160	267	143	55
180	254	116	41
200	242	96	32

3.2.9 Pinnatud kruusateed

Graafikult 3.25 selgub, et $SCI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

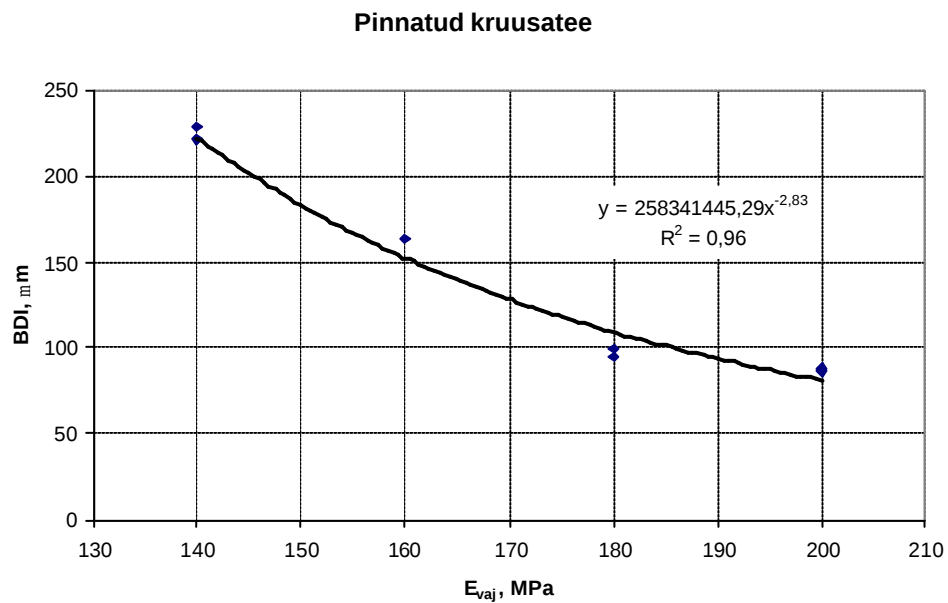
$$SCI = 13705 \cdot E_{vaj}^{-0,72}, R^2 = 0,66 \quad (3.24)$$



Graafik 3.25 $SCI - E_{vaj}$ seos, pinnatud kruusateed

Graafikult 3.26 selgub, et $BDI - E_{vaj}$ vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

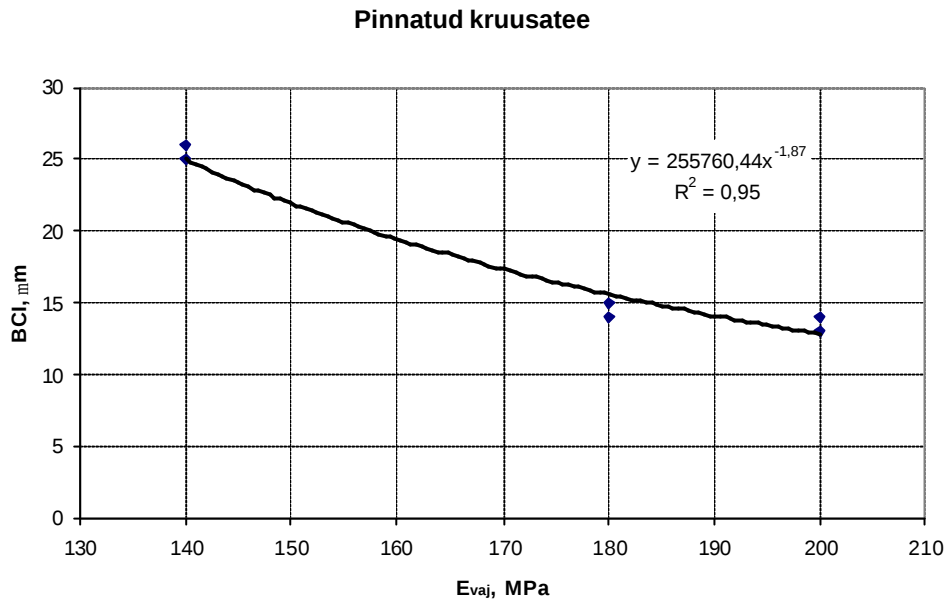
$$BDI = 258341445 \cdot E_{vaj}^{-2,83}, R^2 = 0,96 \quad (3.25)$$



Graafik 3.26 $BDI - E_{vaj}$ seos, pinnatud kruusateed

Graafikult 3.27 selgub, et BCI – E_{vaj} vaheline seos on kirjeldatav järgmise võrrandiga:

$$BCI = 255760 \cdot E_{vaj}^{-1,87}, R^2 = 0,95 \quad (3.26)$$



Graafik 3.27 BCI – E_{vaj} seos, pinnatud kruusateed

Seoste (3.24) – (3.26) abil määrati pinnatud kruusateede jaoks tabelis 3.12 esitatud vajumikausi parameetrite piirväärtused.

Tabel 3.12 Vajalikule E-moodulile vastavad parameetrid (pinnatud kruusateed)

E_{vaj}	SCI	BDI	BCI
140	391	218	25
160	355	149	19
180	326	107	16
200	302	79	13

3.3 KOKKUVÕTE LEITUD VÕRRANDITEST

Eelpool leitud võrrandite abil on võimalik arvutada vajalikule E-moodulile vastavaid vajumikausi parameetrite piirväärtusi erinevate katteliikidega maanteedel. Praktilise töö käigus tuleks määrata liiklusloenduse andmete põhjal vastava teelõigu koormussagedus, mille kaudu on võimalik arvutada vähim vajalik E-moodul. Sisestades E-mooduli (E_{vaj}) väärtuse mingisse võrrandisse saab teada suurima lubatava vajumikausi parameetri e selle piirväärtuse antud teelõigu kohta. Katteliikide määramisel tuleb lähtuda Teeregistri andmetest, sest nimetatud võrrandid on leitud nende andmete põhjal.

Võrranditel on astmefunktsiooni kuju

$$y = a_0 x^{a_1} \quad (3.27)$$

kus $x = E_{vaj}$, MPa;

y – otsitav vajumikausi parameeter (SCI, BDI, BCI);

a_0, a_1 – vastavalt tabelile 3.13.

Kui arvutuslikuks veokiks on veoauto 100 kN normteljekoormusega, siis E_{vaj} leitakse (2001-52):

$$E_{vaj} = a \cdot \log(Q) + b \quad (3.28)$$

kus Q – (ennustuslik) koormussagedus, normtelge/ööp;

$a = 67,6$;

$b = 61,3$.

Igale teelõigule määratud koormussagedusele leiti vajalikud E-moodulid, ning arvutati piirväärtuste võrrandite alusel iga katteliigi katselõigu piirväärtus. Piirväärtusest suuremate väärtuste osakaal protsentides vastava katteliigi andmebaasi lõikude koguhulgast on toodud tabeli 3.13 viimases veerus. Tabelist on näha, et piirväärtusest suuremate väärtuste hulk jääb eri katteliikidel vahemikku 0...66%. Kõige vähem üle piirväärtuse parameetrite väärtusi esineb kompleksstabiliseeritud katendite hulgas. Kõige rohkem üle piirväärtuse väärtusi esineb pinnatud kruusateede hulgas. Mustkatttega katete grupp on üle piirväärtuse väärtuste hulga poolest järgmine. Mustkatttega teede grupp oli ka suurim – kokku 11141 lõiku. Tabelist selgu, et üldiselt esineb nende piirväärtuste alusel probleeme kõikides katendikonstruktsiooni kihtides. BCI piirväärtuste puhul tuleb tähelepanu pöörata nõrgematele seoste tugevustele.

Tabel 3.13 Võrrandite liikmed piirväärtuse leidmiseks ja andmebaasist üle piirväärtuse olevate parameetrite osakaal

Katteliik	y	a₀	a₁	R²	Hulk üle piirväärtuse, %
TAB-kate olemasolevale kattele	SCI	1 795 660	-1,70	0,83	16
	BDI	1 265 966	-1,74	0,78	11
	BCI	51 220	-1,36	0,68	4
TAB-kate tasandus-freesimisele	SCI	655 780 050	-2,76	0,87	21
	BDI	15 319 713 999	-3,47	0,93	25
	BCI	11 182	-1,13	0,09	9
TAB-kate tasanduskihiga	SCI	169 150 407	-2,54	0,92	17
	BDI	104 111	-1,27	0,38	10
	BCI	-	-	-	-
TAB-kate bituumen-stabil. alusega	SCI	88 410	-1,113	0,54	11
	BDI	62 337	-1,161	0,51	10
	BCI	985 977	-1,909	0,35	3
TAB-kate kompleks-stabil. alusega	SCI	1 225 980	-1,63	0,53	0,2
	BDI	137 949	-1,307	0,85	0,7
	BCI	497,43	-0,492	0,14	0
TAB-kate killustik-. alusega	SCI	498 577	-1,45	0,87	6
	BDI	10 645	-0,84	0,21	6
	BCI	51 984	-1,31	0,61	0,3
Mustkate	SCI	834 463	-1,55	0,97	29
	BDI	2 055 457	-1,84	0,94	32
	BCI	983 446	-1,99	0,84	18
Põlevkivi-tuhkbetoon-kate	SCI	2 491	-0,44	0,14	23
	BDI	1 325 498	-1,80	0,75	24
	BCI	12 473 680	-2,43	0,44	7
Pinnatud kruusatee	SCI	13 705	-0,72	0,66	53
	BDI	258 341 445	-2,83	0,96	66
	BCI	255 760	-1,87	0,95	43

KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli FWD vajumikausi parameetritele (SCI, BDI, BCI) piirväärtuste leidmine uurides seoseid katendi struktuurse seisukorra näitajate, nagu konstruktsiooni vähesest kandevõimest tingitud defektide ja püsivate deformatsioonidega ning katendi üldise elastsusmooduliga.

Teeregistri andmete põhjal koostatud andmebaasile tuginedes ei leidnud kinnitust hüpoteesid vajumikausi parameetrite seostest teekattel avaldunud defektidega ja roopasügavustega. Peamiseks põhjuseks võib lugeda erinevate andmete kogumise omapära. Defektide ja roopasügavuste andmed on saadud 100 m lõikudelt, kandevõimemõõtmised kajastavad aga katendi seisukorda nende lõikude otpunktides. Edasiste uurimistööde jaoks on soovituslik koguda vastavaid andmeid erinevas seisukorras teedelt nii, et FWD – mõõtmised oleksid defektide inventeerimisega paremini kooskõlas. Näiteks võib mõõtmisi teostada tihedama sammuga ja kirjeldada defekte mõõtmispunktide ümbruses.

Leiti, et vajumikausi parameetrid on heas korrelatsioonis FWD mõõtmistulemuste põhjal arvutatava katendi üldise elastsusmooduliga. Tavaliselt esinesid tugevad seosed katendikihtide seisukorda kirjeldavate parameetrite (SCI ja BDI) ja katendi üldise elastsusmooduli ($E_{\text{üld}}$) vahel. Nõrgemad seosed esinesid aluspinnase seisukorda kirjeldava parameetri BCI ja $E_{\text{üld}}$ vahel. Analüüsiga konstateeriti fakti, et Eesti maanteede katendite mitterahuldava seisukorra põhjustavad erineva tugevusega aluste ja aluspinnaste kihid. Viimaste aastate jooksul ehitatud kompleksstabiliseeritud alustega katendid paistsid silma kõrgemate determinatsioonikordajate väärtustega BCI ja $E_{\text{üld}}$ seoste matemaatiliste mudelitega kirjeldamisel. Sellest võib järeldada, et korrektne alusekihtide ehitamine tagab koormuse ühtlasema jaotumise aluspinnasele.

Tuginedes parameetrite ja $E_{\text{üld}}$ vahelistele seostele, ning lähtudes erineva liikluskooormusega teedelt nõutavatest elastsusmoodulitest, leiti võrrandid parameetritele piirväärtuste arvutamiseks põhiliste katteliikide korral. Kuna tegemist esmakordse, mahuka andmebaasi statistilisel analüüsil põhineva lähenemisega, siis

nõuavad leitud piirväärtused korrigeerimist erinevate mõjufaktorite taustal. Kindlasti tuleb leida mõõtmistulemuste taandamisel lihtsustatult kasutatud E_{uld} temperatuuri-parandustegurite asemele FWD mõõteandurite lugemite parandustegurid.

Antud töö tulemuste alusel arvutatavaid piirväärtusi võib arvestada hinnangute andmisel teede võrgu tasandil, kuid projekti tasandil kasutamiseks on need veel liialt esialgsed. Antud töö näitab vajumikausi parameetrite praktilisi kasutusvõimalusi, kuid samas tõestab ka edasiste uuringute vajadust.

Lähitulevikus tuleks enam tähelepanu pöörata põhjalikemate andmete kogumisele. Näiteks võiks kasutada integreeritult FWD-mõõtmisi ja maaradariga kihtide mõõtmisi. Hetkel olemasolevaid kontrollmõõtepunktide andmeid on vähe ja need on liialt erineva iseloomuga. Seega on nende alusel tulemuste leidmine raskendatud. Erinevate katteliikidega konstruktsioonide kihipaksuste andmed annaksid uusi võimalusi uurimuste läbiviimiseks.

SUMMARY

Current research studies relations between Falling Weight Deflectometer (FWD) deflection basin parameters and road pavement structural condition indicators, such as fatigue cracking and permanent deformations induced low bearing capacity of pavement, and pavement equivalent elastic modulus. The primary aim was to develop limit values for deflection basin parameters.

The database based on Register of Estonian Roads disproved the hypothesis of relations between deflection basin parameters and defects or rutting. Main reason for that is the difference between collecting the data. FWD measurements are carried through in local points, but other condition indicators are collected from sections. It is recommended for future researches to combine the measurements more respectively.

Deflection basin parameters and back-calculated pavement equivalent modulus were found to be in good correlation. Strong relationships were found usually between upper layers indicators (SCI and BDI) and pavement equivalent modulus (E_{eq}). Relations between subgrade indicator BCI and E_{eq} found in the research were not very strong. Analyses confirm that poor condition of Estonian road pavements is due to weak subbases and subgrades. Pavements that are stabilized with mixed binders (bitumen + cement) were found to be with higher determination coefficients of mathematical models representing the relations between BCI and E_{eq} . Based on this, it can be said, that traffic loading is distributed on subgrade better, if the base construction is correct.

Based on the aforementioned relations, and the required minimum equivalent modulus of particular pavement, the equations were developed to determine the limit values of deflection basin parameters for different types of pavements. As the statistical analyses of such extensive database have been done for the first time in Estonia, the limit values need to be corrected with different affecting factors. Certainly, correct coefficients of temperature normalisation of FWD deflections are needed to develop instead of these used in this study.

In conclusion, it has been said that deflection basin limit values, based on this research, can be used for pavement condition assessment in network level, but further research is needed to use limit values in project level.

Kasutatud KIRJANDUS ja allikad

- 2001-52. *Elastsete teekatendite projekteerimise juhend (2001-52)*. Eesti Maanteeamet, Tallinn, 2001
- 2003-43. *Teekattel esinevate defektide inventeerimisjuhend*. Eesti Maanteeamet, Tallinn, 2003
- Aavik, A. 2003. *Methodical Basis for the Evaluation of Pavement Structural Strength in Estonian Pavement Management System (EPMS)*. Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, Tallinn Technical University.
- COST 336.1999. *Falling Weight Deflectometer*. Final Report of the Action. Final Draft. European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research. Danish Road Directorate
- Craig, R. F. 2004. *Craig's Soil Mechanics, 7th Edition*. Spon Press. Printed and bound in Great Britain by TJ International Ltd, Padstow, Cornwall
- Ferregut, C., Abdallah, I., Melchor-Lucero, O., Nazarian, S. 1999. *Artificial Neural Network-Based Methodologies for Rational Assessment of Remaining Life of Existing Pavements*. Research Project 0-1711. Development of a Comprehensive, Rational Method for Determination of Remaining Life of an Existing Pavement, Conducted for Texas Department of Transportation. The Center for Highway Materials Research, The University of Texas at El Paso.
- Hildebrand, G. 2002. *Verification of Flexible Pavement Response From a Field Test*. Part 1. Report 121. Roskilde, Denmark: Road Directorate, Danish Road Institute.
- Huang, Y. H. 2004. *Pavement Analysis and Design*. 2nd Edition. New Jersey, Pearson: Prentice Hall.
- Kameyama, S jt. 1998. *Effect of FWD Sensor Locations on Backcalculated Layer Moduli* in Proceedings of 5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway 6-8 July 1998, pp 477-478

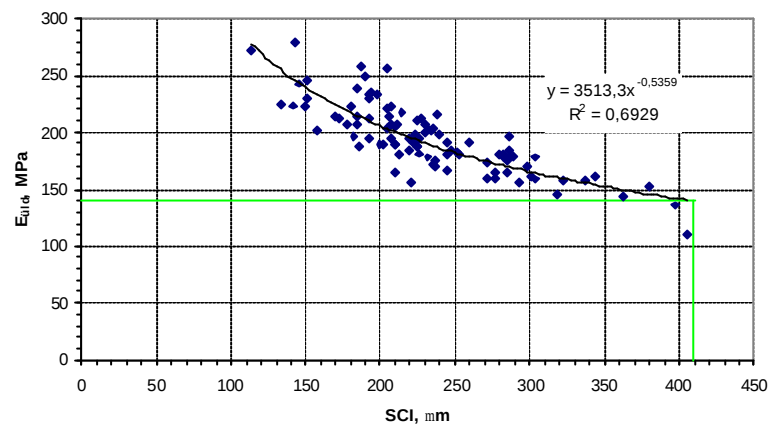
- Kim, Y. R., Lee Y.-C., and Ranjithan, S. R., 2000. *“Flexible Pavement Condition Evaluation Using Deflection Basin Parameters and Dynamic Finite Element Analysis Implemented by Artificial Neural Networks,”* Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third Volume, ASTM STP 1375, S.D. Tayabji and E. O. Lukanen, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp 514-530
- Maureen, A. K. 1997. *Current and Proposed Practices for Nondestructive Highway Pavement Testing* – Special Report 97-28. Hanover, New Hampshire: U.S Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory
- Meshkani, A., Abdallah, I., Nazarian, S. 2002. *Feasibility of Backcalculation of Nonlinear Parameters of Flexible Pavement Layers from Nondestructive Testing.* Transportation Research Record, Volume 1860/2003. Transportation Research Board of the National Academies, pp 16-25
- Metsvahi, T., Koppel, M., Pihlak, I. jt. 2005. *Maanteede projekteerimismõrde ja sellega seotud määruste korrektuur, köide II. ptk. 4* –Katendid. TTÜ, Teedeinstituut
- Mork, H. 1998. *The Effect of Sensor Configuration on the Backcalculation of Layer Moduli* in Proceedings of 5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway 6-8 July 1998, pp 467-476
- Nazarian, S., Abdallah, I., Meshkani, A. 2004. *Determination of Nonlinear Parameters of Flexible Pavement Layers from Nondestructive Testing,* Research Report TX 1780-3. El Paso, Texas: The Center for Transportation Infrastructure Systems The University of Texas at El Paso.
- Nazef, A. ja Choubane, B., 2002. *Survey of Current Practices of Using Falling Weight Deflectometers (FWD)* in State Materials Office. Proceedings of the Pavement Evaluation 2002 Conference, Roanoke, Virginia, 21-25. oktoober 2002 <http://www.rpug.org/2002/Abstracts.html>
- NHI Course No 13127. 1994. *Pavement Deflection Analysis.* Instructor Guide. U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: National Highway Institute.

- Paabo, P. 2006. *Teekatendite tugevuse hindamine dünaamilise koormusseadmega*. Magistritöö. TTÜ teedeinstituut, Tallinn
- Park, H. M. 2001. *Use of Falling Weight Deflectometer Multi-Load Level Data for Pavement Strength Estimation*. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Raleigh, North Carolina
- Pavement Rehabilitation Manual. *Module 2-3. Nondestructive Test Data Collection and Interpretation*
- Saeed, A., Hall, J. W. 2002. *Comparison of Non-destructive Testing Devices to Determine in Situ Properties of Asphalt Concrete Pavement Layers*. Paper Submitted for Presentation at the Pavement Evaluation 2002 Conference. Roanoke, Virginia
- Tiehallinnon Selvityksiä 17/2006. *Kantavuuden kausivaihtelumalli. Laskennallinen malli kevätkantavuuden määrittämiseksi tien rakenteellisten ominaisuuksien ja kuntotietojen avulla*. Tiehallinto, Helsinki 2006
- Ullidtz, P. 1998. *Modelling Flexible Pavement Response and Performance*. 1. edition 1998. Technical University of Denmark. Denmark, Gylling: Narayana Press
- WSDOT Pavement Guide: For Design, Evaluation and Rehabilitation, Volume 2 / Washington State Department of Transportation. 1998.
- ASNT (www). viimati külastatud 14.mai 2007
<http://www.asnt.org/publications/materialseval/basics/jul04basics/jul04basics.htm>
- DMRB (www) viimati külastatud 15 mai 2007
<http://www.standardsforhighways.co.uk/dmr/vol7/section3/hd2994.pdf>
- FHWA (www).viimati külastatud 14 mai 2007
<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/ltp/pubs/06132/chapt4.cfm#tabdef1>
- WSDOT (www) viimati külastatud 11 mai 2007
<http://www.wsdot.wa.gov/biz/mats/pavement/fwd.htm>
- Teeregister <http://teeregister.riik.ee/mnt/index.do>

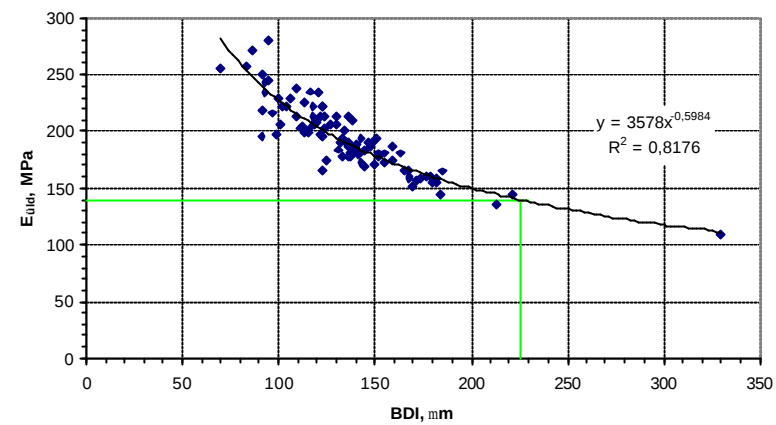
LISAD

LISA A ANALÜÜSIGRUPP 1 – GRAAFIKUD

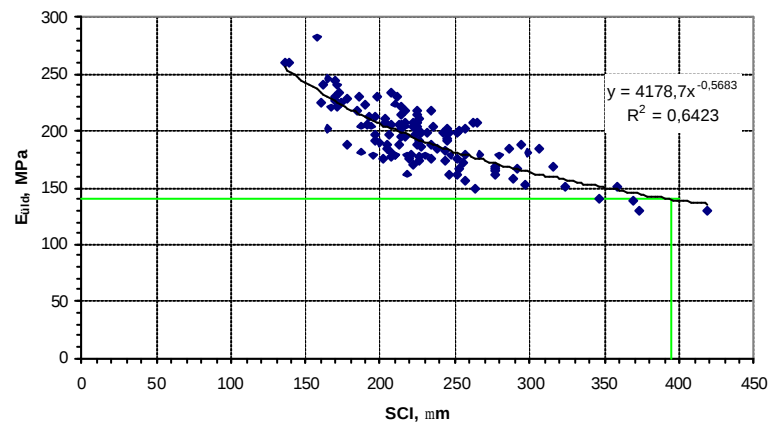
TAB-kate ol.ol. kattele, defektideta, <30 normtelge/ööp



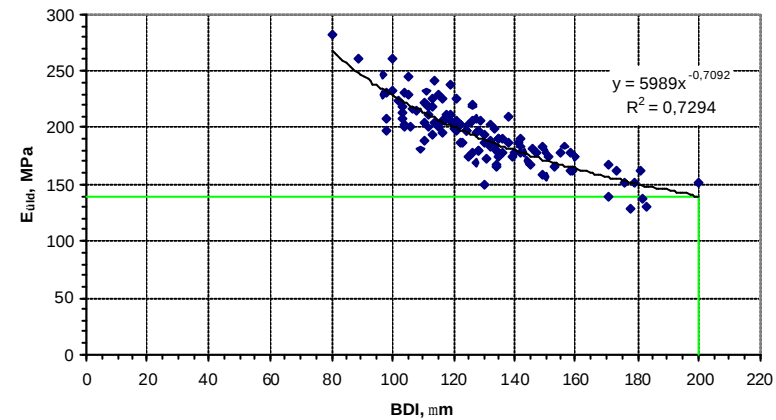
TAB-kate ol.ol. kattele, defektideta, <30 normtelge/ööp



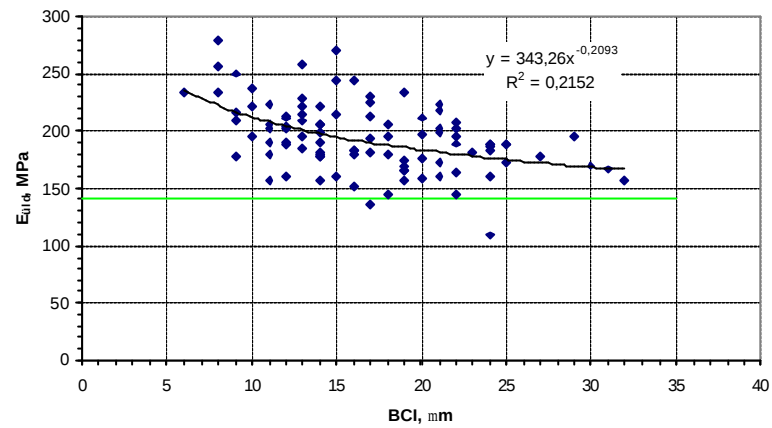
TAB-kate ol.ol. kattele, defektidega, <30 normtelge/ööp



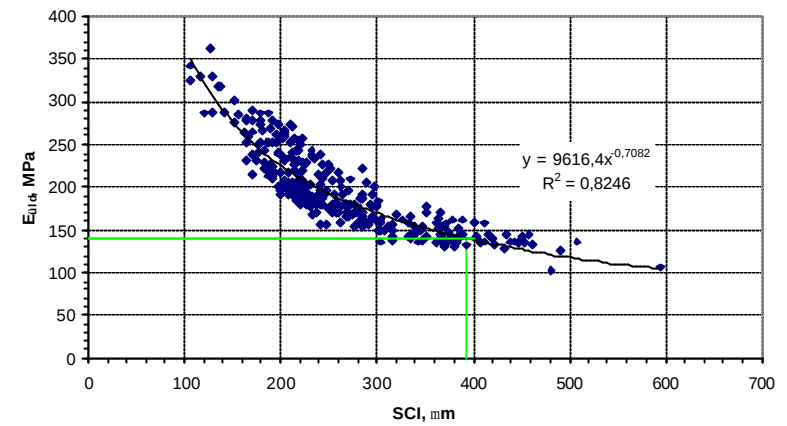
TAB-kate ol.ol. kattele, defektidega, <30 normtelge/ööp



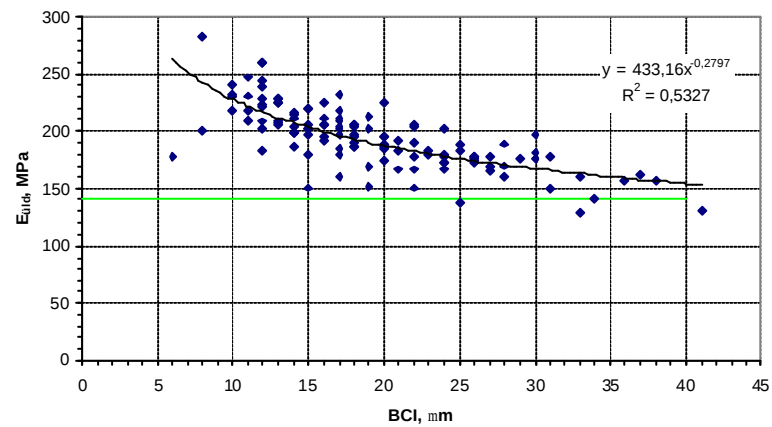
TAB-kate ol.ol. kattele, defektideta, <30 normtelge/ööp



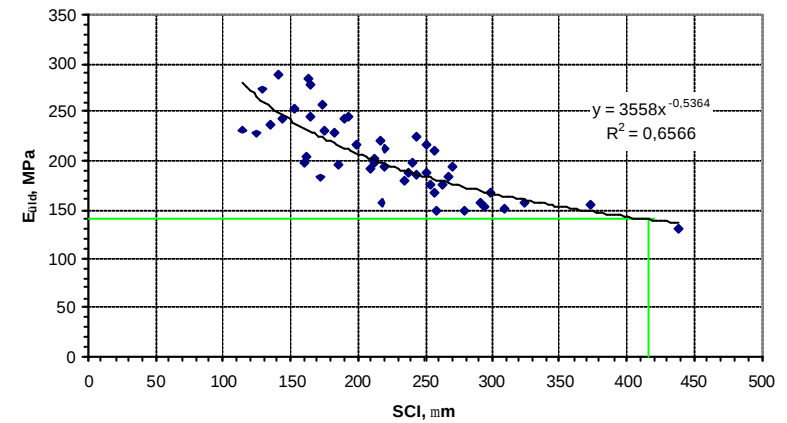
Mustkattega teed, defektideta, <30 normtelge/ööp



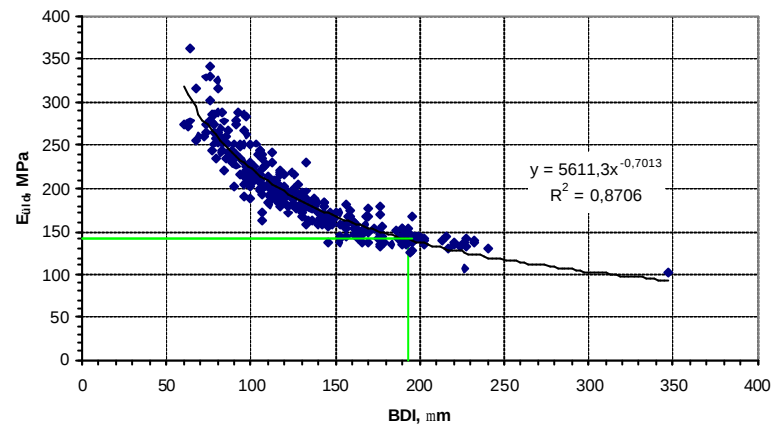
TAB-kate ol.ol. kattele, defektidega, <30 normtelge/ööp



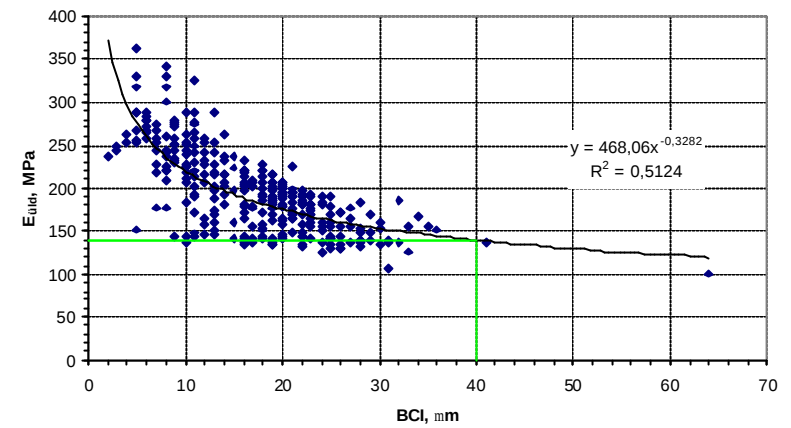
Mustkattega teed, defektidega, <30 normtelge/ööp



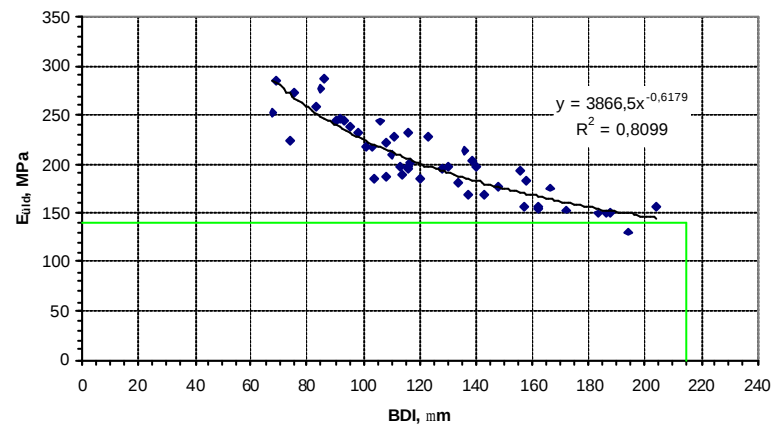
Mustkattega teed, defektideta, <30 normtelge/ööp



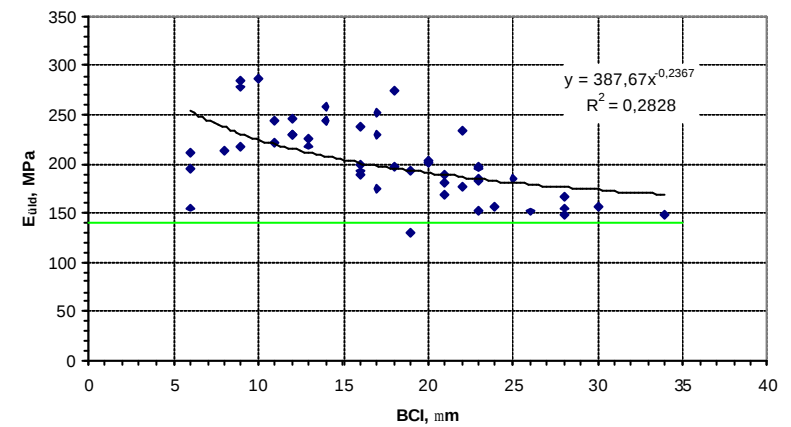
Mustkattega teed, defektideta, <30 normtelge/ööp



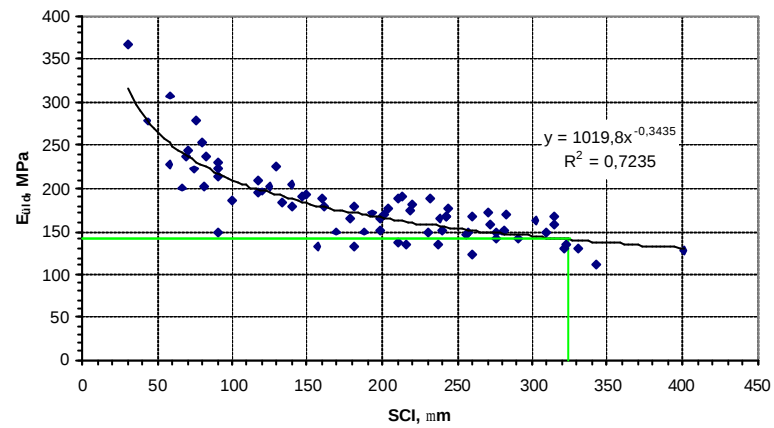
Mustkattega teed, defektidega, <30 normtelge/ööp



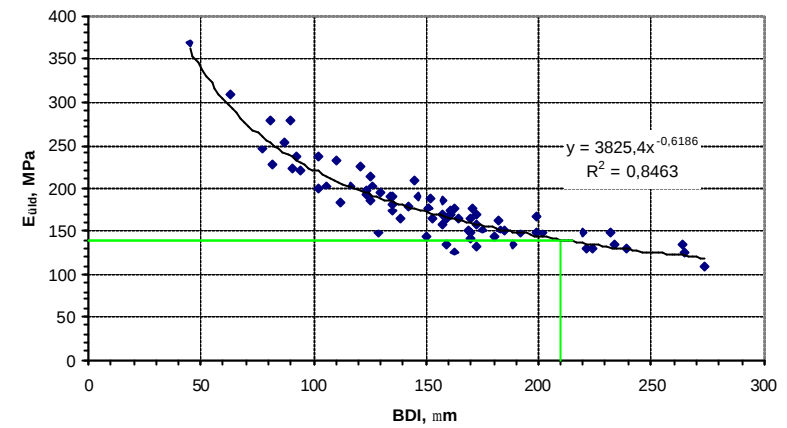
Mustkattega teed, defektidega, <30 normtelge/ööp



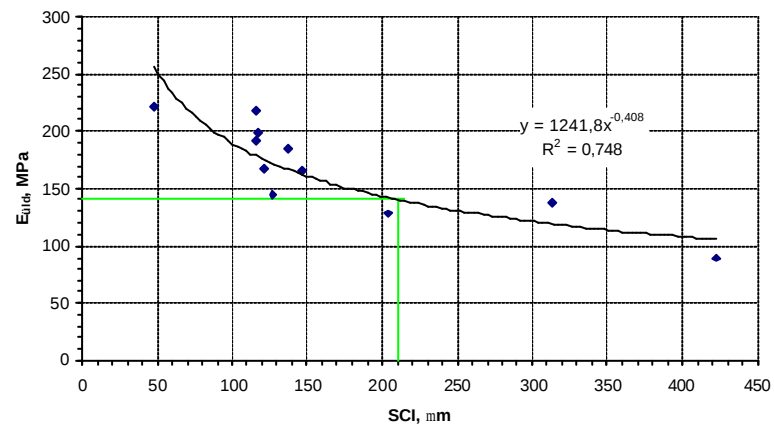
Tuhkbetoonkattega teed, defektideta, <30 normtelge/ööp



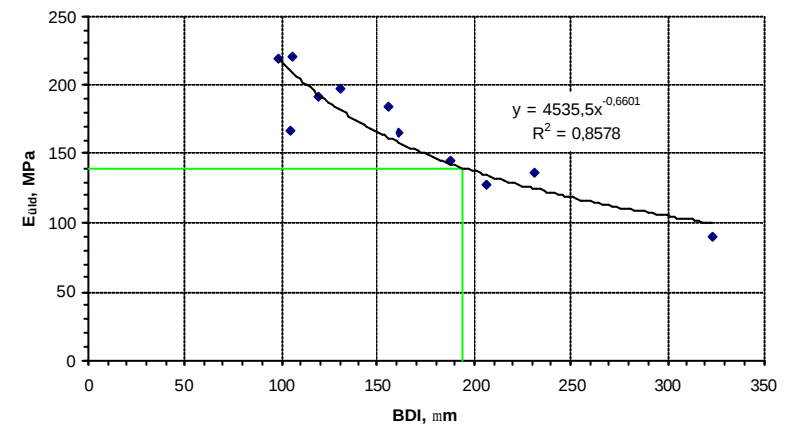
Tuhkbetoonkattega teed, defektideta, <30 normtelge/ööp



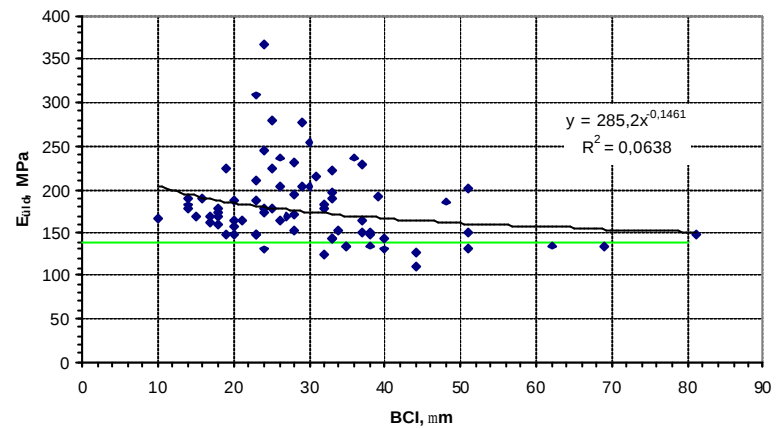
Tuhkbetoonkattega teed, defektidega, <30 normtelge/ööp



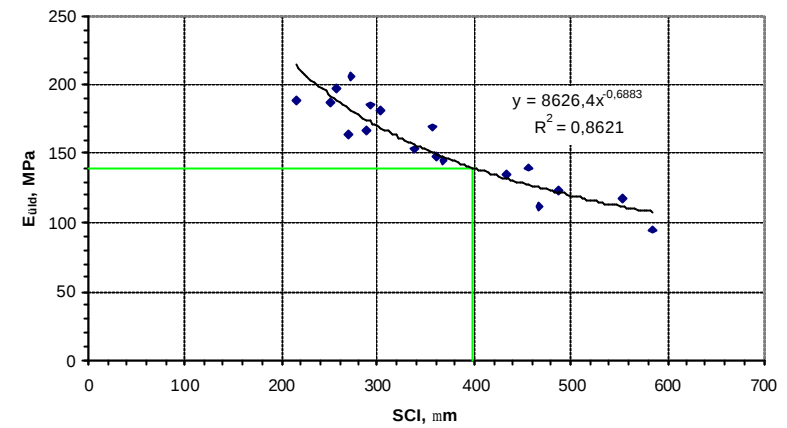
Tuhkbetoonkattega teed, defektidega, <30 normtelge/ööp



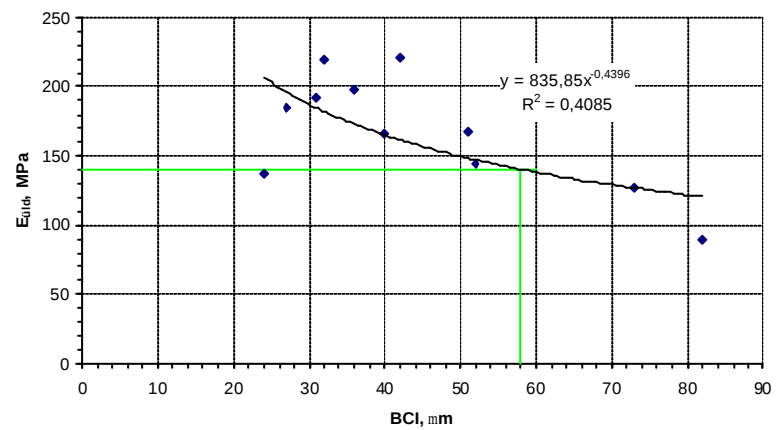
Tuhkbetoonkattega teed, defektideta, <30 normtelge/ööp



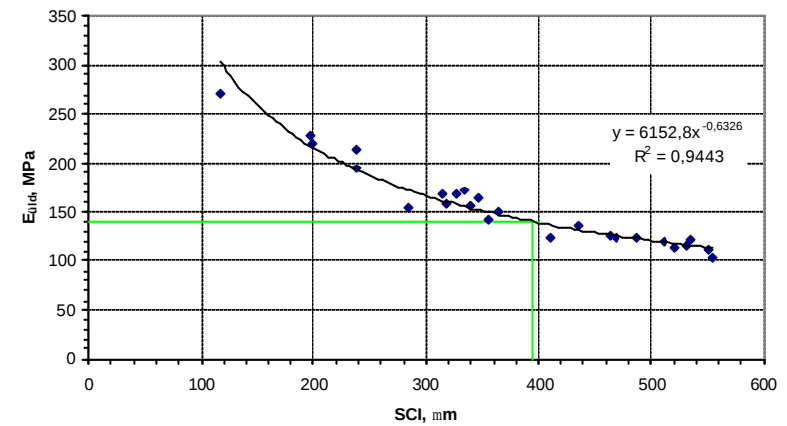
Pinnatud kruusateed, defektideta, <30 normtelge/ööp



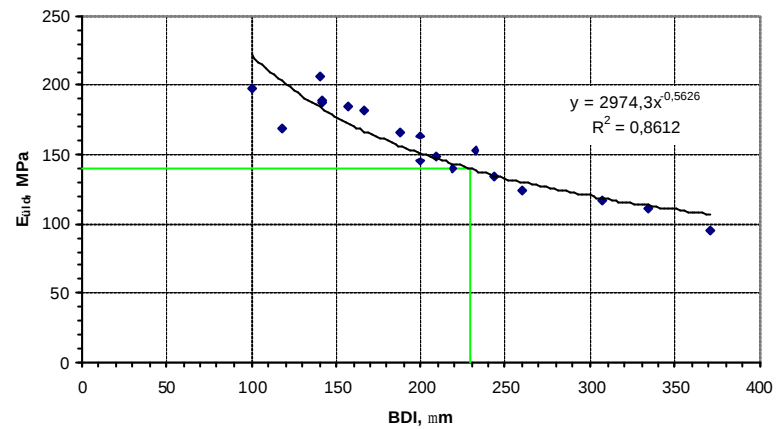
Tuhkbetoonkattega teed, defektidega, <30 normtelge/ööp



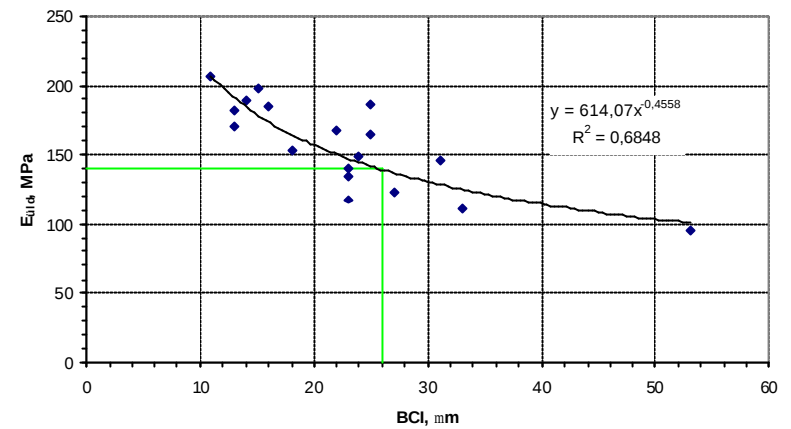
Pinnatud kruusateed, defektidega, <30 normtelge/ööp



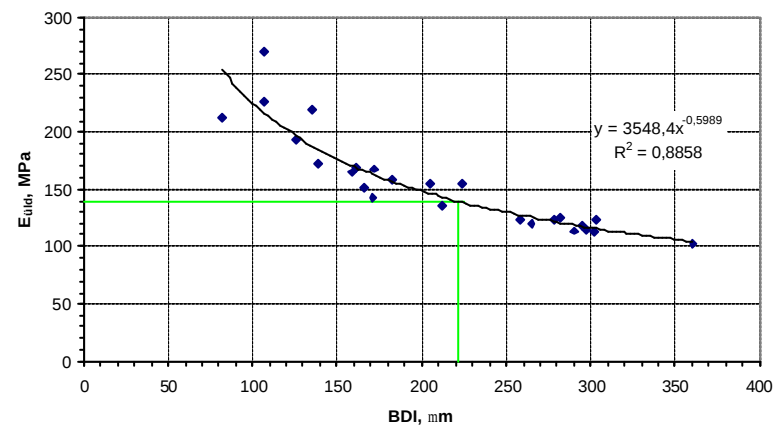
Pinnatud kruusateed, defektideta, <30 normtelge/ööp



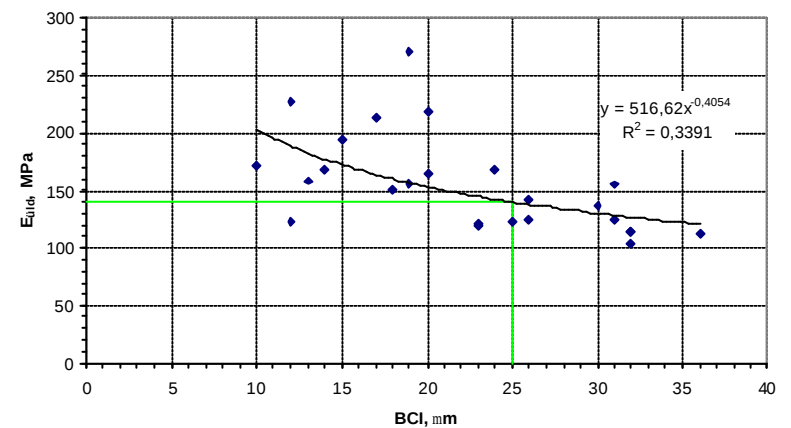
Pinnatud kruusateed, defektideta, <30 normtelge/ööp



Pinnatud kruusateed, defektidega, <30 normtelge/ööp

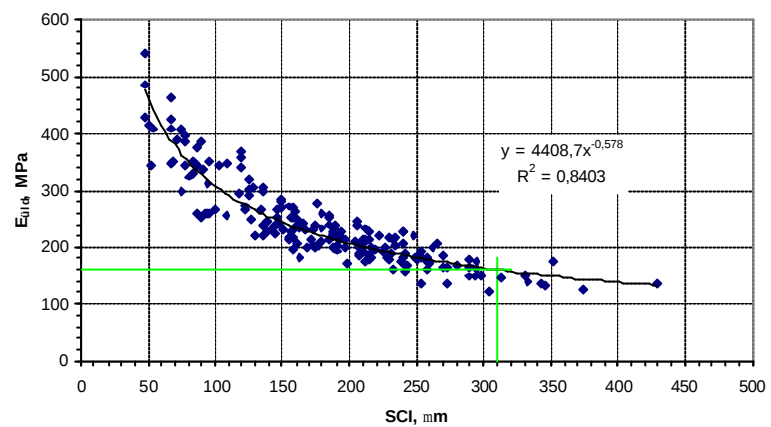


Pinnatud kruusateed, defektidega, <30 normtelge/ööp

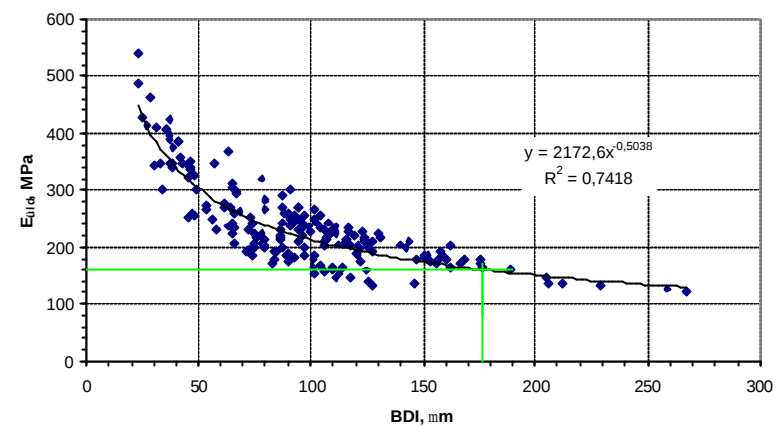


LISA B ANALÜÜSIGRUPP 2 – GRAAFIKUD

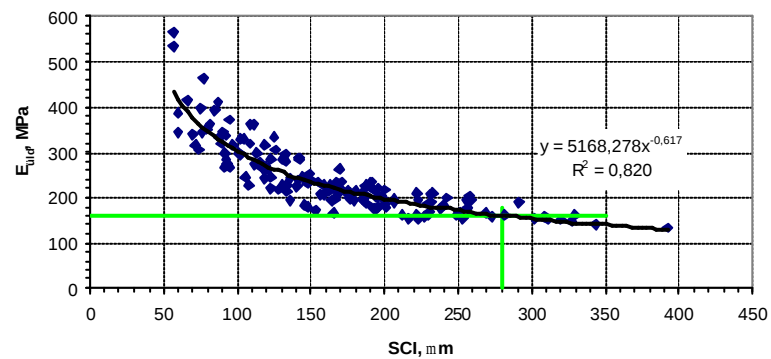
TAB-kattega defektideta teed, 30-59 normtelge/ööp



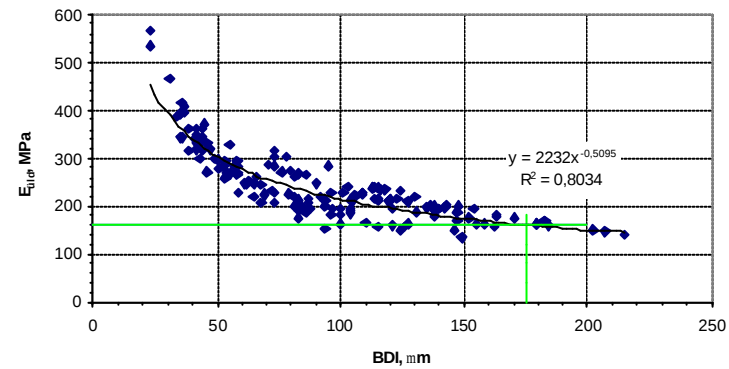
TAB-kattega defektideta teed, 30-59 normtelge/ööp



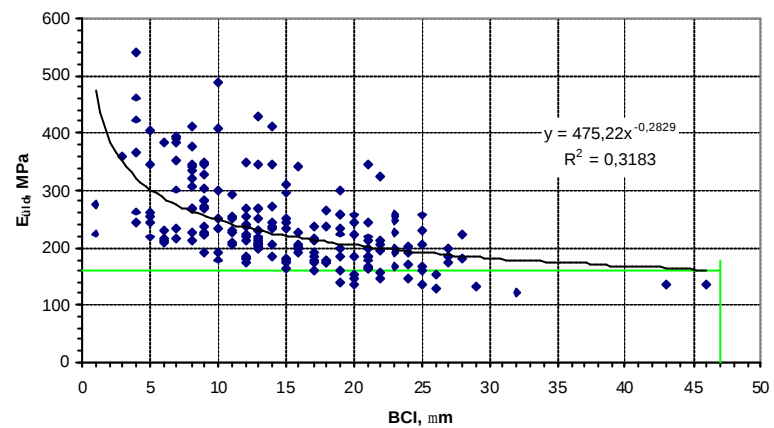
TAB-kattega defektidega teed, 30-59 normtelge/ööp



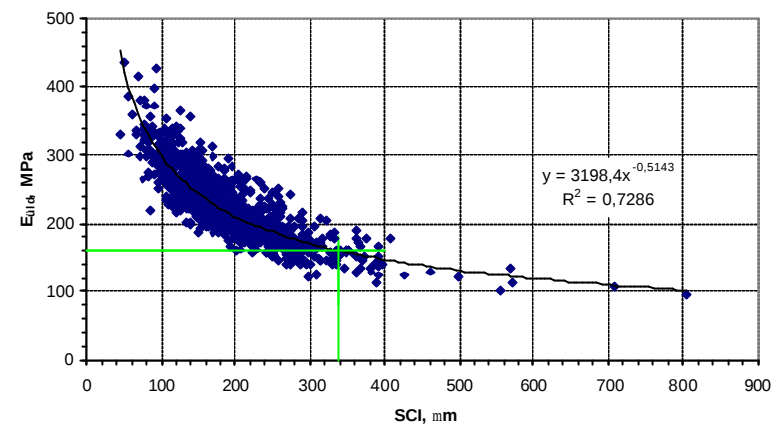
TAB-kattega teed, 30-59 normtelge/ööp



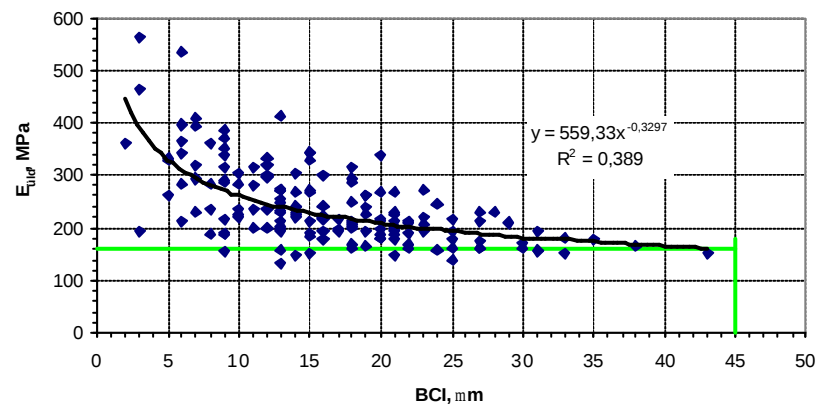
TAB-kattega defektideta teed, 30-59 normtelge/ööp



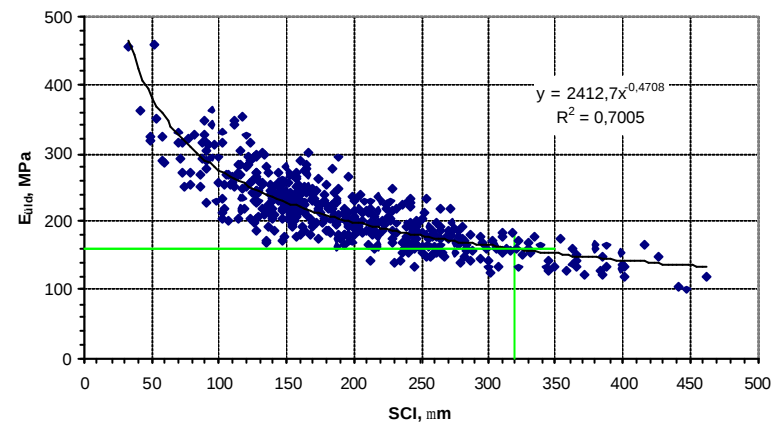
Mustkattega defektideta teed, 30-59 normtelge/ööp



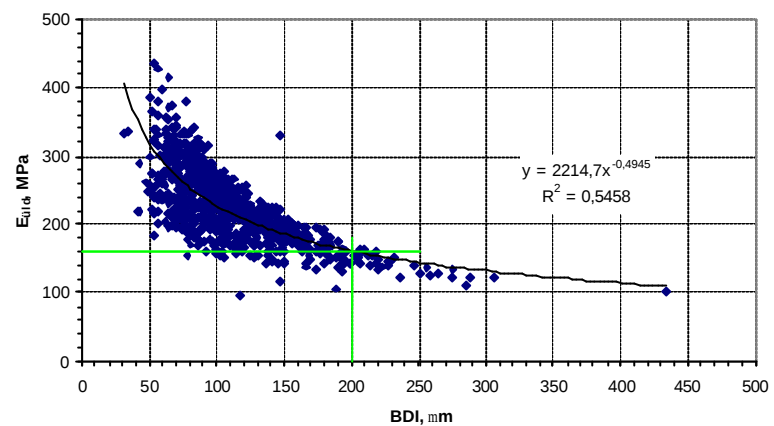
TAB-kattega defektidega teed, 30-59 normtelge/ööp



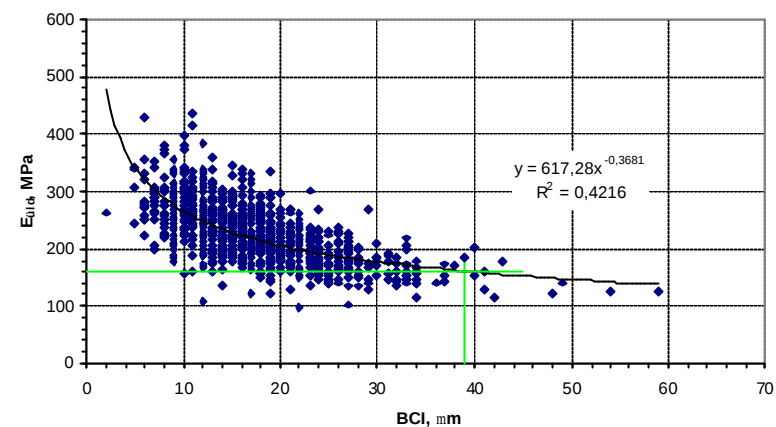
Mustkattega defektidega teed, 30-59 normtelge/ööp



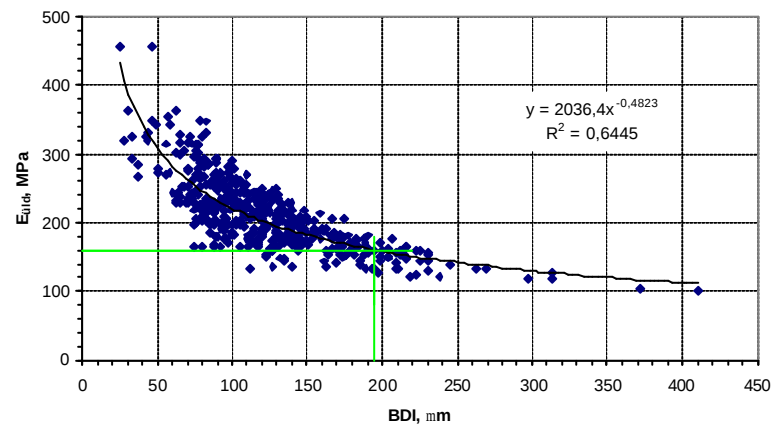
Mustkattega defektideta teed, 30-59 normtelge/ööp



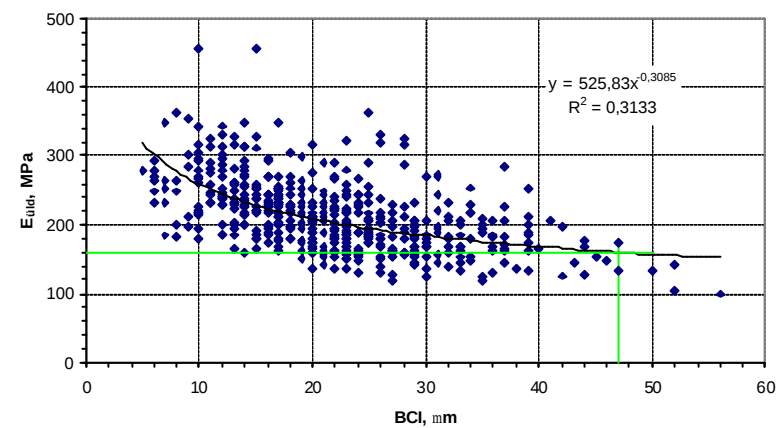
Mustkattega defektideta teed, 30-59 normtelge/ööp



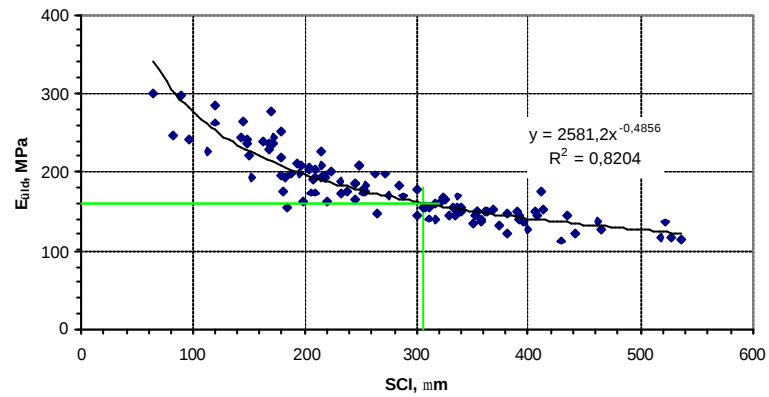
Mustkattega defektidega teed, 30-59 normtelge/ööp



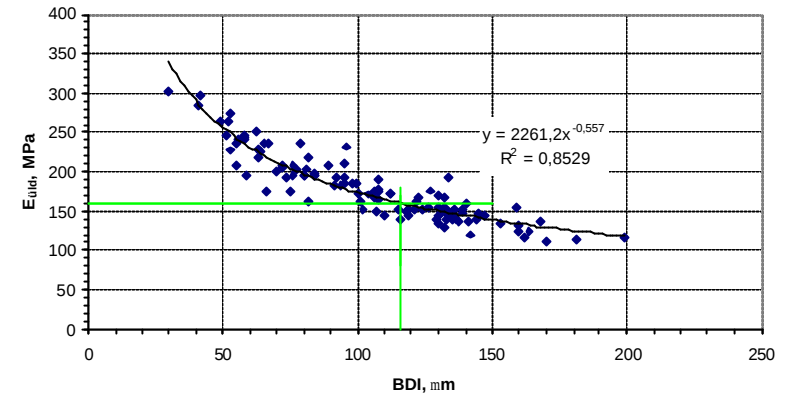
Mustkattega defektidega teed, 30-59 normtelge/ööp



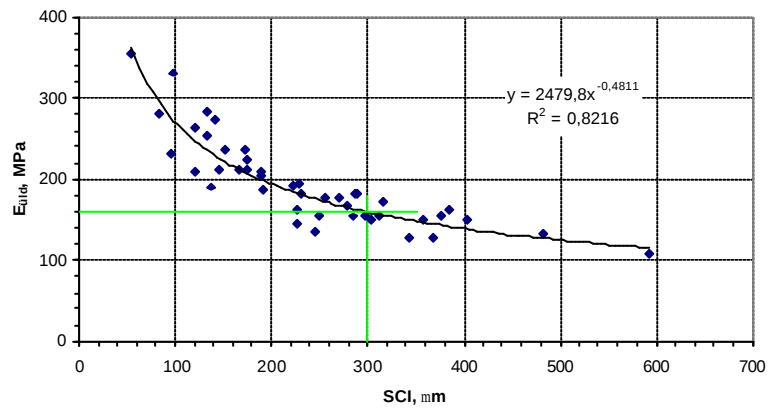
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektideta teed, 30-59
normtelge/ööp



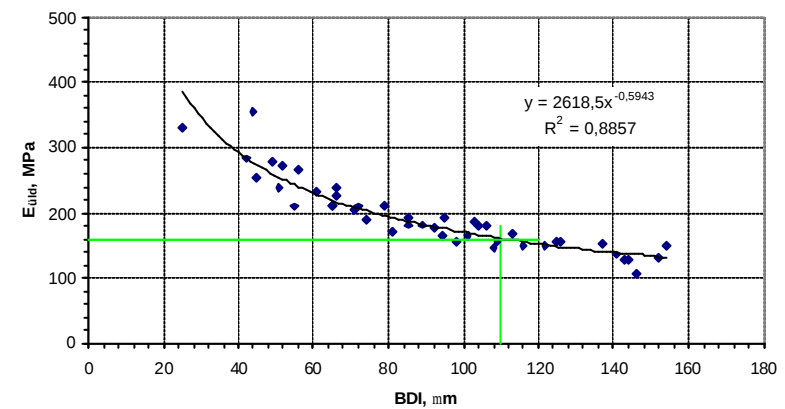
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektideta teed, 30-59
normtelge/ööp



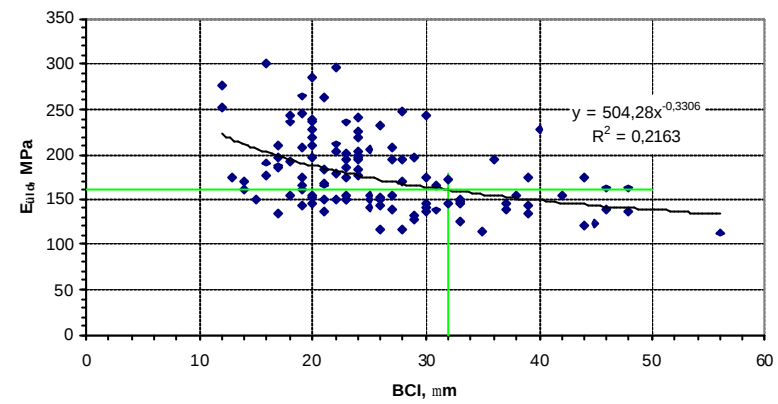
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektidega teed, 30-59
normtelge/ööp



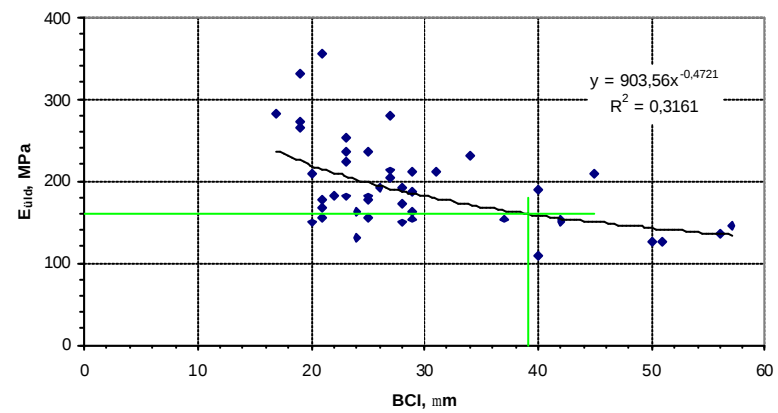
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektidega teed, 30-59
normtelge/ööp



(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektideta teed, 30-59
normtelge/ööp

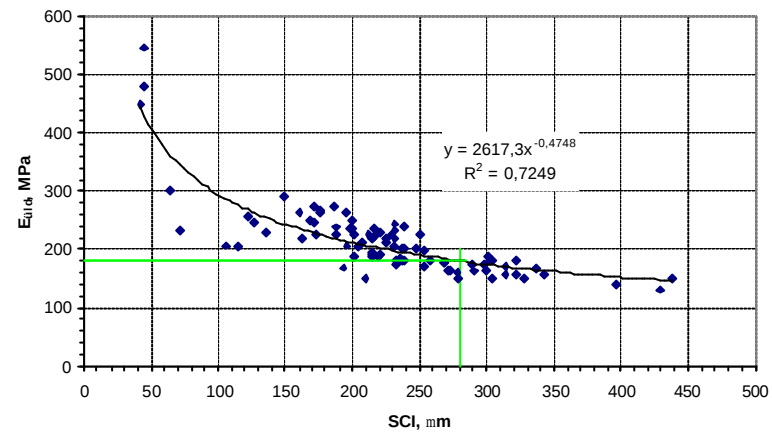


(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektidega teed, 30-59
normtelge/ööp

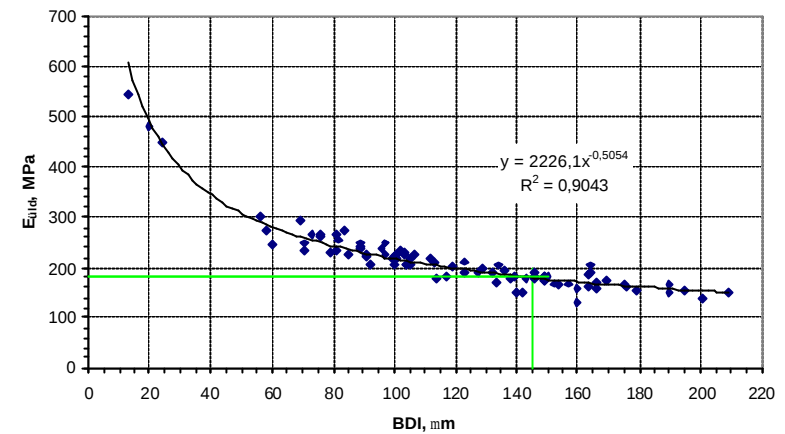


LISA C ANALÜÜSIGRUPP 3 – GRAAFIKUD

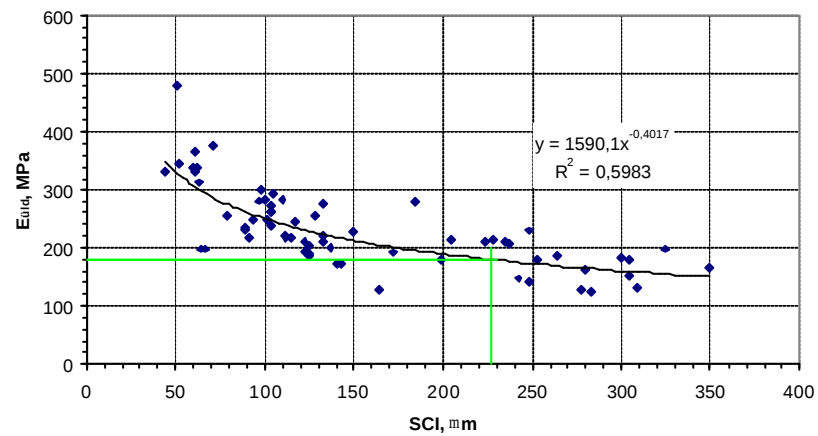
TAB-kate ol.ol. kattede, defektideta, 60-114 normtelge/ööp



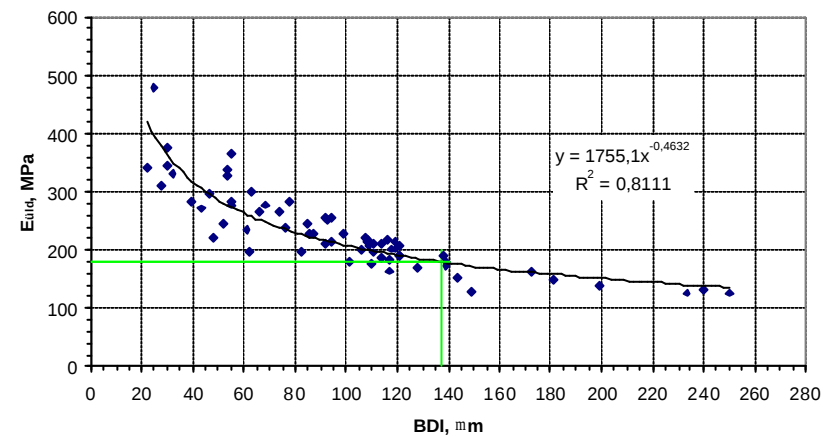
TAB-kate ol.ol. kattede, defektideta, 60-114 normtelge/ööp



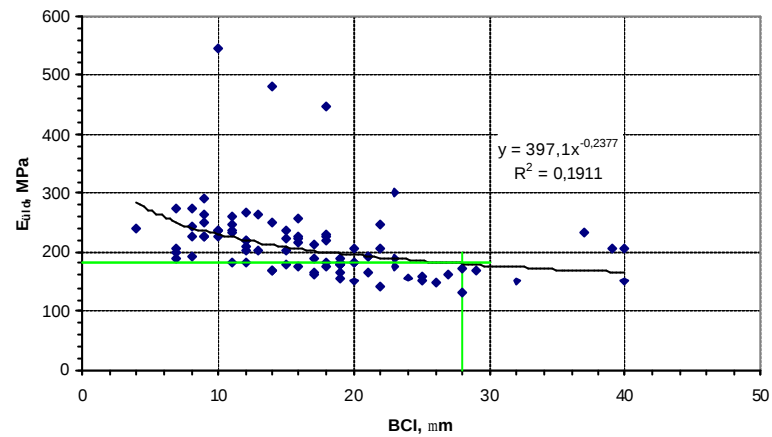
TAB-kate ol.ol.kattel, defektidega, 60-114 normtelge/ööp



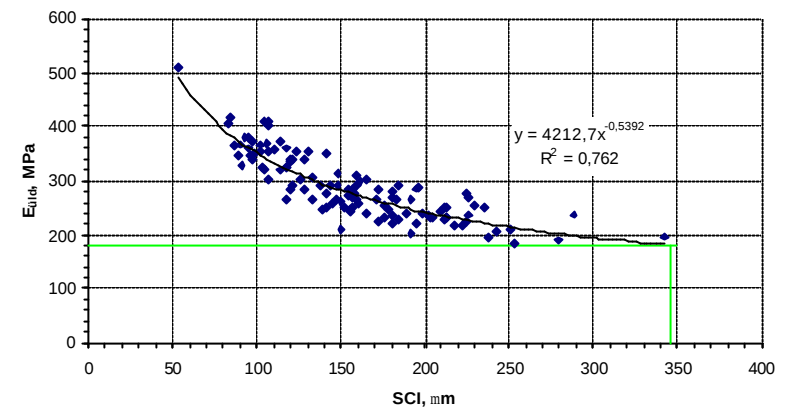
TAB-kate ol.ol.kattel, defektidega, 60-114 normtelge/ööp



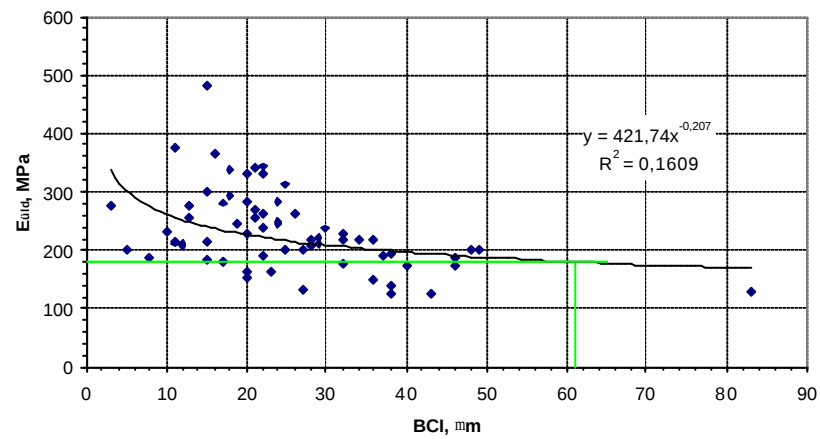
TAB-kate ol.ol. kattele, defektideta, 60-114 normtelge/ööp



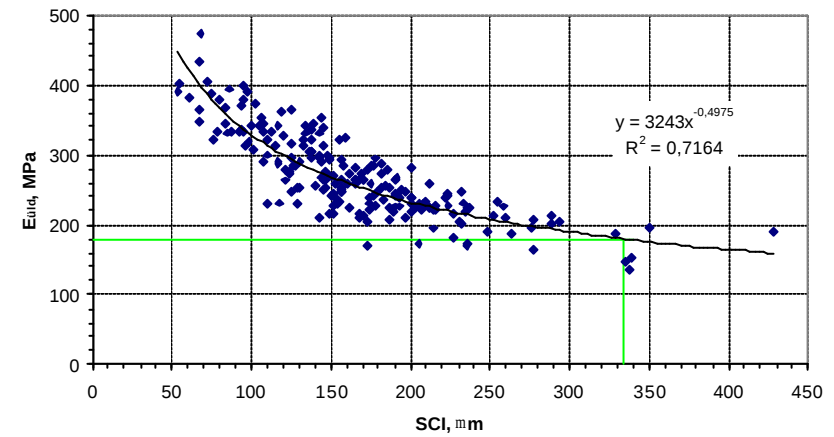
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta teed, 60-114 normtelge/ööp



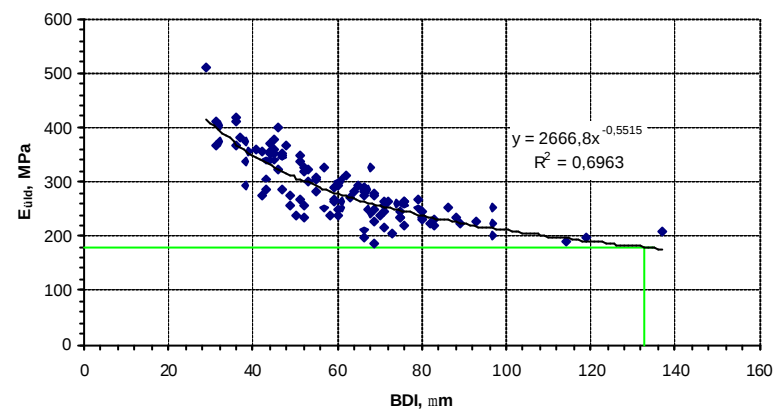
TAB-kate ol.ol.kattel, defektidega, 60-114 normtelge/ööp



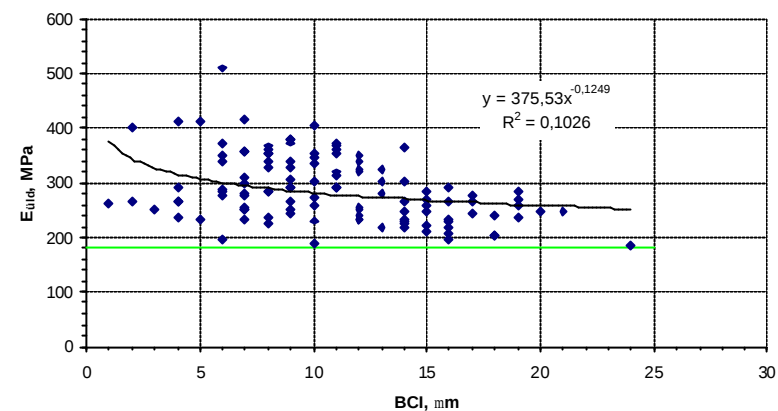
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega, 60-114 normtelge/ööp



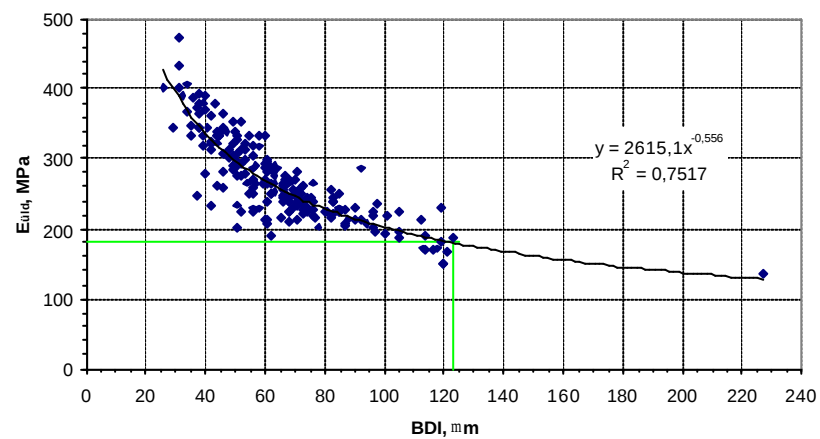
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



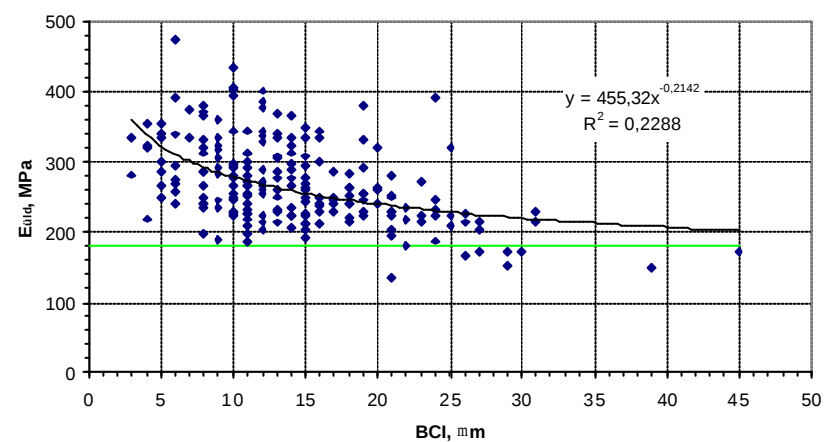
TAB-kattega tasanduskihiga, defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



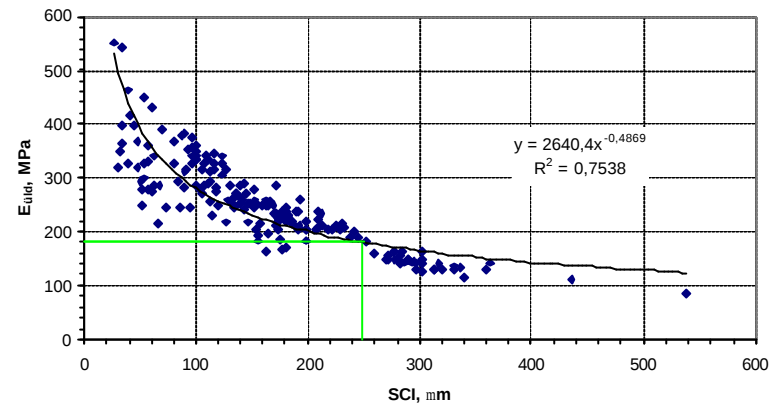
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega, 60-114 normtelge/ööp



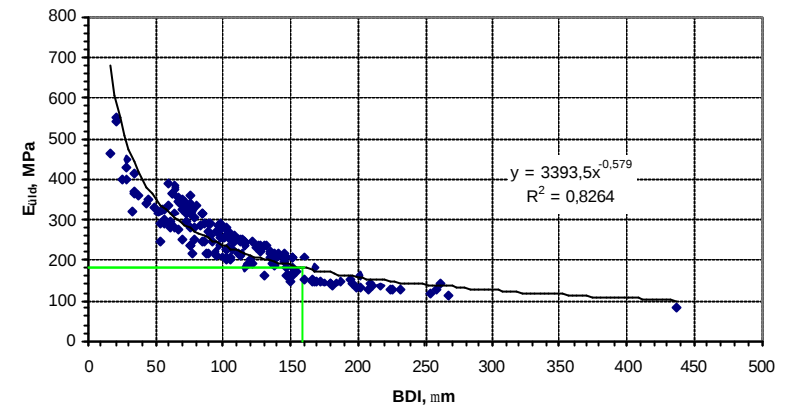
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega, 60-114 normtelge/ööp



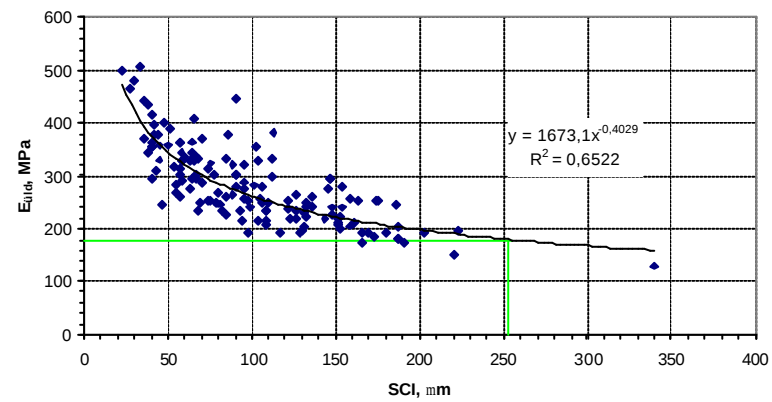
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta,
60-114 normtelge/ööp



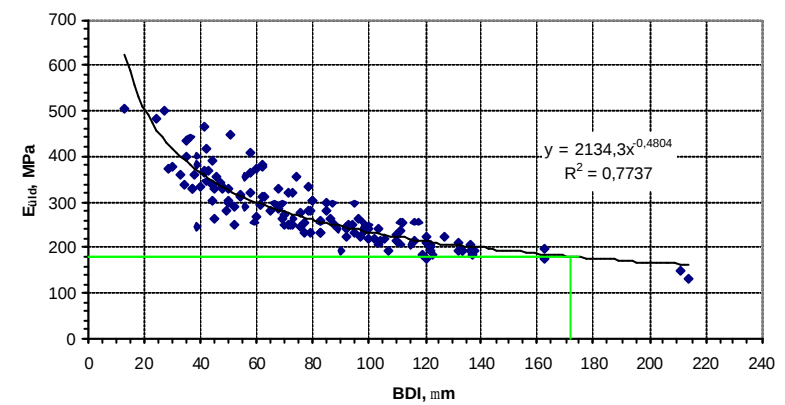
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta,
60-114 normtelge/ööp



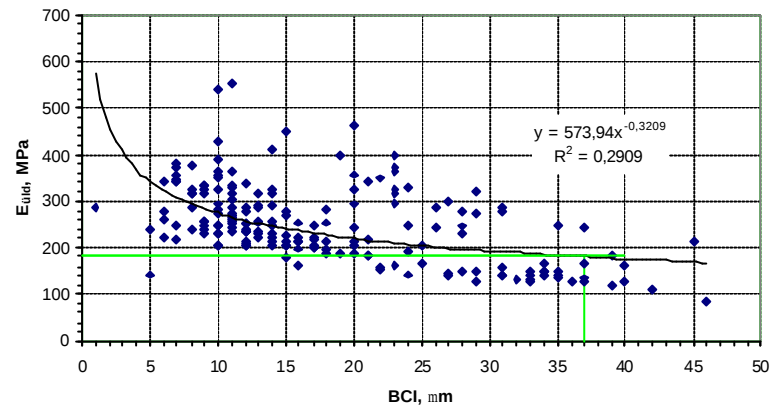
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektidega,
60-114 normtelge/ööp



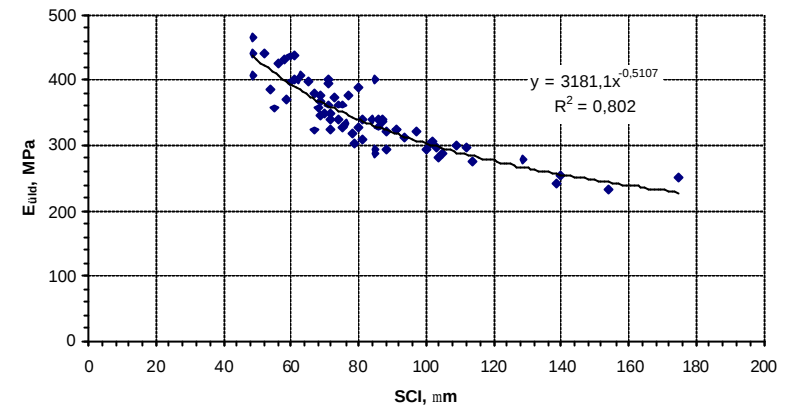
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektidega,
60-114 normtelge/ööp



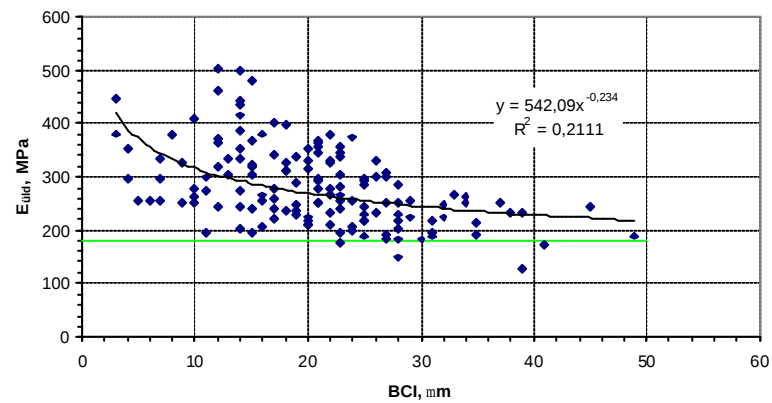
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta,
60-114 normtelge/ööp



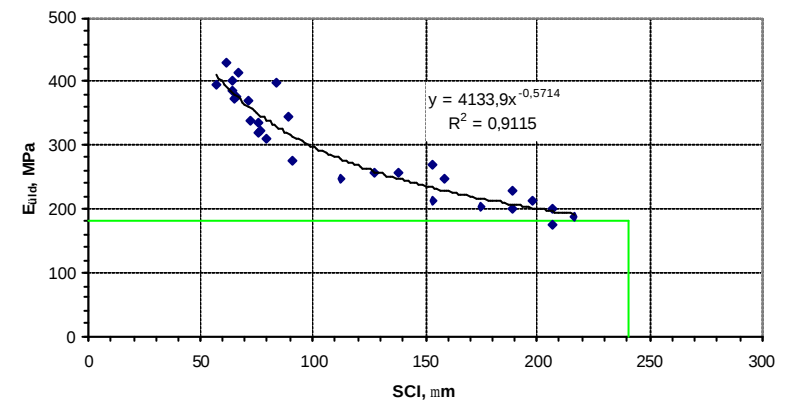
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



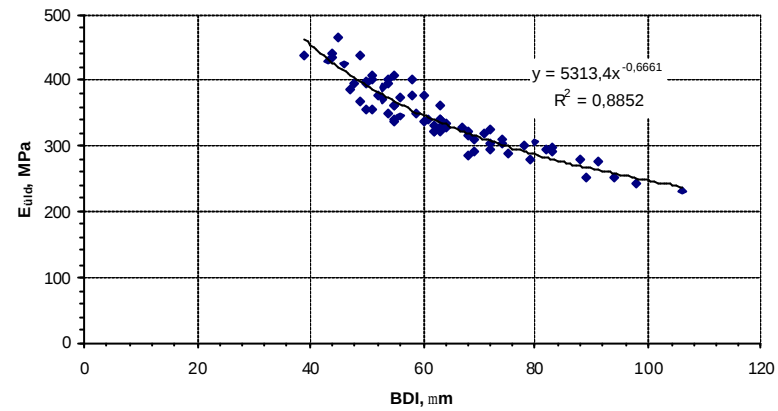
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektidega,
60-114 normtelge/ööp



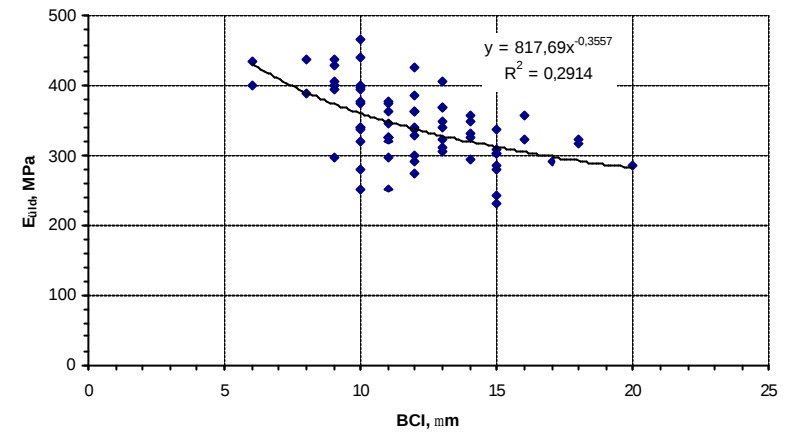
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
60-114 normtelge/ööp



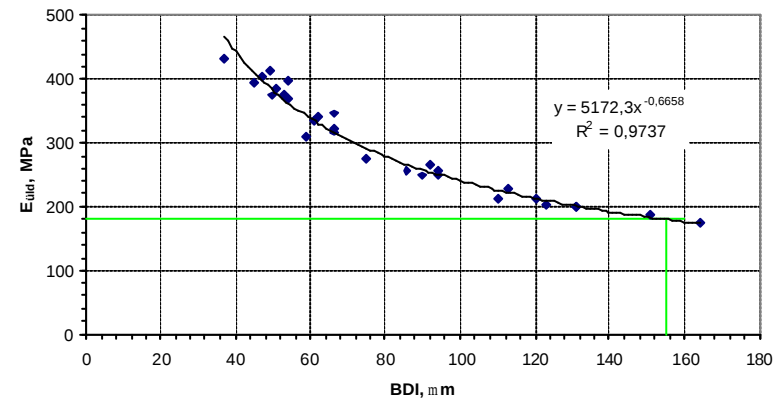
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



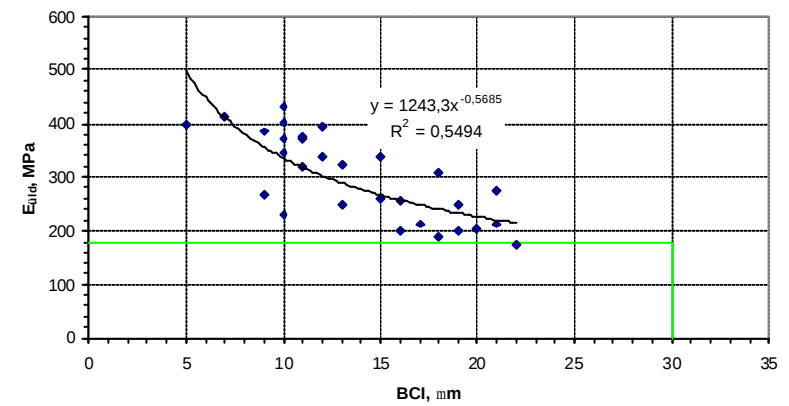
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



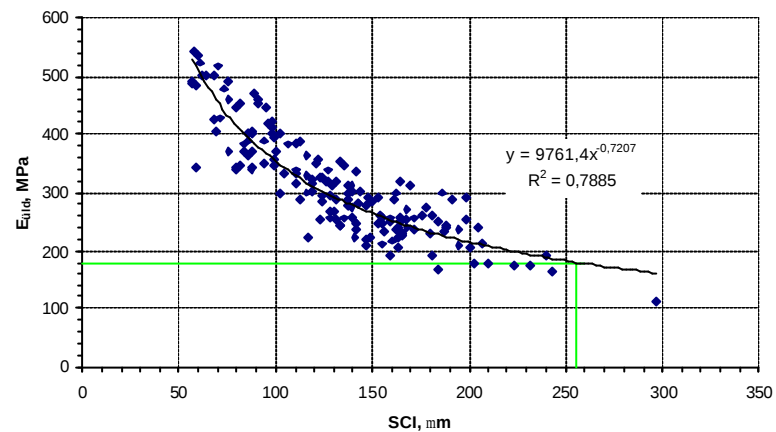
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
60-114 normtelge/ööp



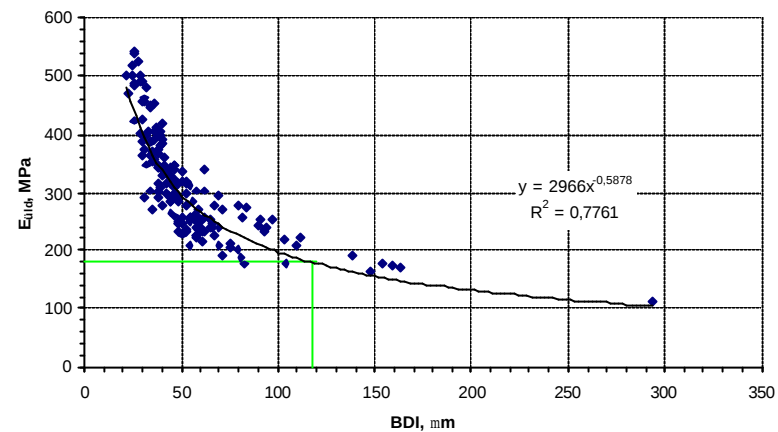
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
60-114 normtelge/ööp



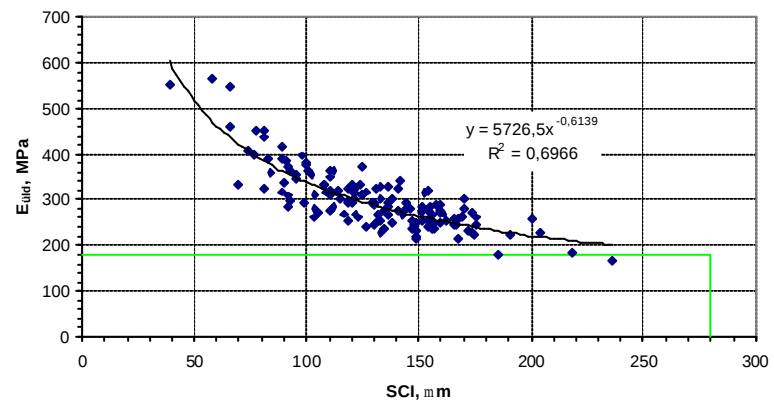
TAB-kate killustikalusega, defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



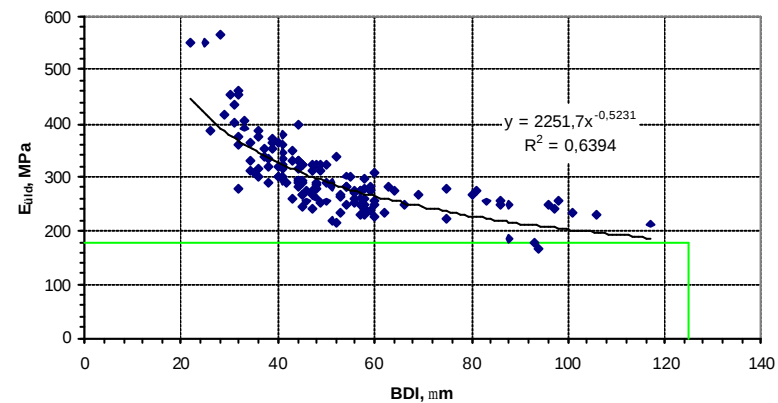
TAB-kate killustikalusega, defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



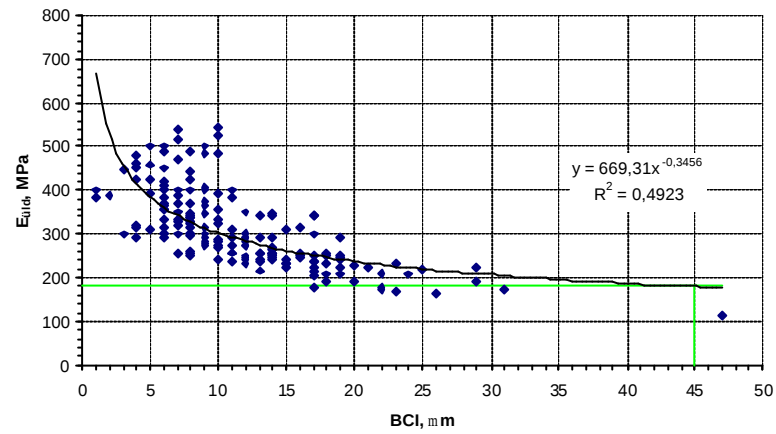
TAB-kate killustikalusega, defektidega,
60-114 normtelge/ööp



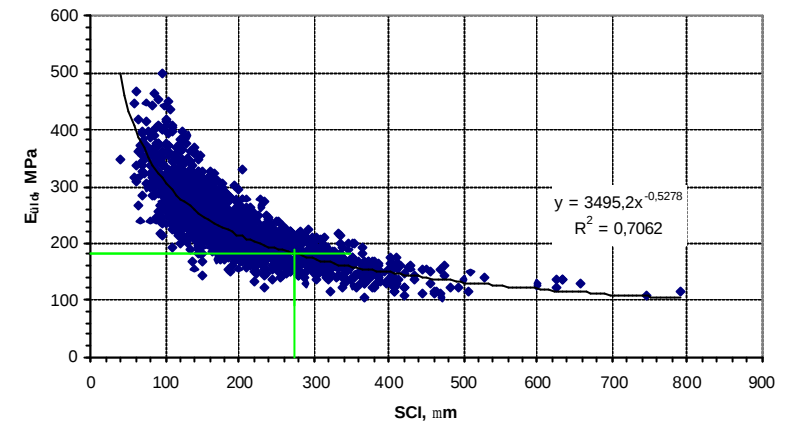
TAB-kate killustikalusega, defektidega,
60-114 normtelge/ööp



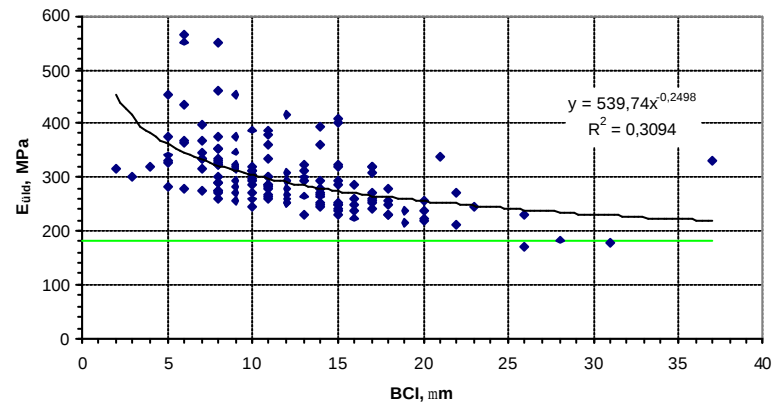
TAB-kate killustikalusega, defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



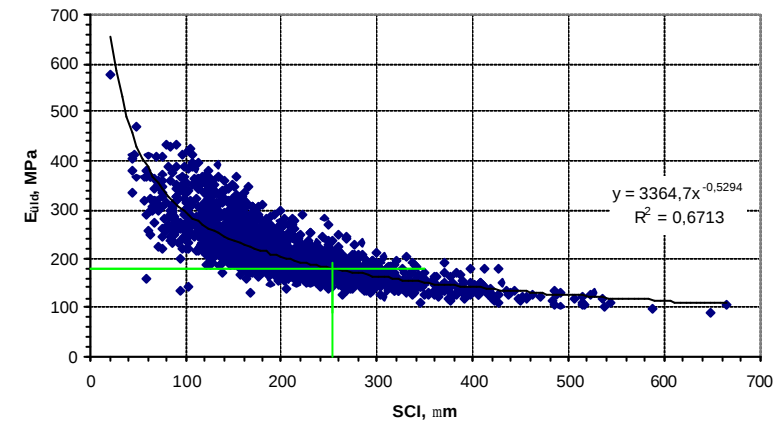
Mustkattedega defektideta teed, 60-114 normtelge/ööp



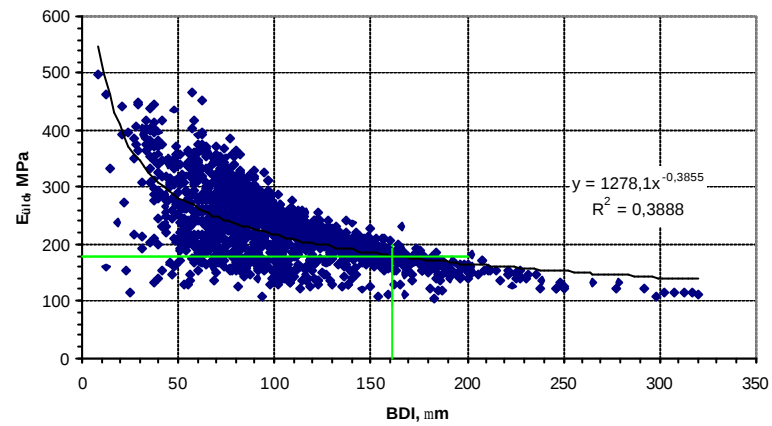
TAB-kate killustikalusega, defektidega,
60-114 normtelge/ööp



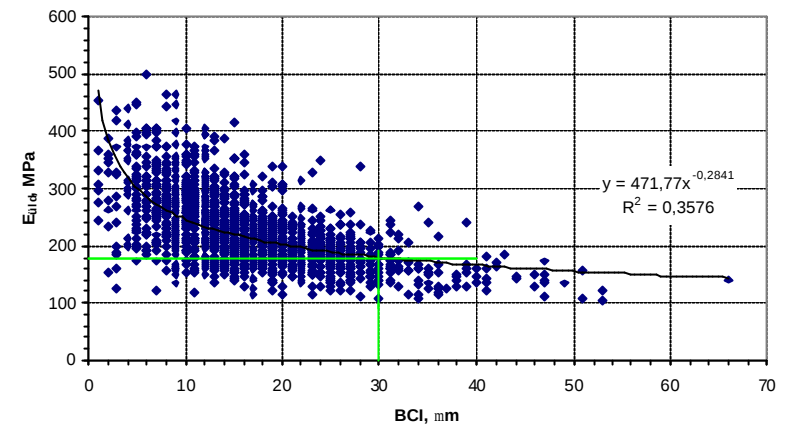
Mustkattedega defektidega teed, 60-114 normtelge/ööp



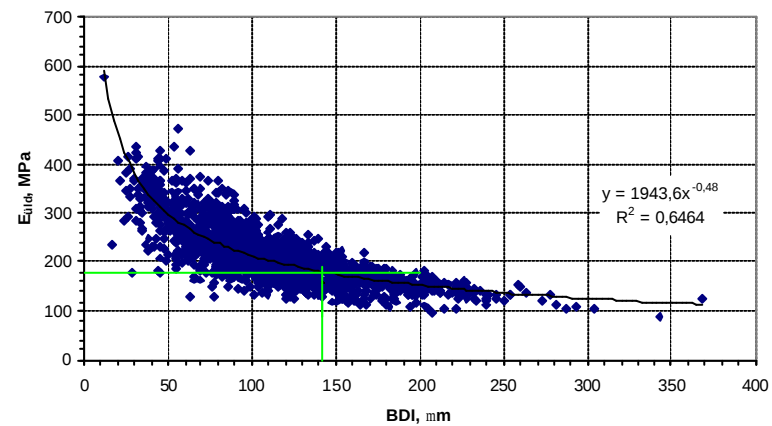
Mustkattega defektideta teed, 60-114 normtelge/ööp



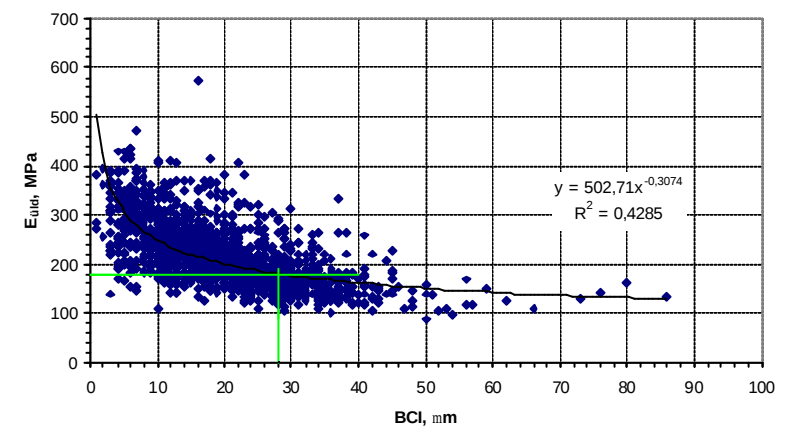
Mustkattega defektideta teed, 60-114 normtelge/ööp



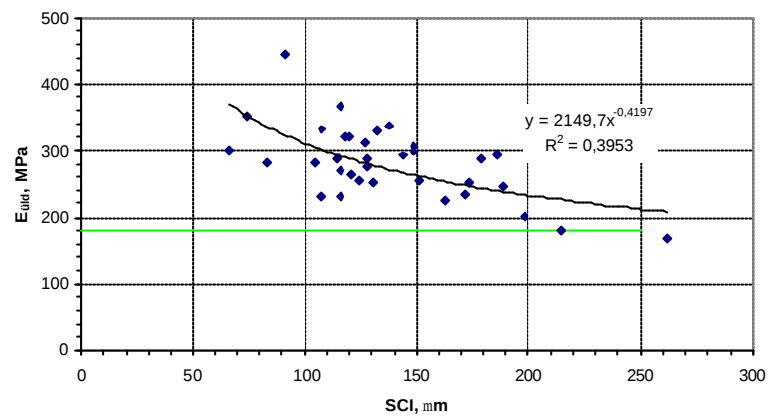
Mustkattega defektidega teed, 60-114 normtelge/ööp



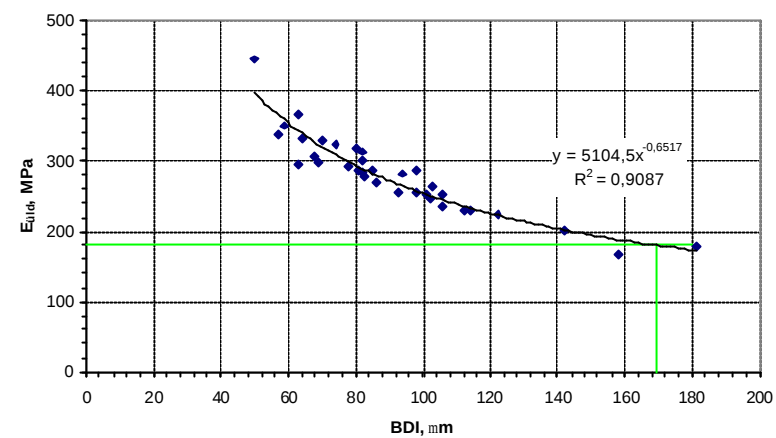
Mustkattega defektidega teed, 60-114 normtelge/ööp



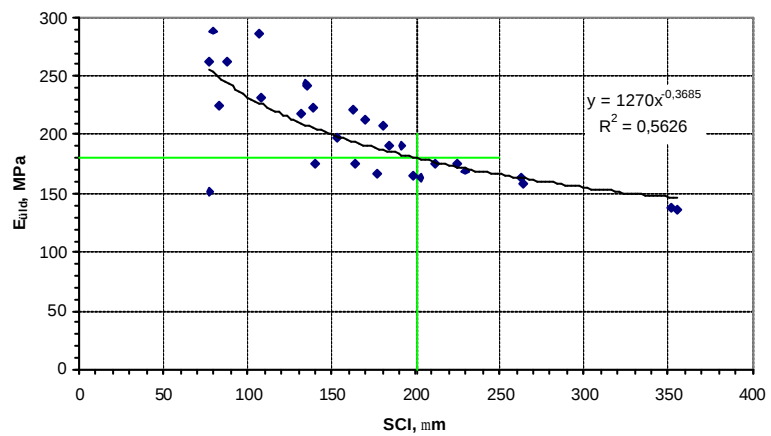
PAB-kattega defektideta tee, 60-114 normtelge/ööp



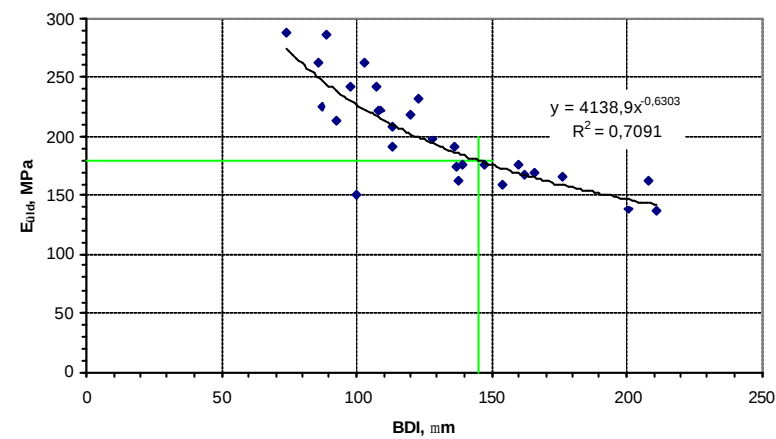
PAB-kattega defektideta tee, 60-114 normtelge/ööp



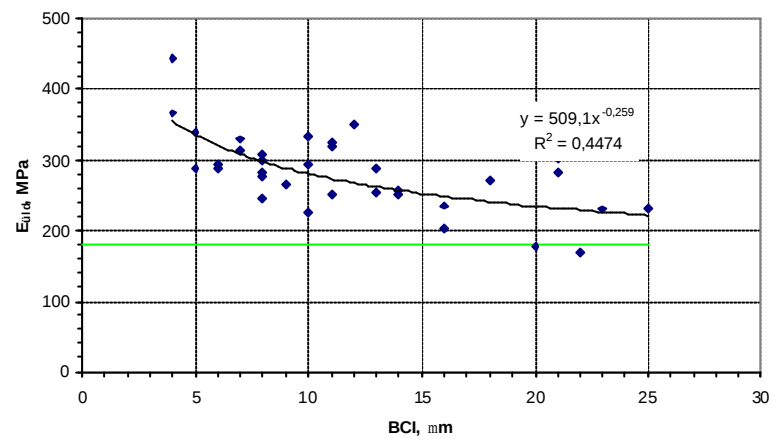
PAB-kattega defektidega teed, 60-114 normtelge/ööp



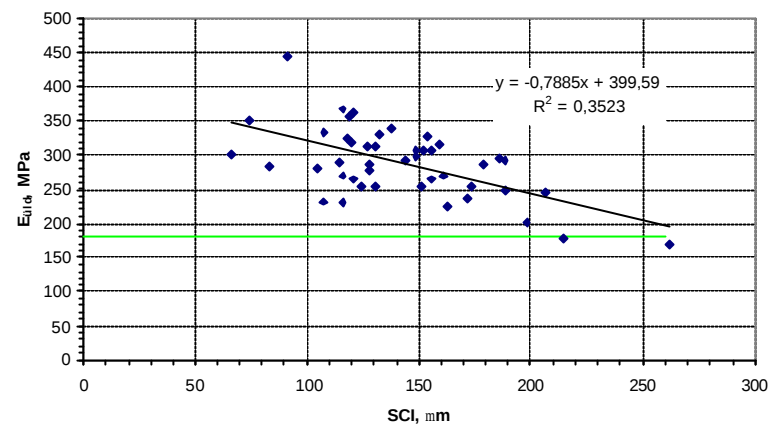
PAB-kattega defektidega teed, 60-114 normtelge/ööp



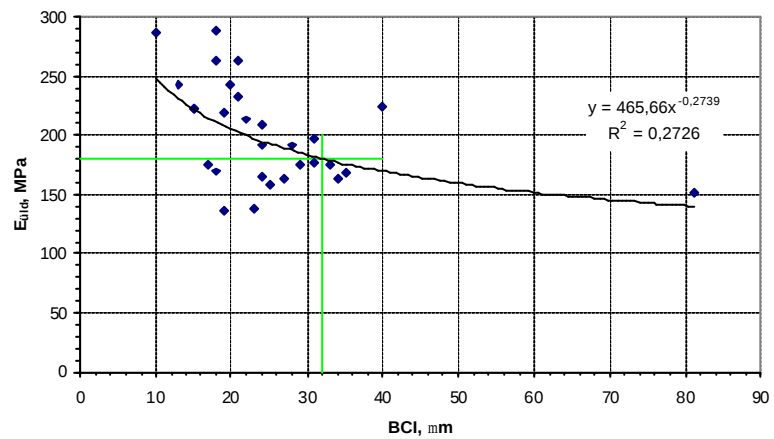
PAB-kattega defektideta tee, 60-114 normtelge/ööp



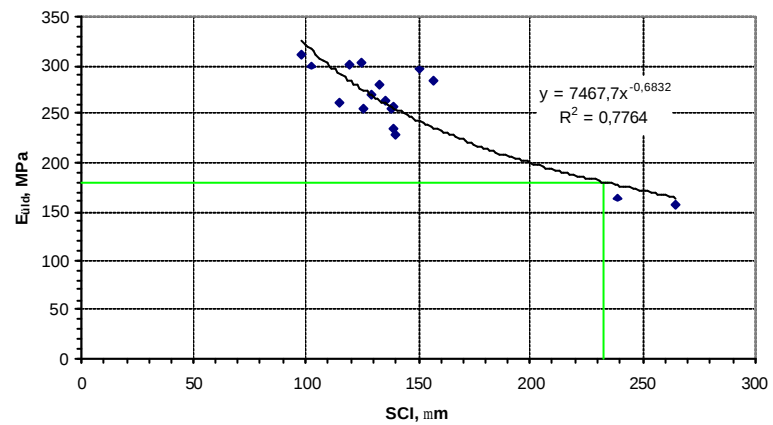
KAB-kattega defektideta teed, 60-114 MPa



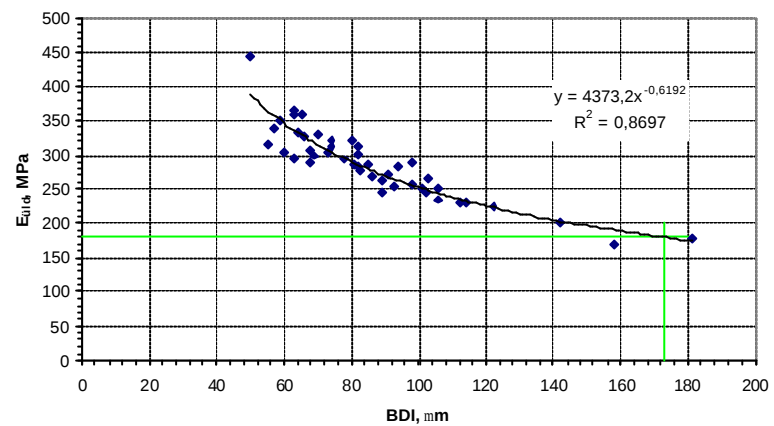
PAB-kattega defektidega teed, 60-114 normtelge/ööp



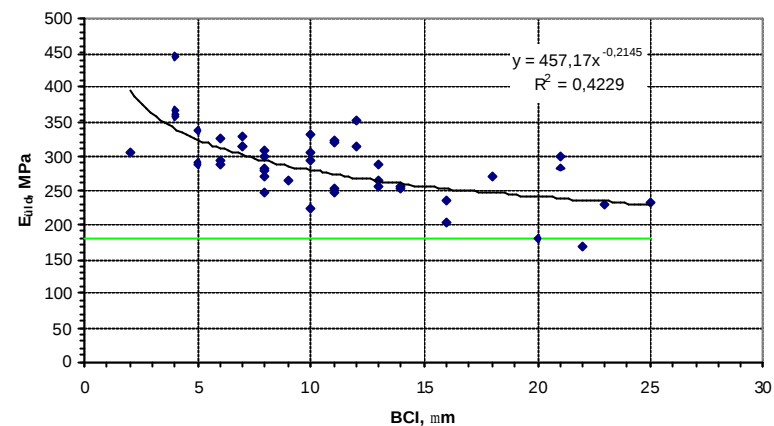
KAB-kattega defektidega teed, 60-114 normtelge/ööp



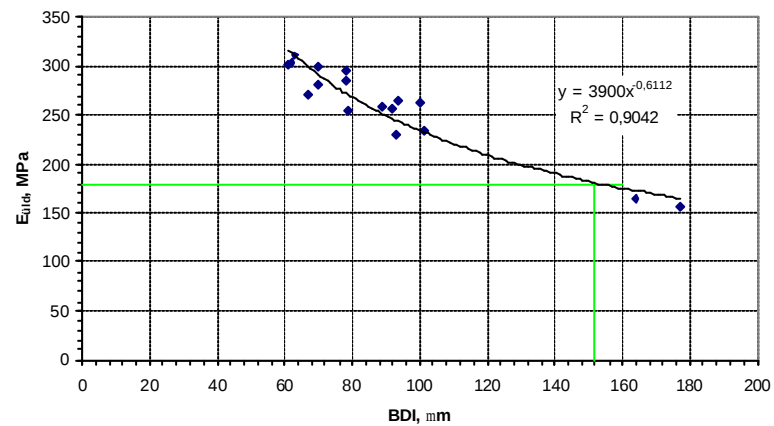
KAB-kattega defektideta teed, 60-114 MPa



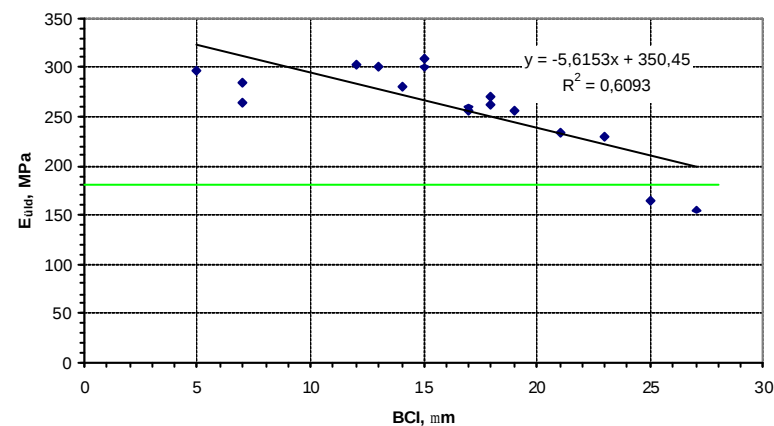
KAB-kattega defektideta teed, 60-114 MPa



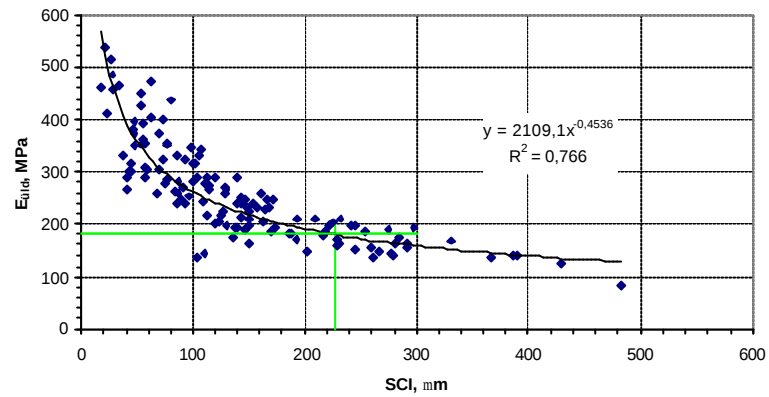
KAB-kattega defektidega teed, 60-114 normtelge/ööp



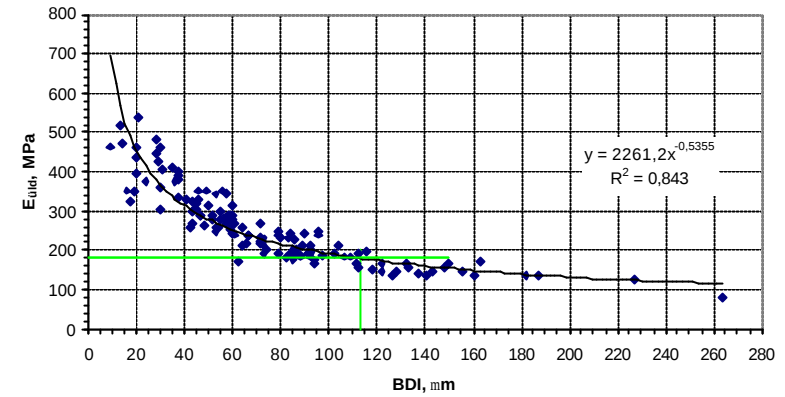
KAB-kattega defektidega teed, 60-114 normtelge/ööp



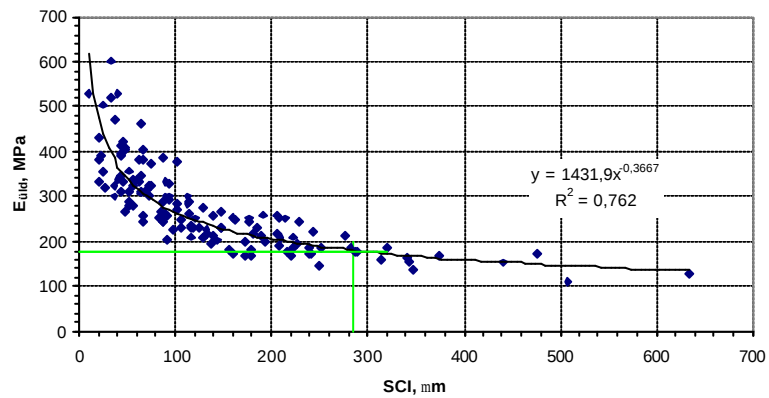
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



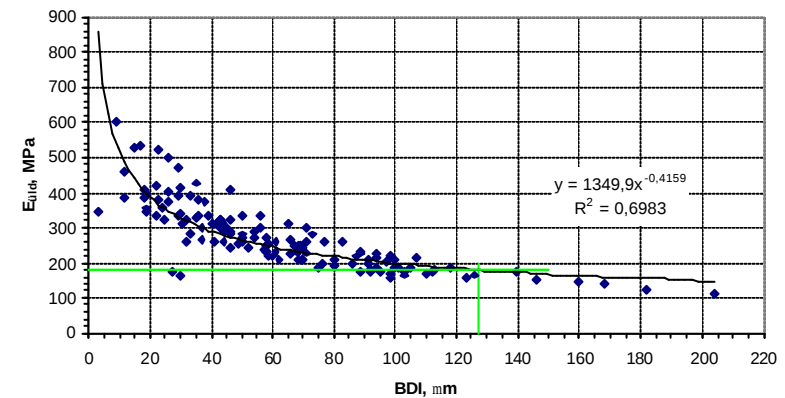
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



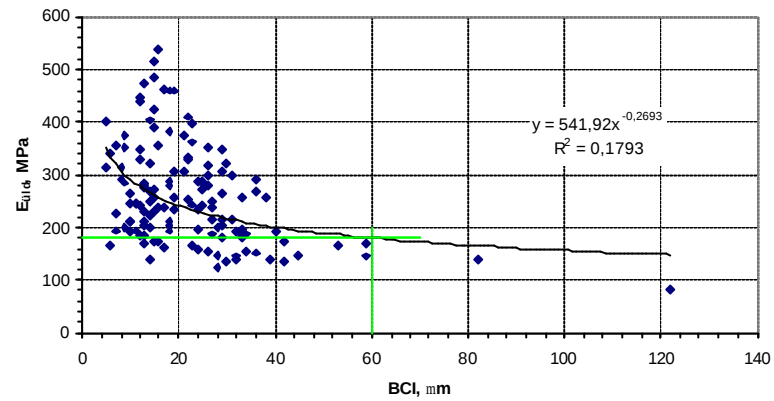
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektidega teed,
60-114 normtelge/ööp



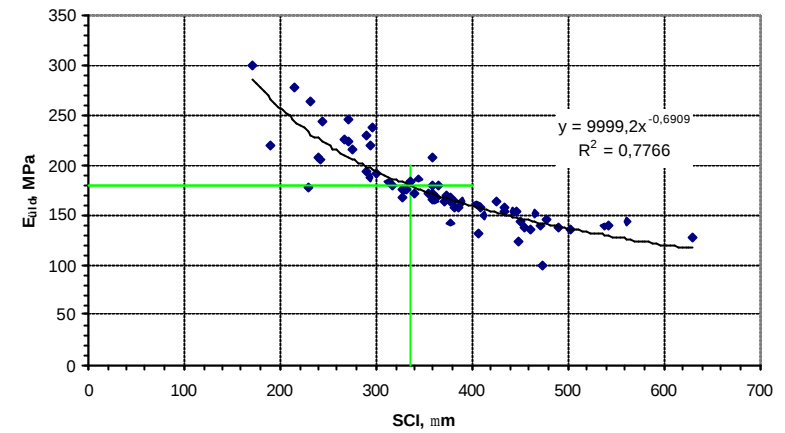
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektidega teed, 60-114
normtelge/ööp



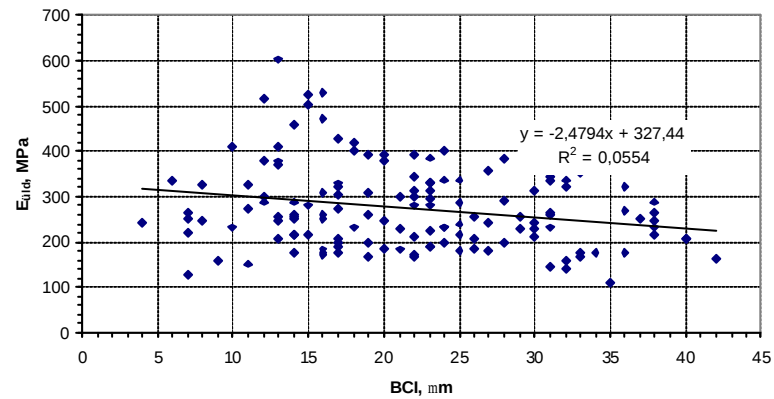
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektideta teed,
60-114 normtelge/ööp



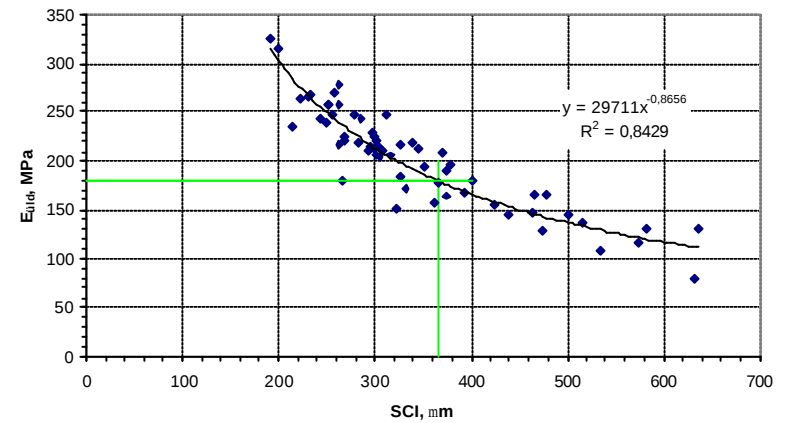
Pinnatud kruusateed, defektideta, 60-114 normtelge/ööp



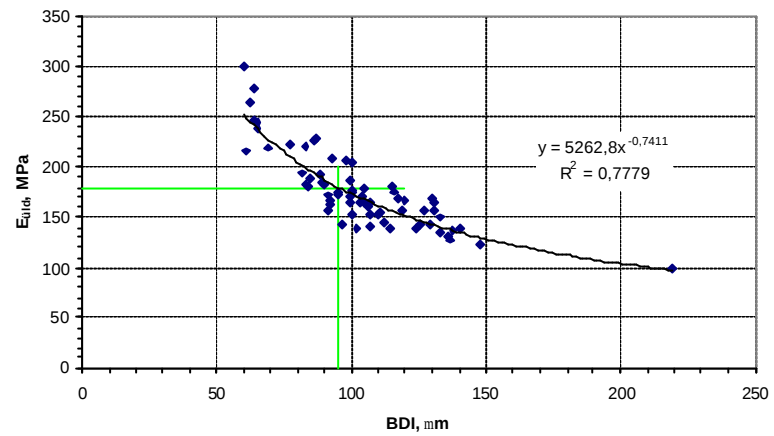
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektidega teed, 60-114
normtelge/ööp



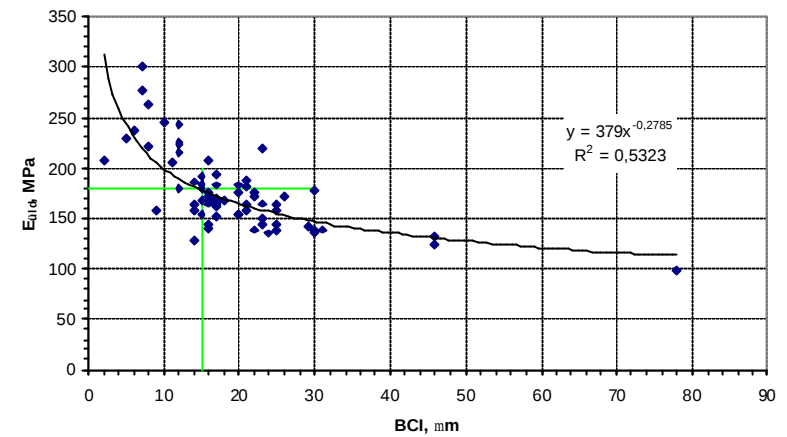
Pinnatud kruusateed, defektidega, 60-114 normtelge/ööp



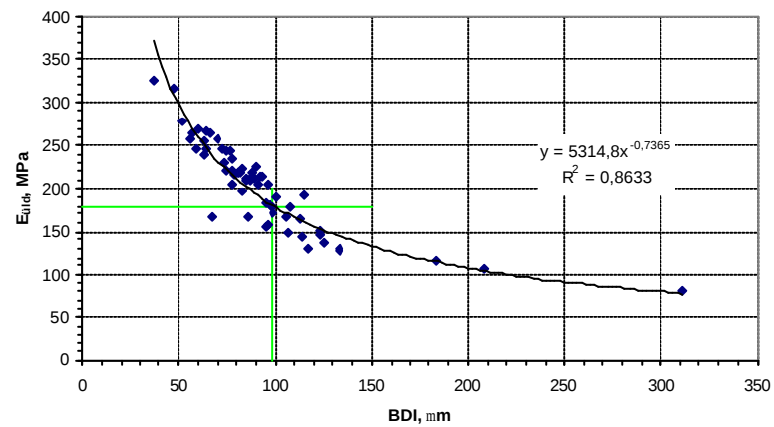
Pinnatud kruusateed, defektideta, 60-114 normtelge/ööp



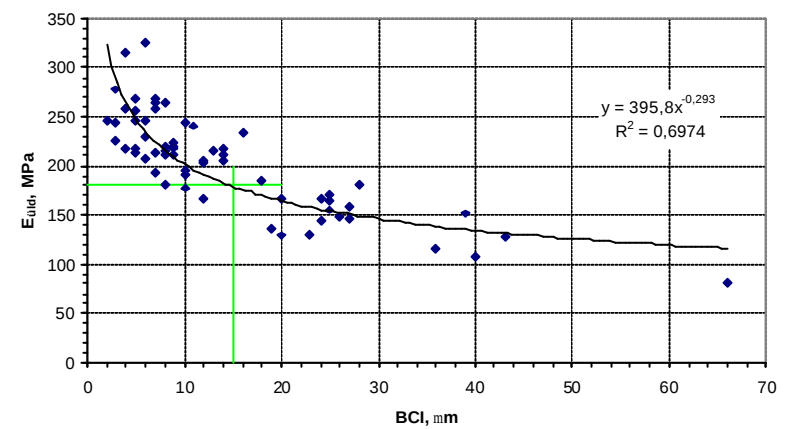
Pinnatud kruusateed, defektideta, 60-114 normtelge/ööp



Pinnatud kruusateed, defektidega, 60-114 normtelge/ööp

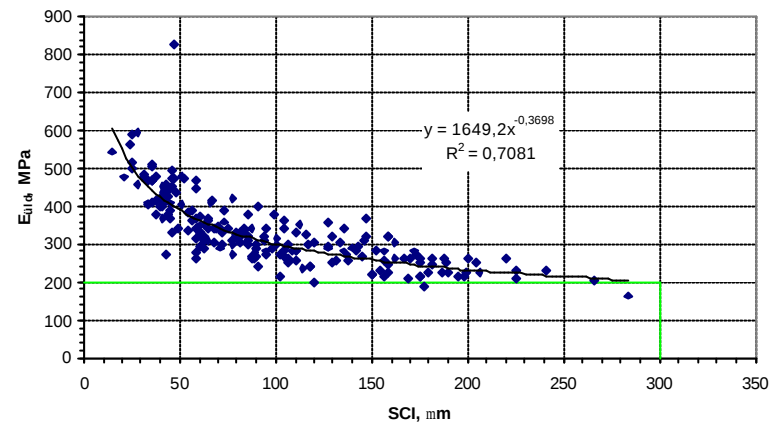


Pinnatud kruusateed, defektidega, 60-114 normtelge/ööp

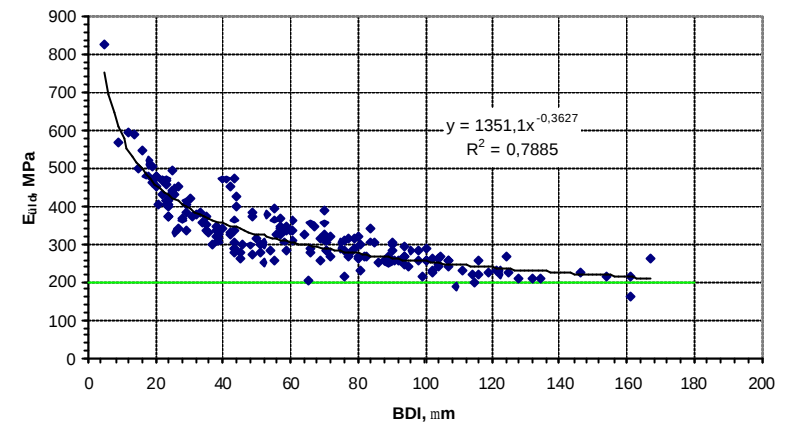


LISA D ANALÜÜSIGRUPP 4 – GRAAFIKUD

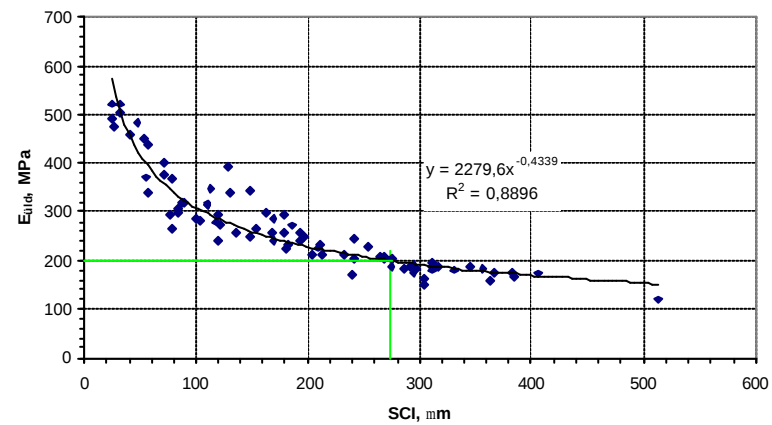
TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, 115-224 normtelge/ööp



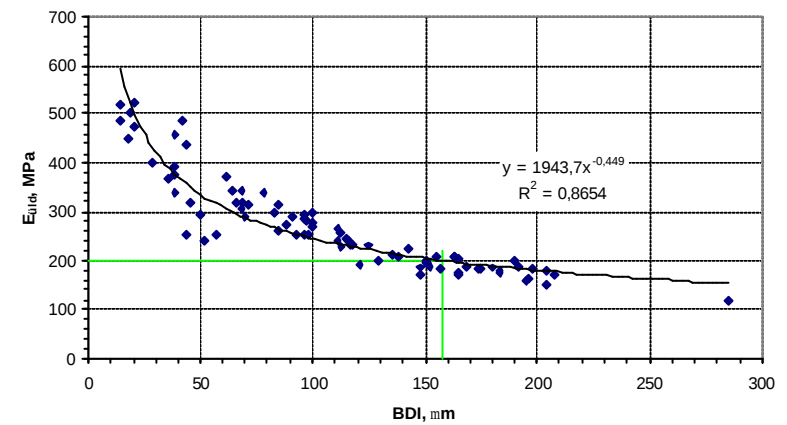
TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, 115-224 normtelge/ööp



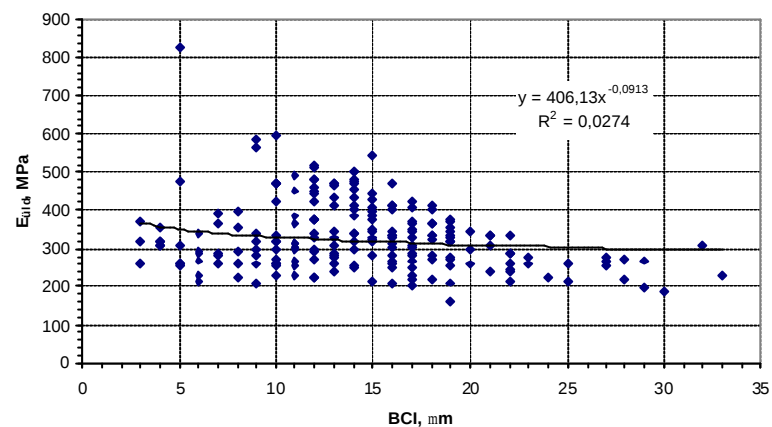
TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, 115-224 normtelge/ööp



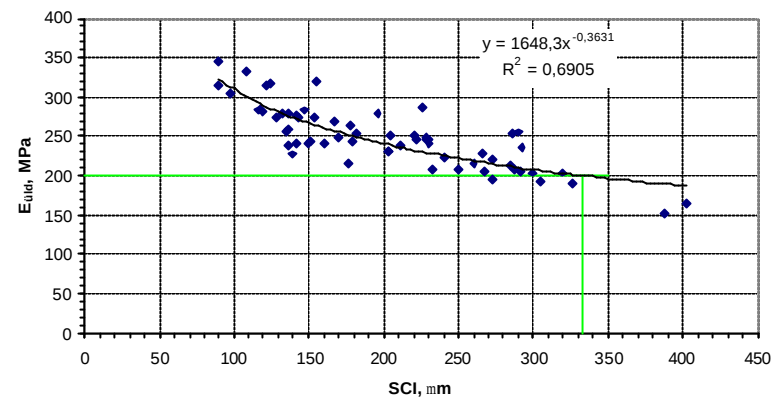
TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, 115-224 normtelge/ööp



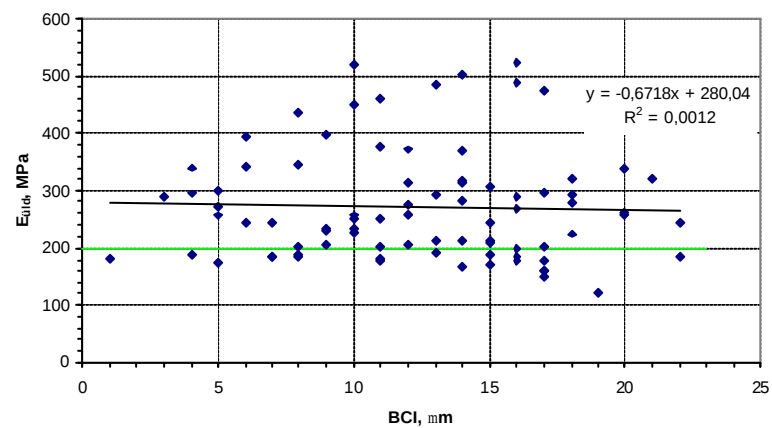
TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, 115-224 normtelge/ööp



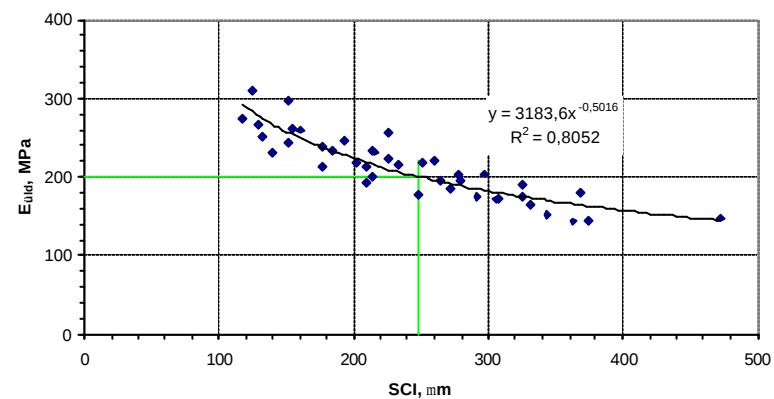
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektideta, 115-224 normtelge/ööp



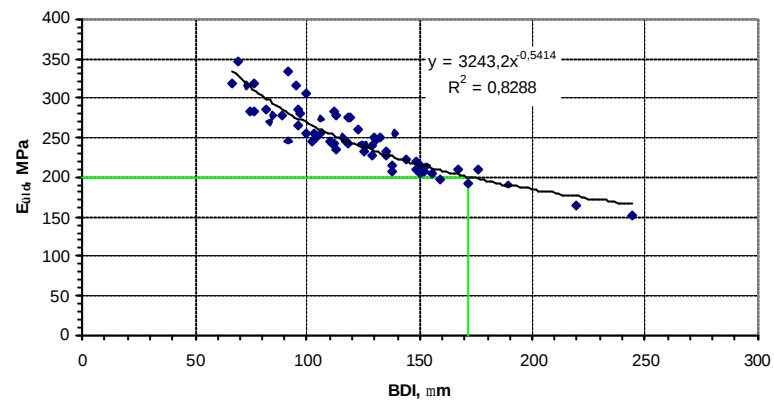
TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, 115-224 normtelge/ööp



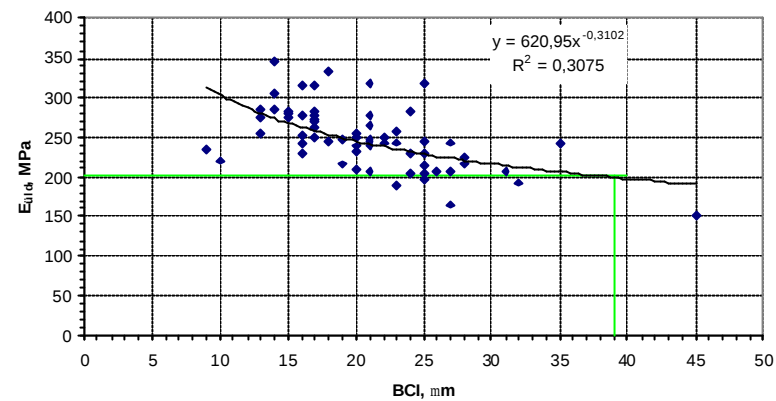
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektidega, 115-224 normtelge/ööp



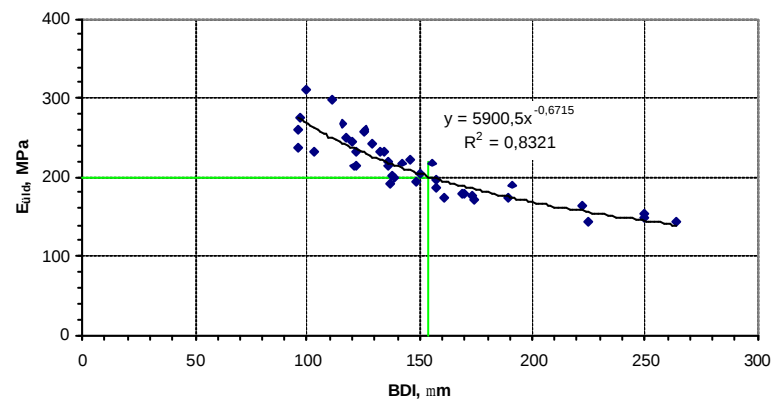
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



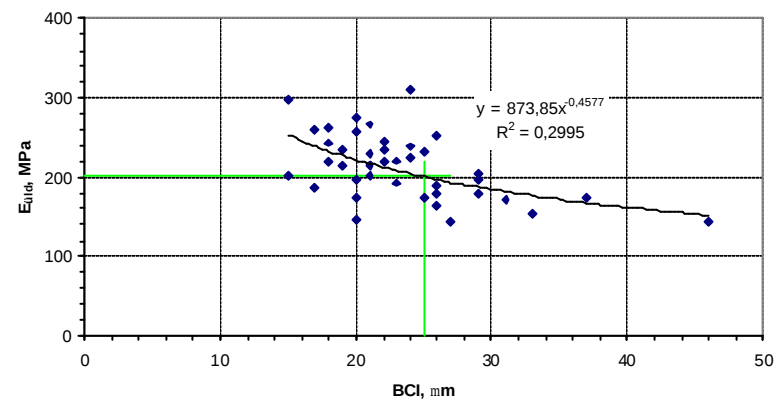
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



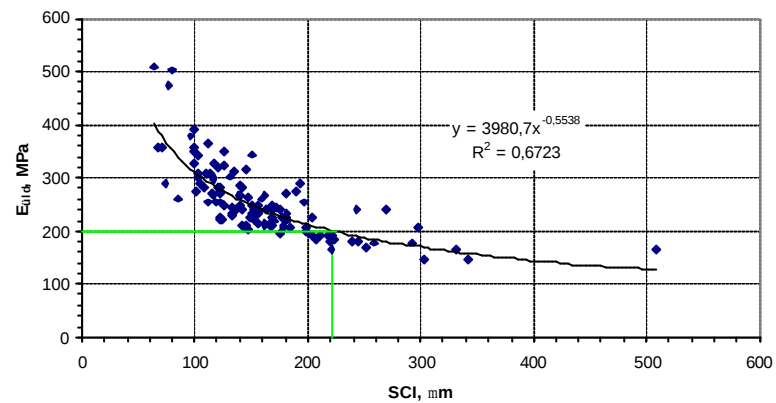
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



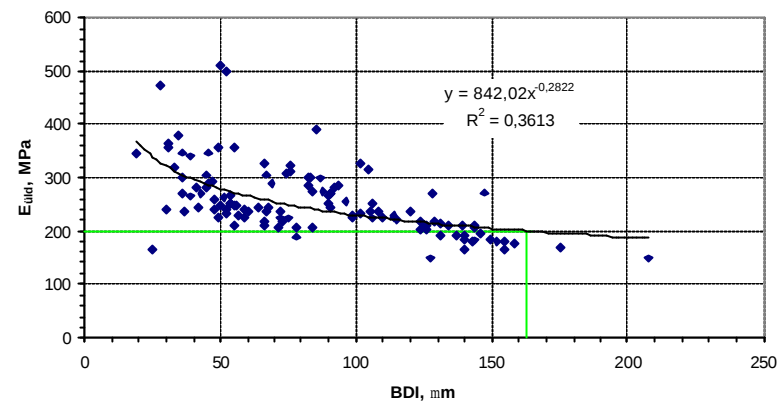
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



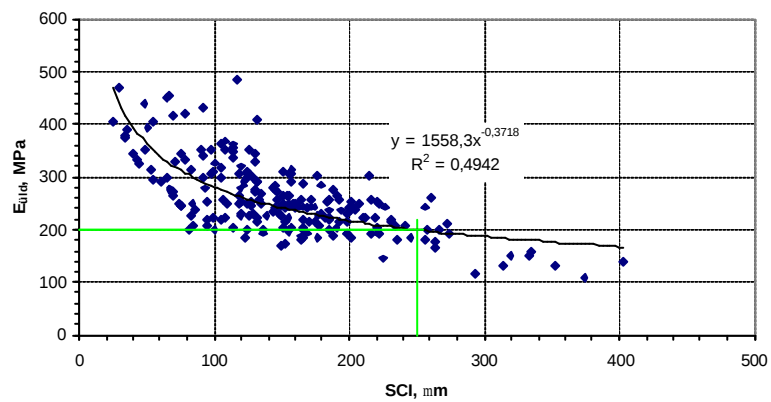
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



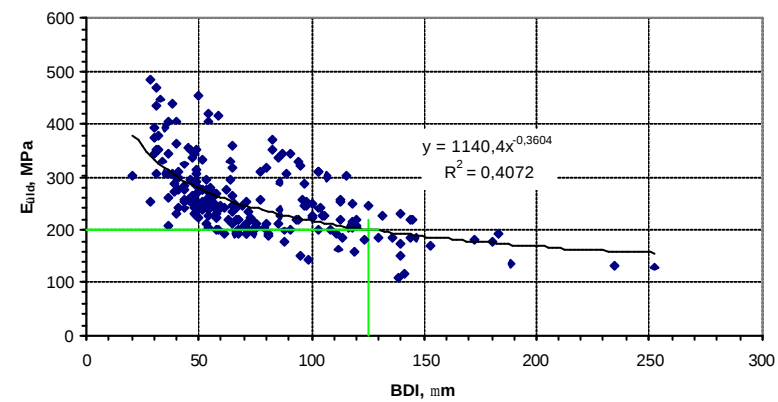
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



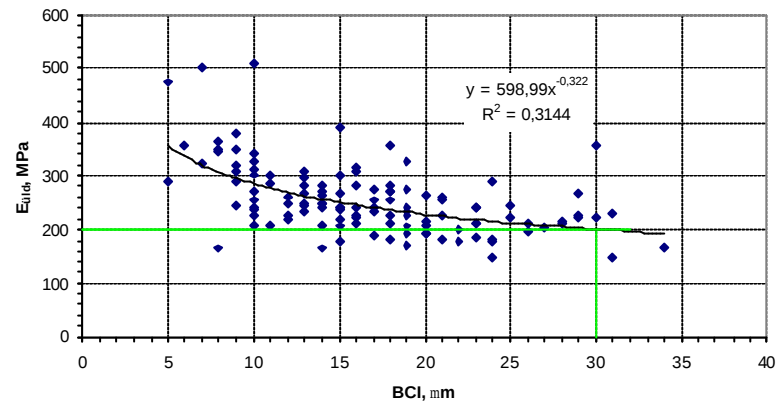
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



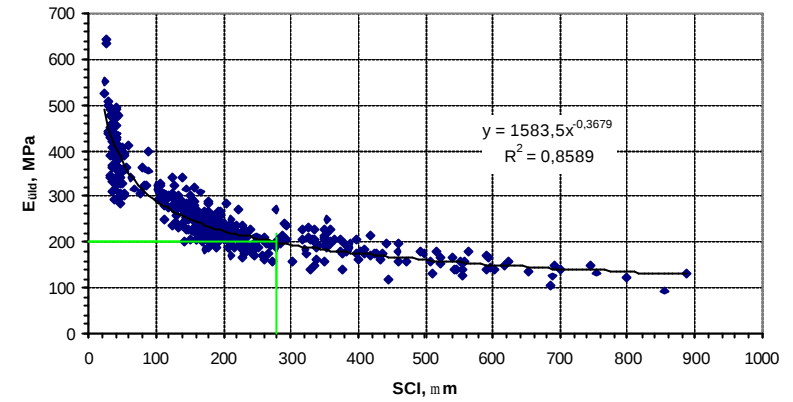
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



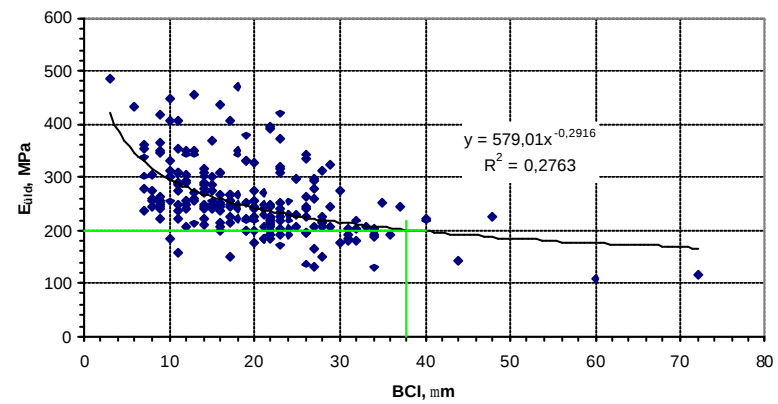
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



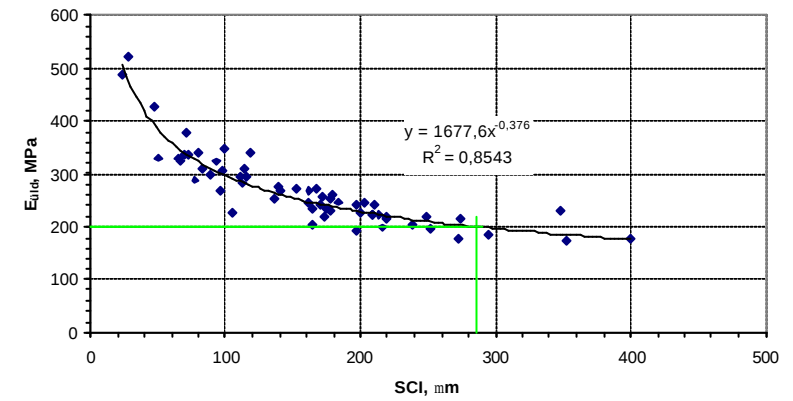
TAB-kate bituumenstabiliseeritud alusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



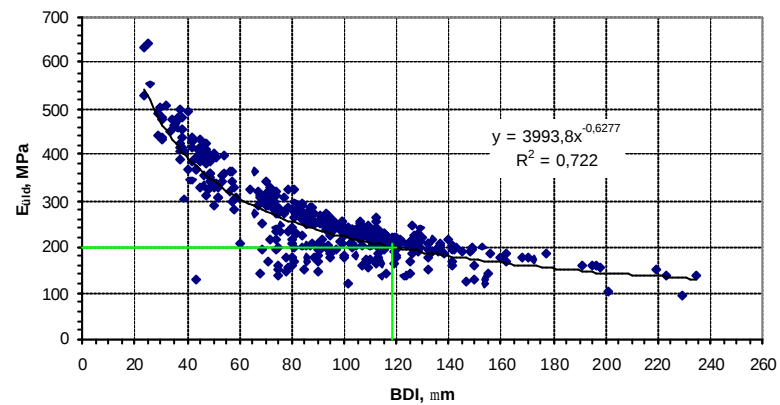
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



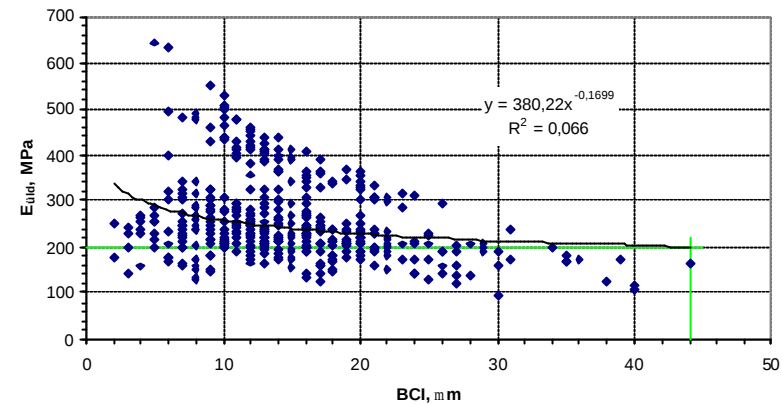
TAB-kate bituumenstabiliseeritud alusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



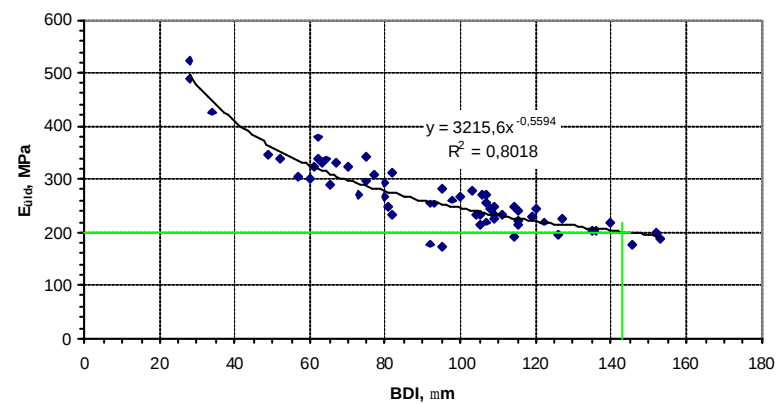
TAB-kate bituumenstabiliseeritud alusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



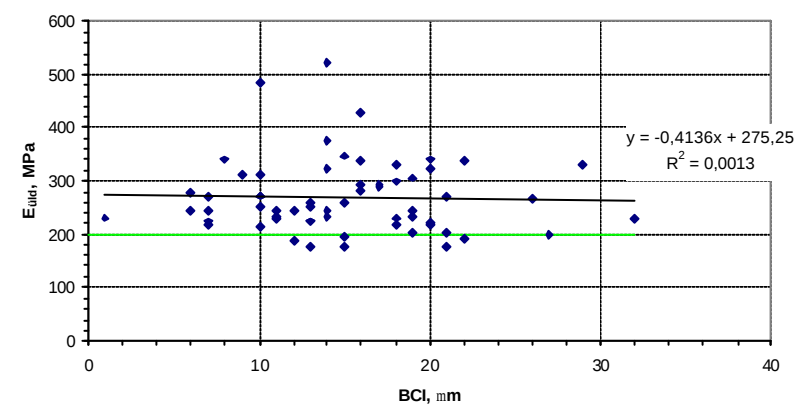
TAB-kate bituumenstabiliseeritud alusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



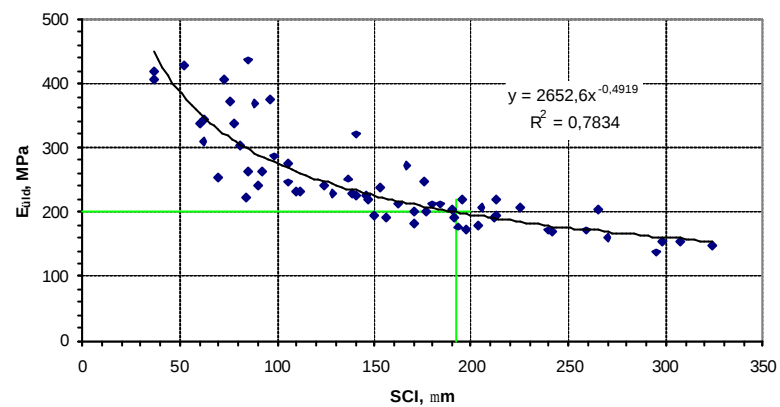
TAB-kate bituumenstabiliseeritud alusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



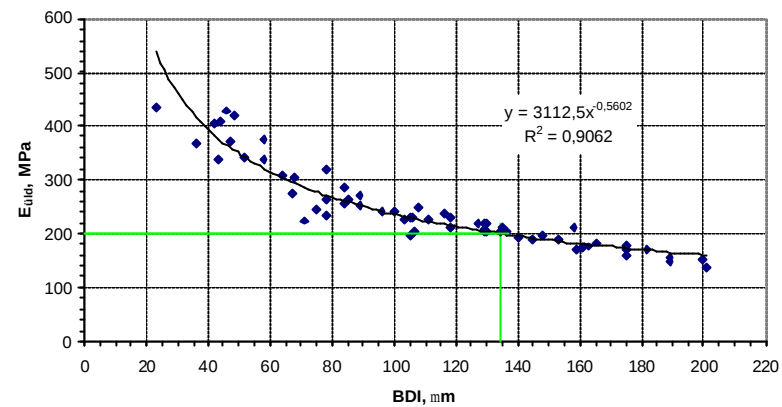
TAB-kate bituumenstabiliseeritud alusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



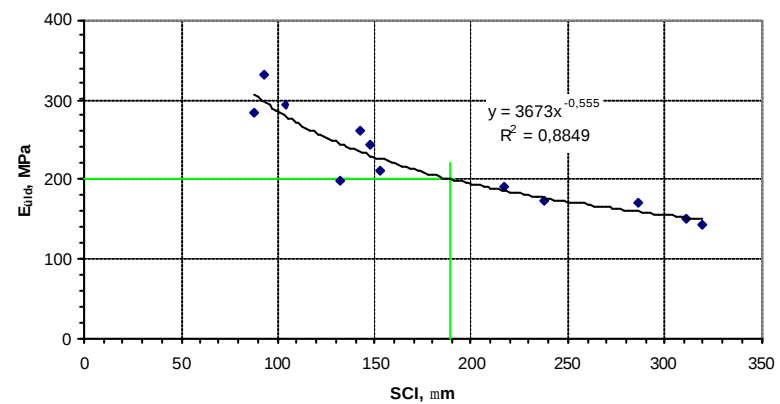
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



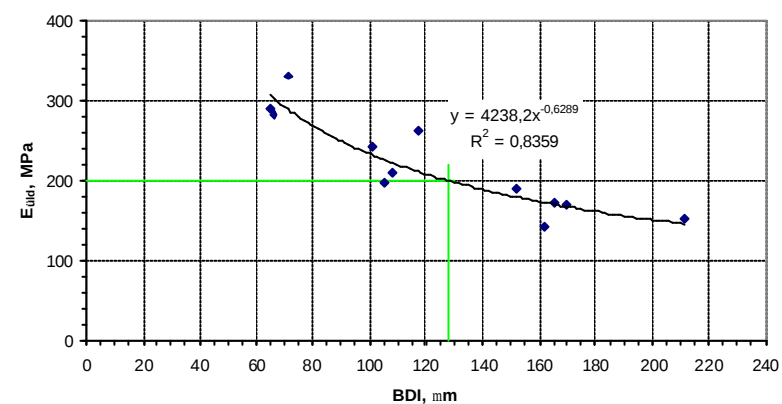
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



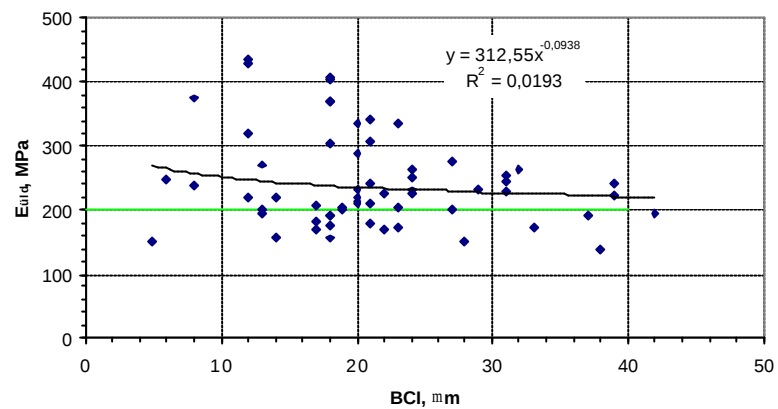
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



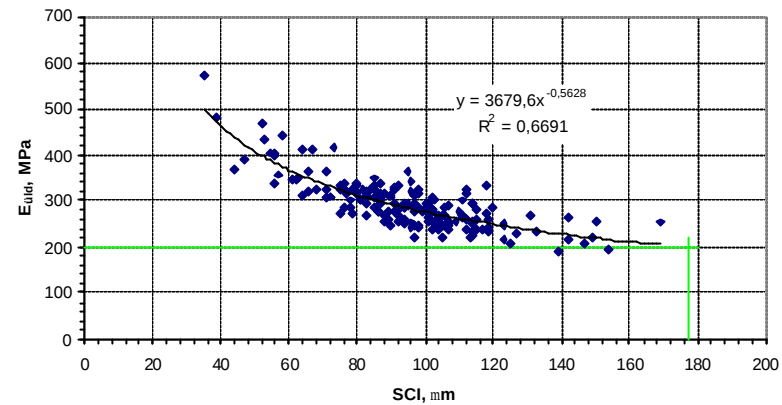
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



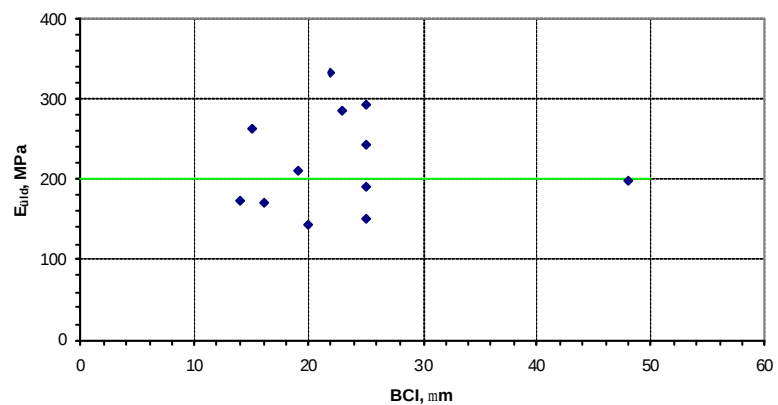
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



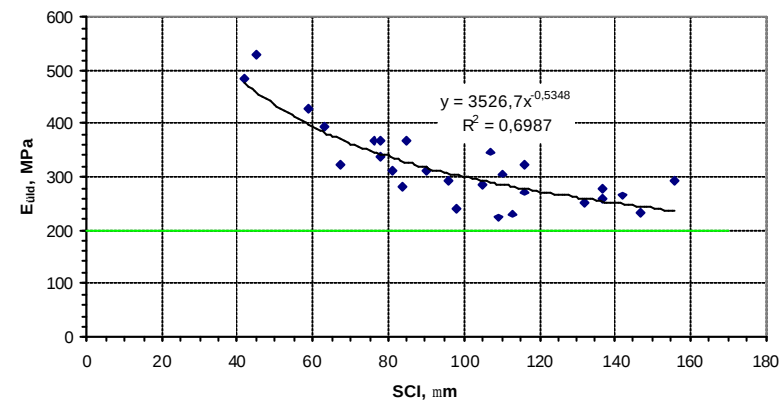
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



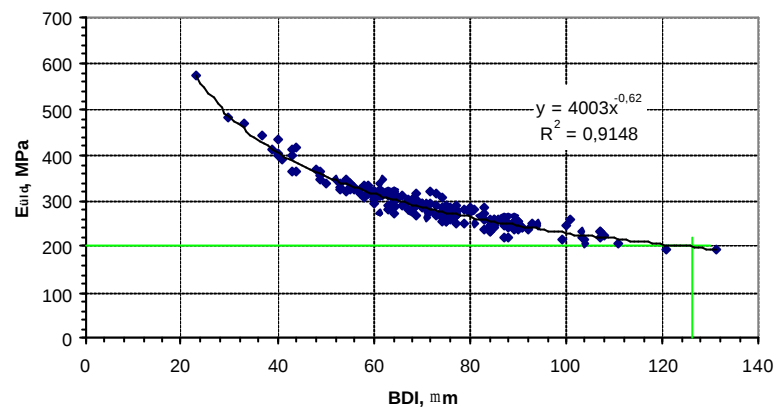
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



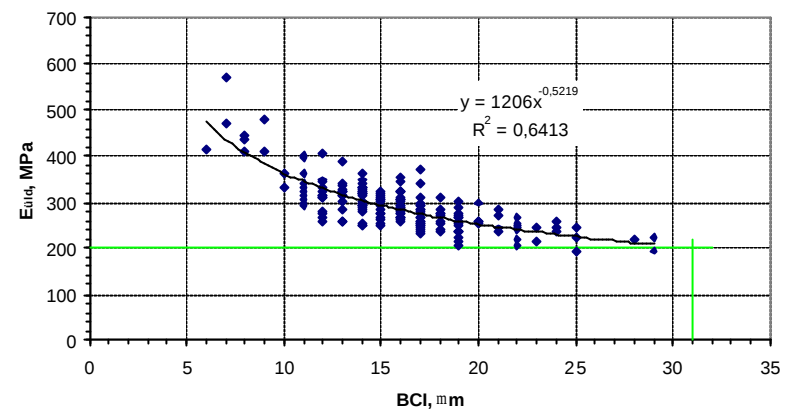
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



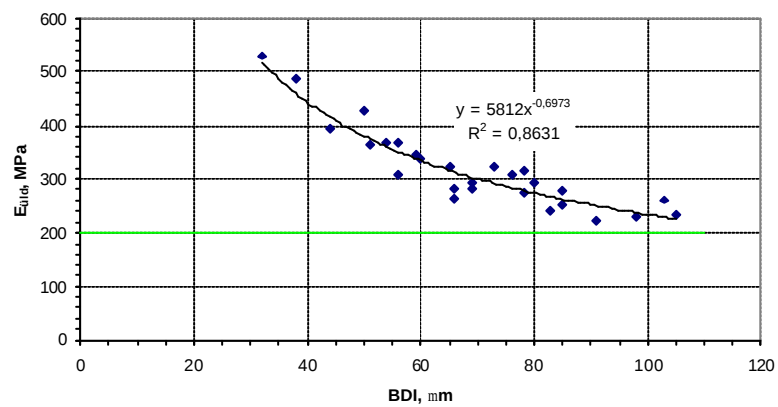
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



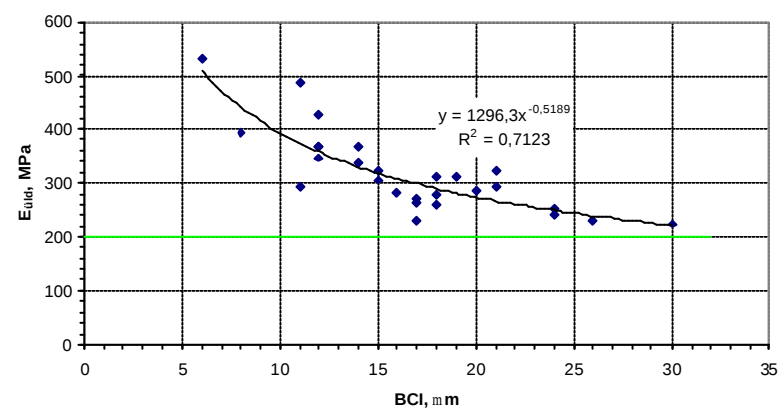
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



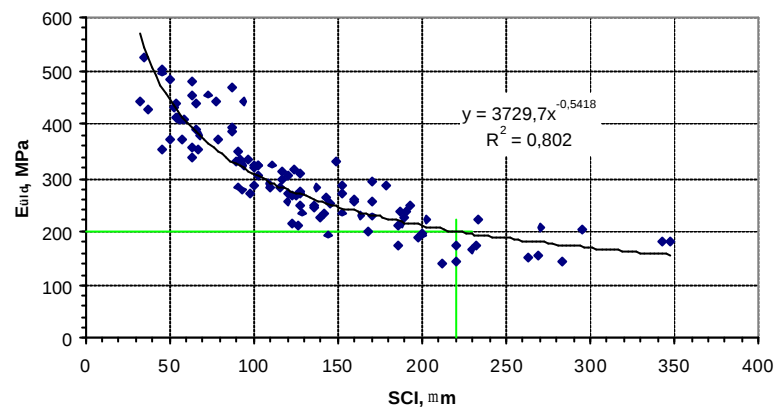
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



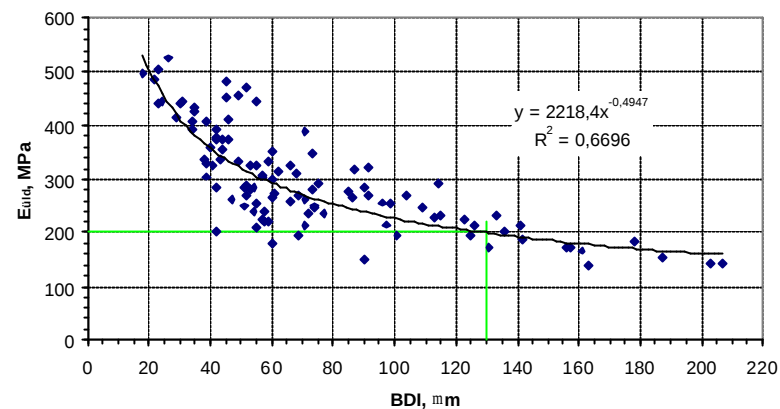
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



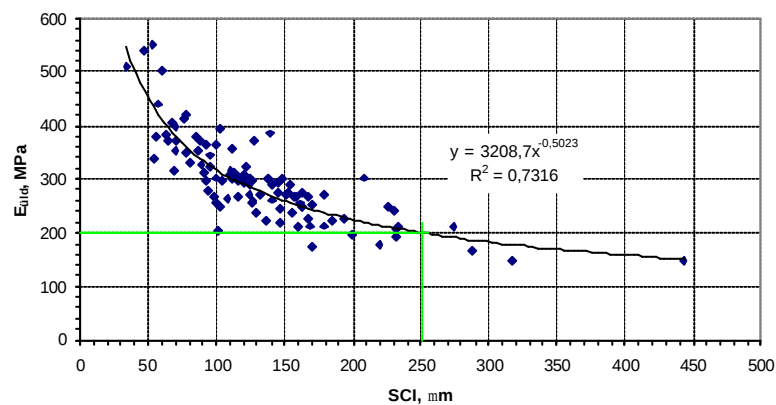
TAB-kate killustikalusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



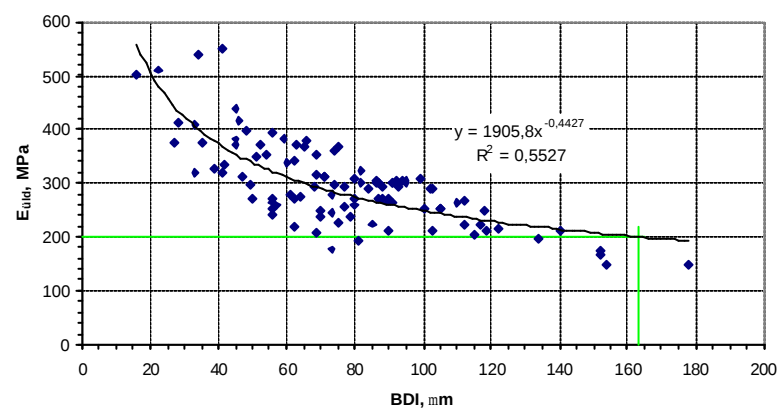
TAB-kate killustikalusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



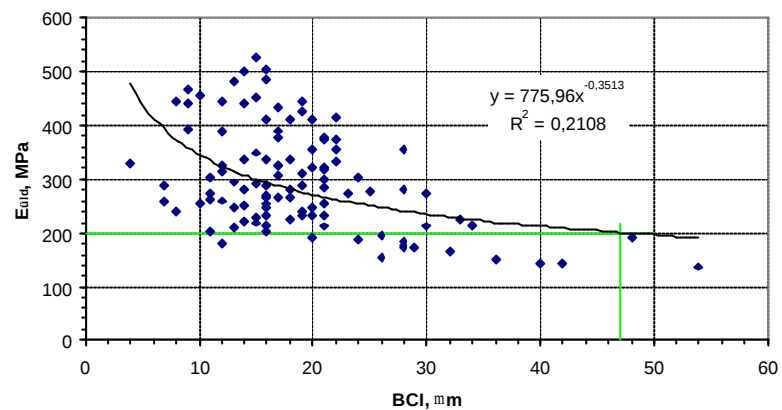
TAB-kate killustikalusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



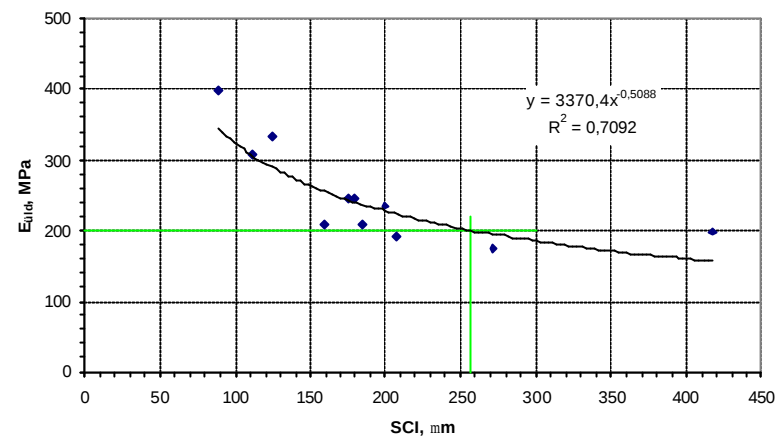
TAB-kate killustikalusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



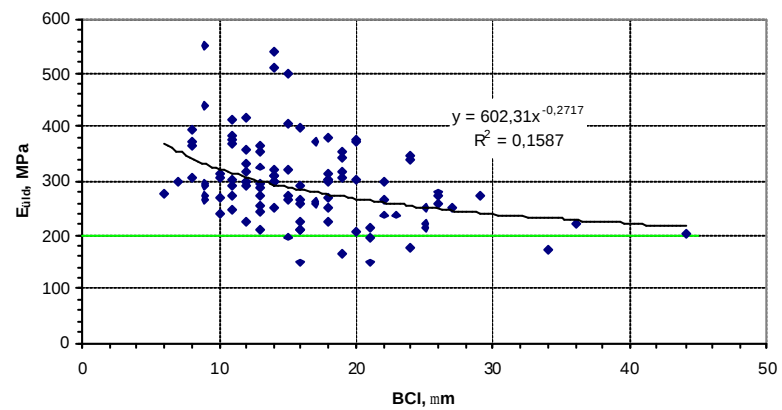
TAB-kate killustikalusega, defektideta,
115-224 normtelge/ööp



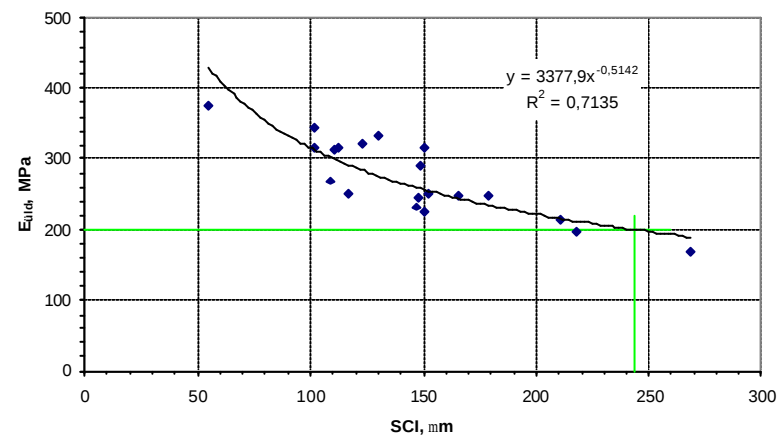
KAB-kattega defektideta teed, 115-224 normtelge/ööp



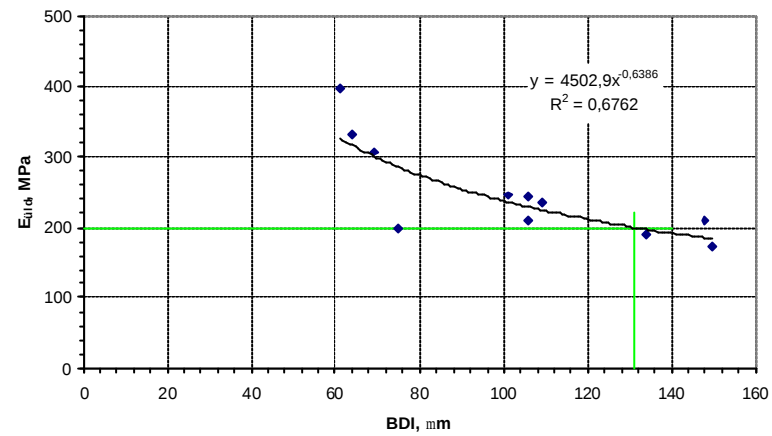
TAB-kate killustikalusega, defektidega,
115-224 normtelge/ööp



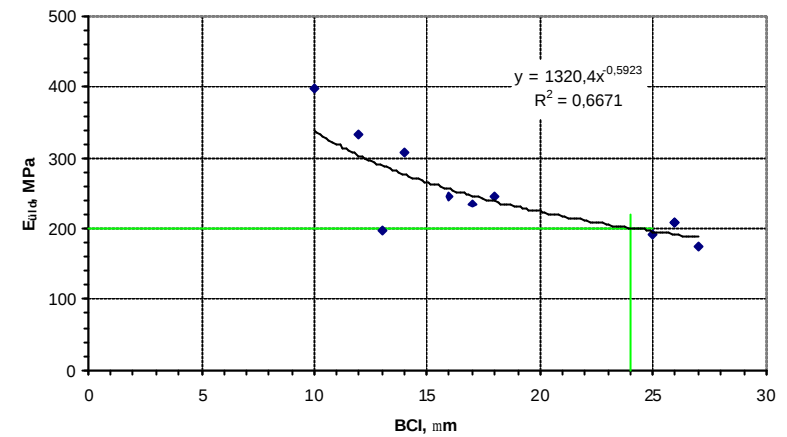
KAB-kattega defektidega teed, 115-224 normtelge/ööp



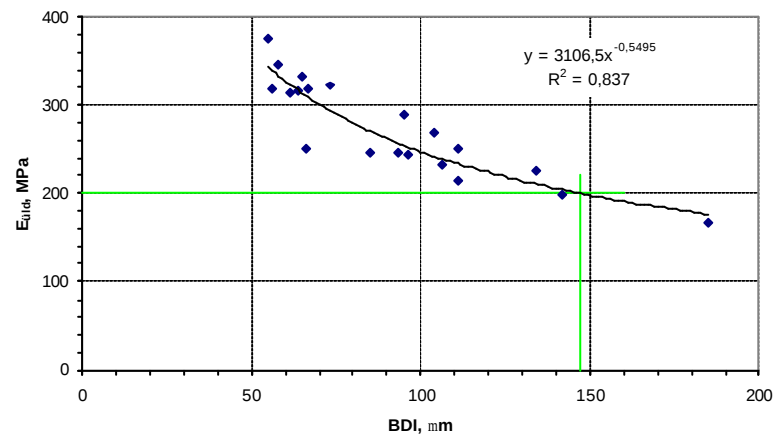
KAB-kattega defektideta teed, 115-224 normtelge/ööp



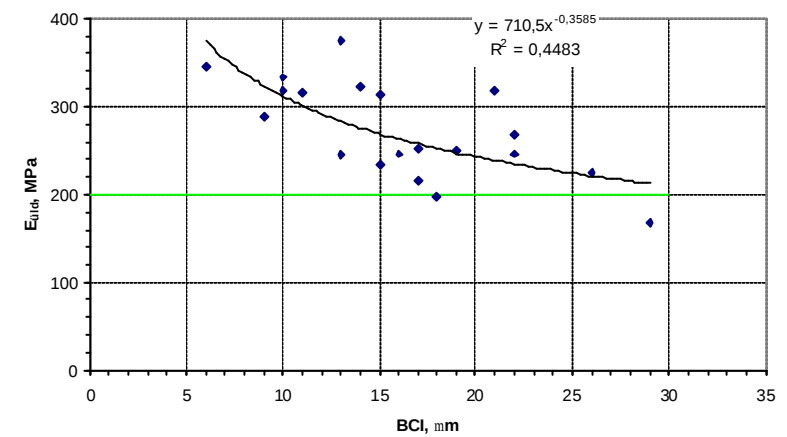
KAB-kattega defektideta teed, 115-224 normtelge/ööp



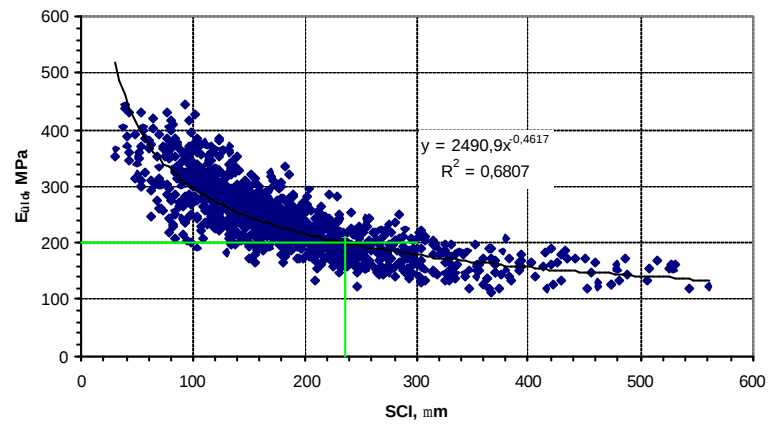
KAB-kattega defektidega teed, 115-224 normtelge/ööp



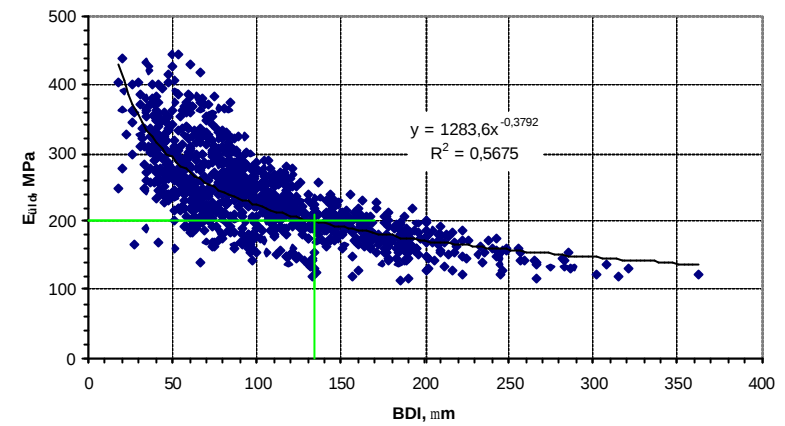
KAB-kattega defektidega teed, 115-224 normtelge/ööp



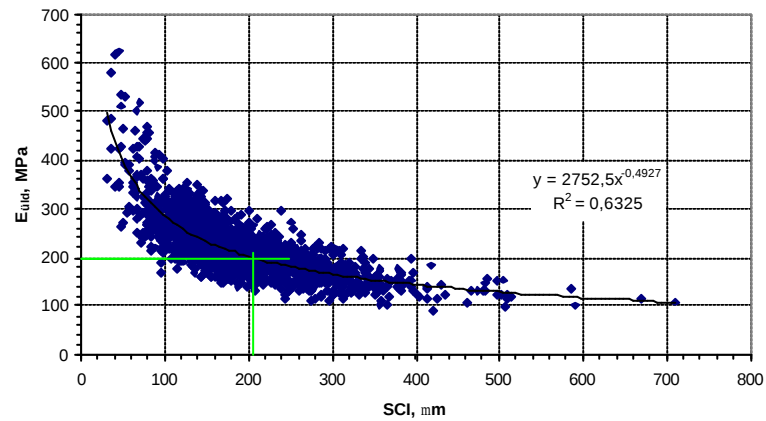
Mustkattega defektideta teed, 115-224 normtelge/ööp



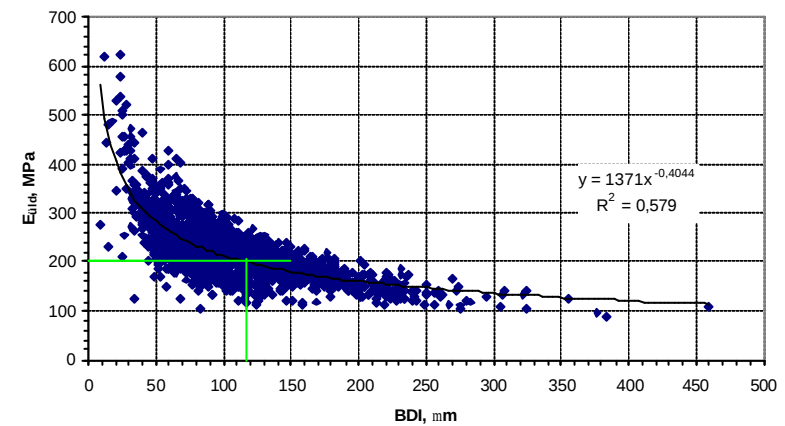
Mustkattega defektideta teed, 115-224 normtelge/ööp



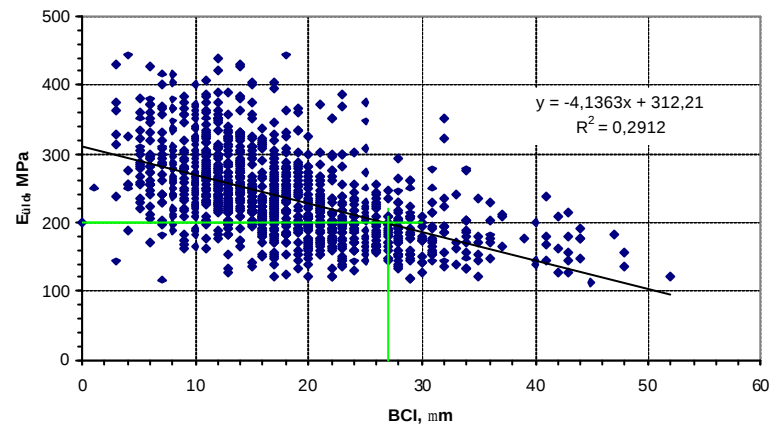
Mustkattega defektidega teed, 115-224 normtelge/ööp



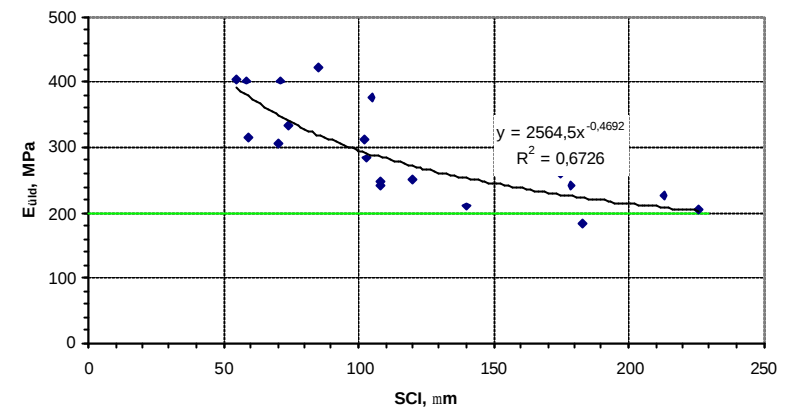
Mustkattega defektidega teed, 115-224 normtelge/ööp



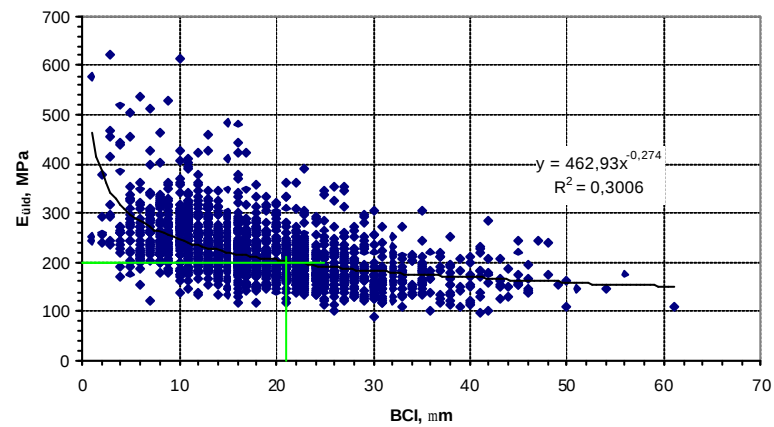
Mustkattedega defektideta teed, 115-224 normtelge/ööp



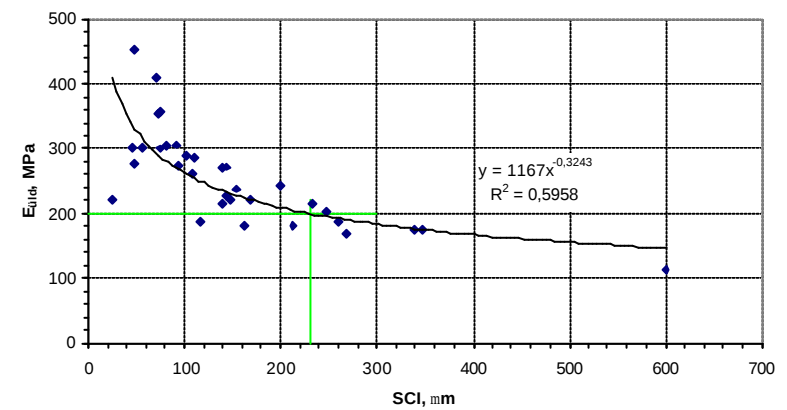
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattedega defektideta teed, 115-224 normtelge/ööp



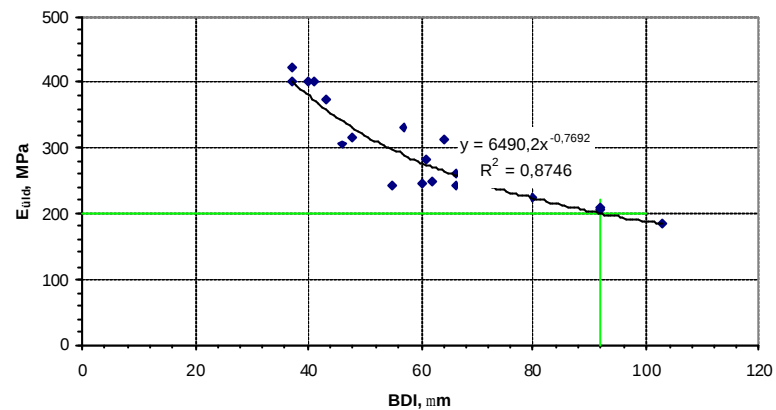
Mustkattedega defektidega teed, 115-224 normtelge/ööp



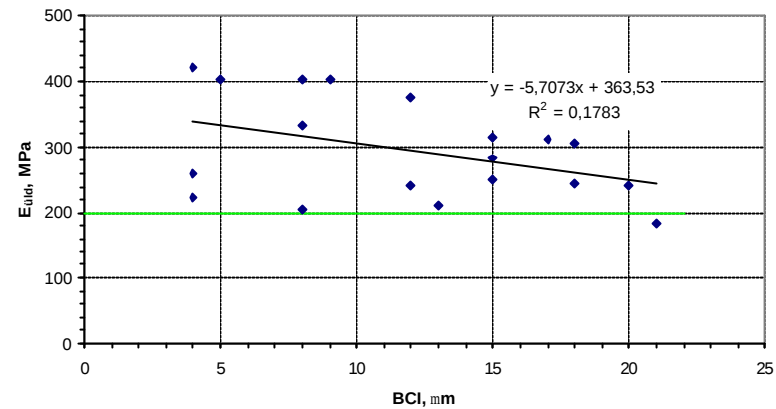
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattedega defektidega teed, 115-224 normtelge/ööp



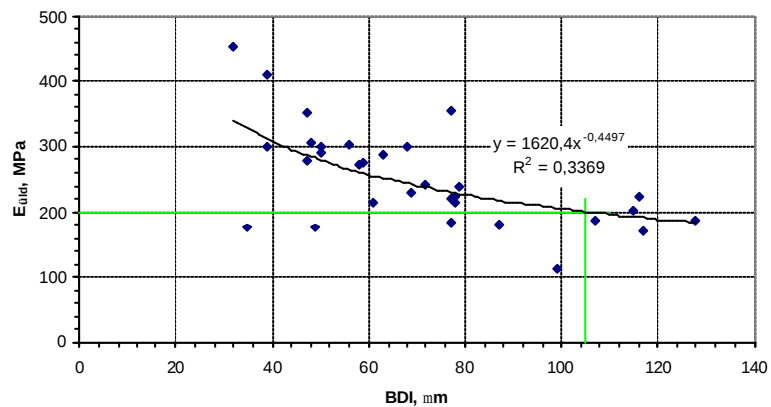
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektideta teed, 115-224
normtelge/ööp



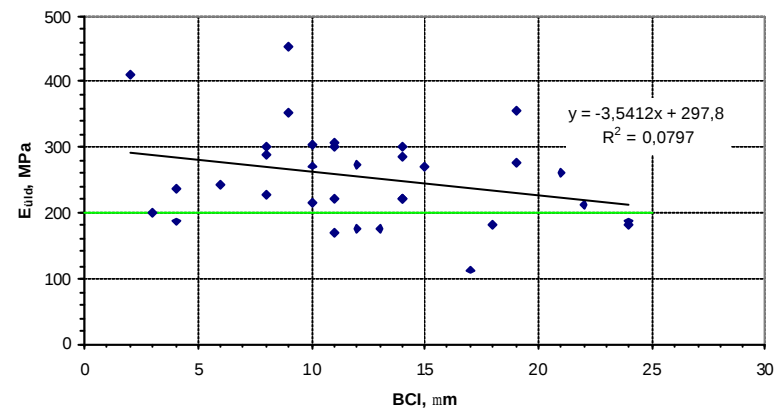
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektideta teed, 115-224
normtelge/ööp



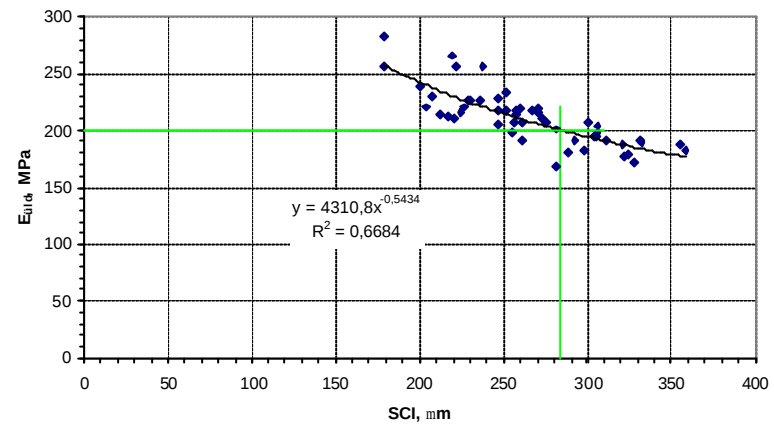
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektidega teed, 115-224
normtelge/ööp



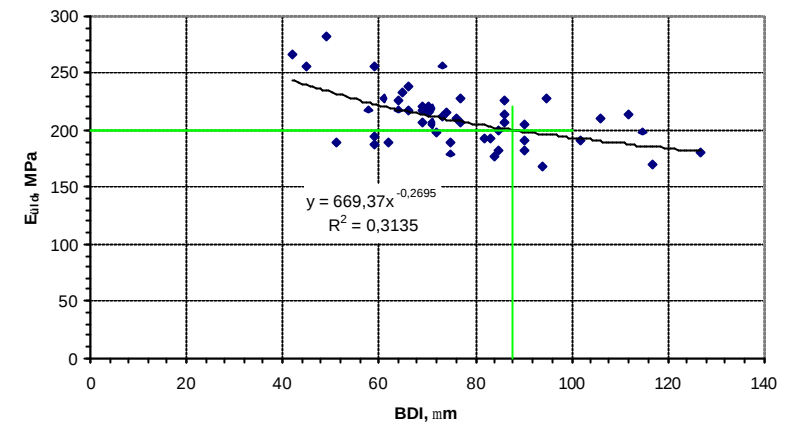
(Põlevkivi)tuhkbetoonkattega defektidega teed, 115-224
normtelge/ööp



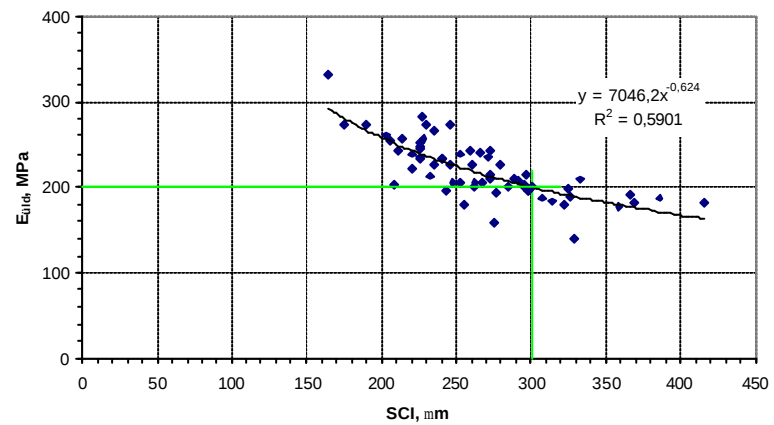
Pinnatud kruusateed, defektideta, 115-224 normtelge/ööp



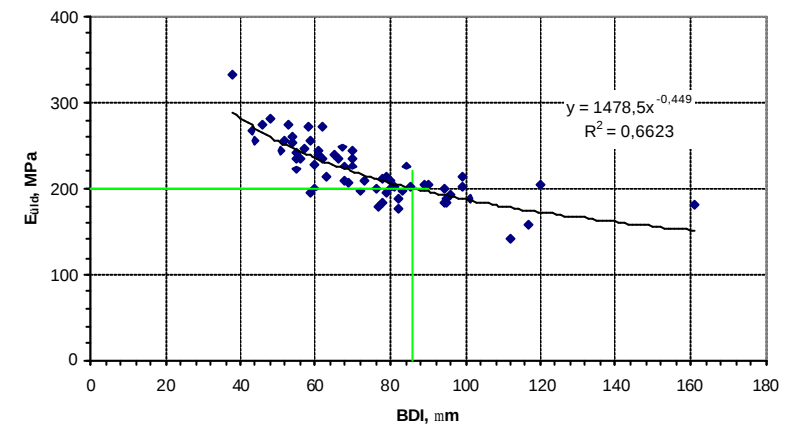
Pinnatud kruusateed, defektideta, 115-224 normtelge/ööp



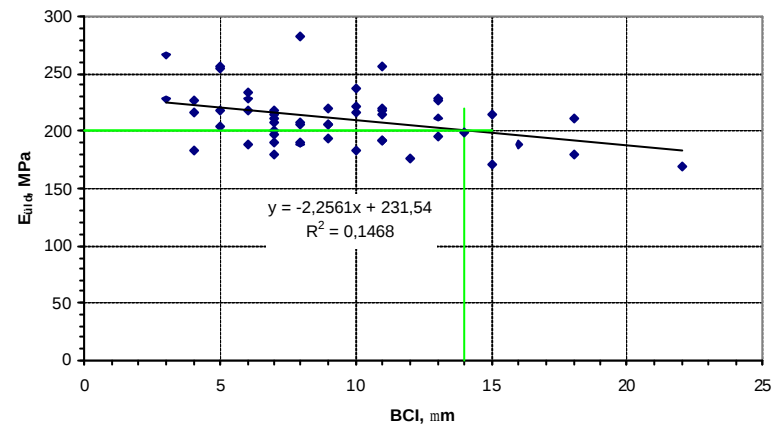
Pinnatud kruusateed, defektidega, 115-224 normtelge/ööp



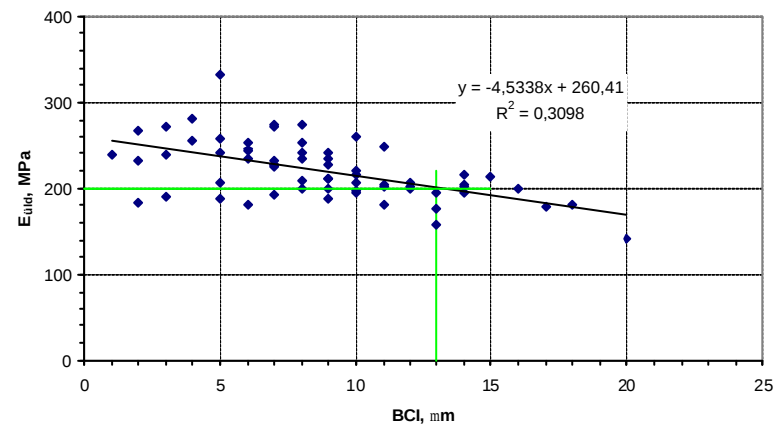
Pinnatud kruusateed, defektidega, 115-224 normtelge/ööp



Pinnatud kruusateed, defektideta, 115-224 normtelge/ööp

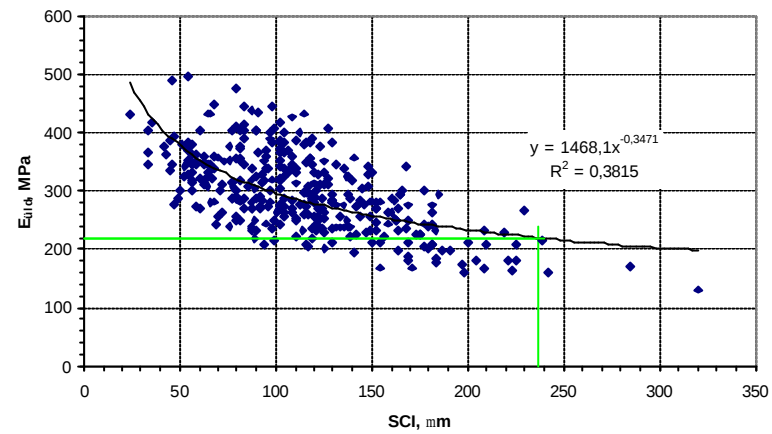


Pinnatud kruusateed, defektidega, 115-224 normtelge/ööp

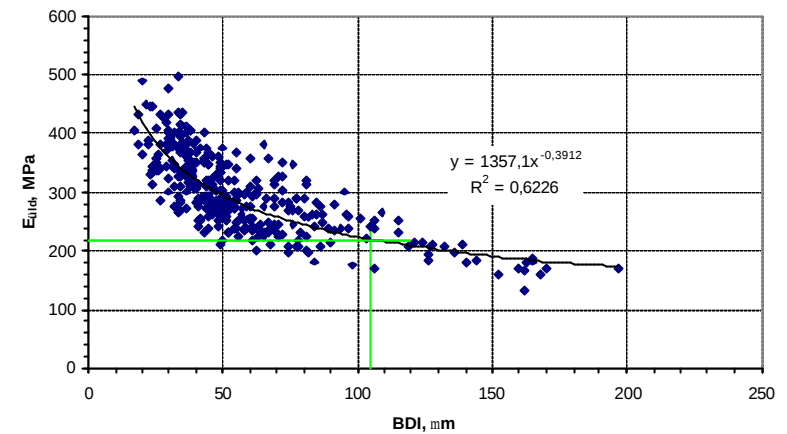


LISA E ANALÜÜSIGRUPP 5 – GRAAFIKUD

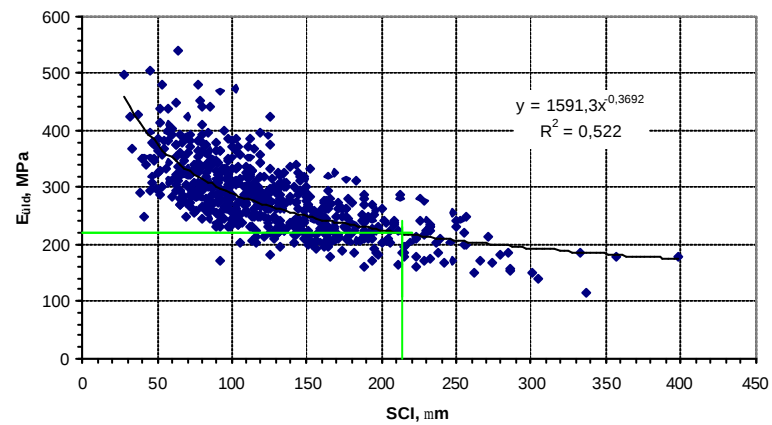
TAB kate ol.ol. kattele, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



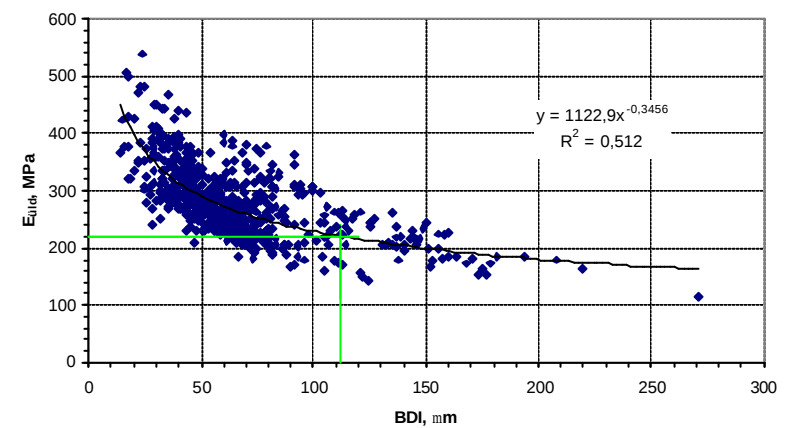
TAB kate ol.ol. kattele, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



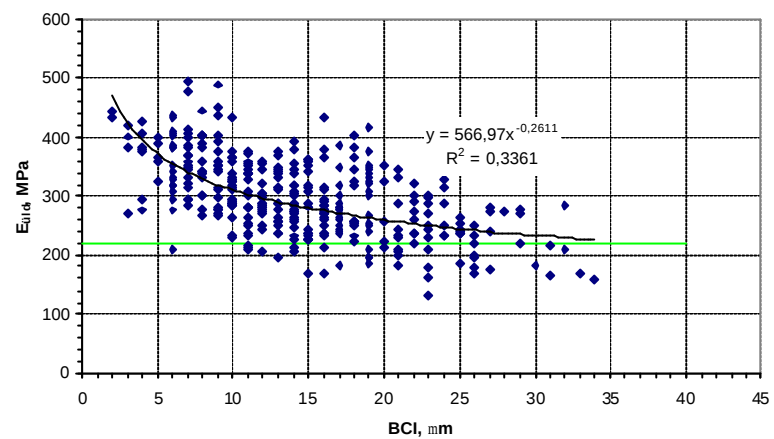
TAB kate ol.ol.kattele, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



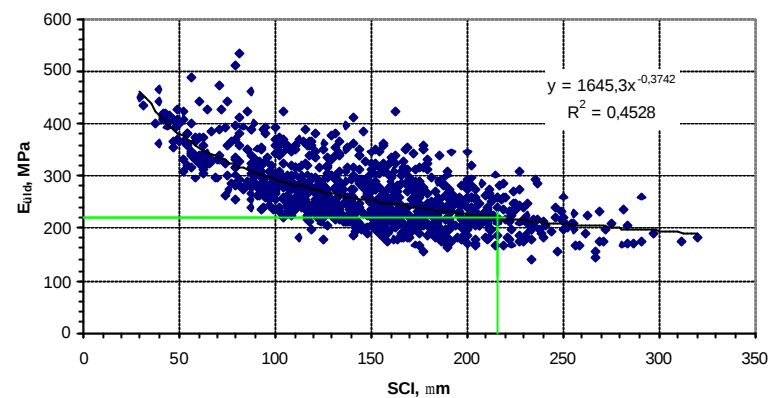
TAB kate ol.ol.kattele, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



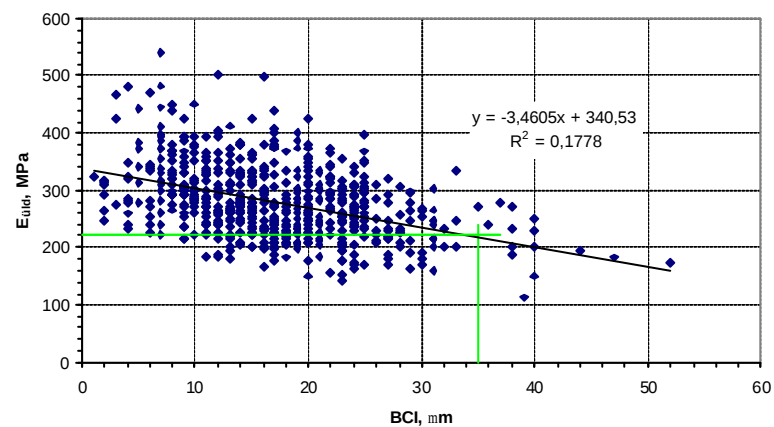
TAB kate ol.ol. kattele, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



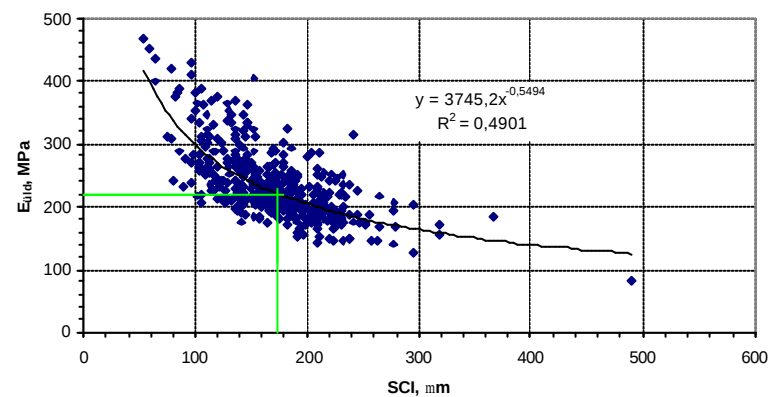
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



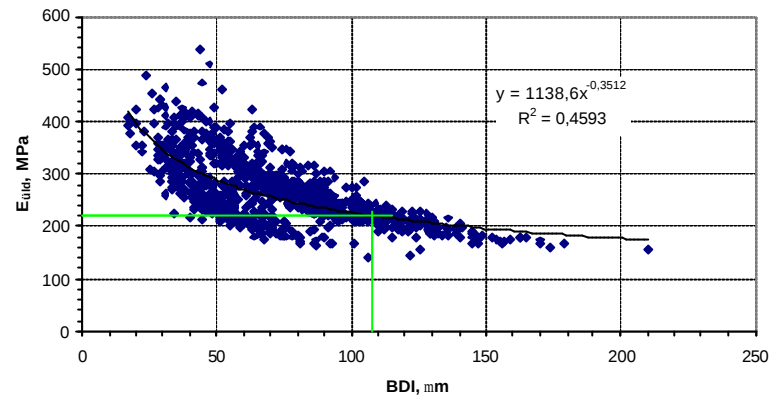
TAB kate ol.ol.kattele, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



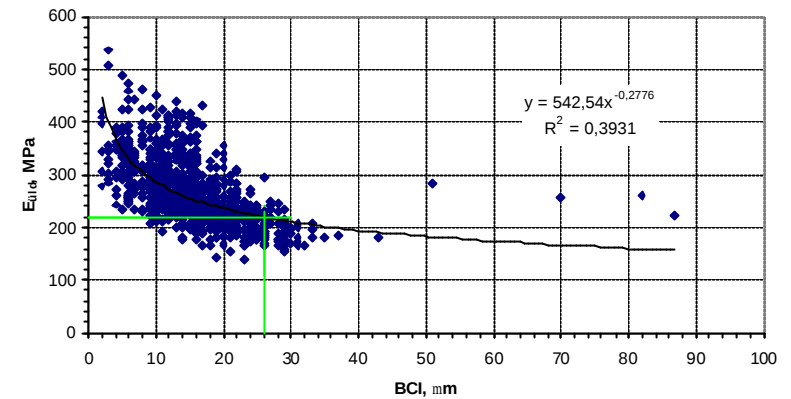
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



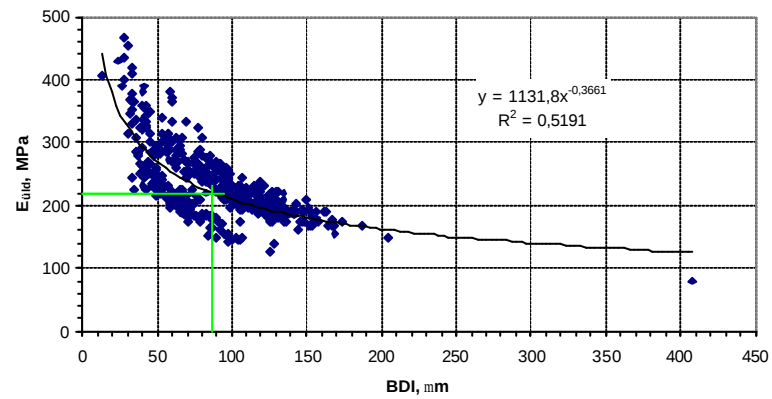
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta,
225-439 normtelge/ööp



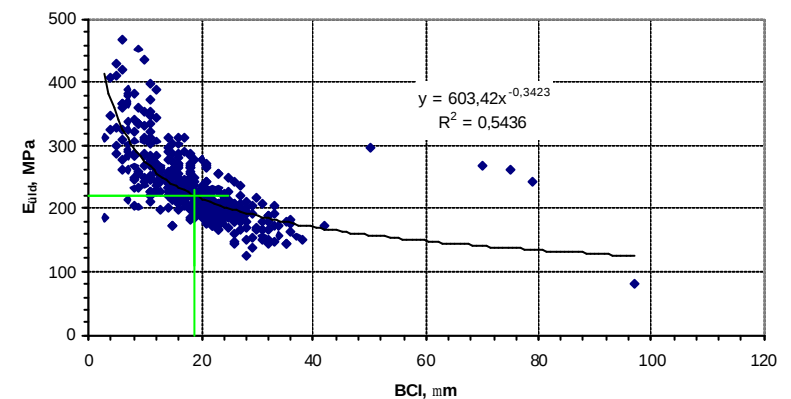
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta,
225-439 normtelge/ööp



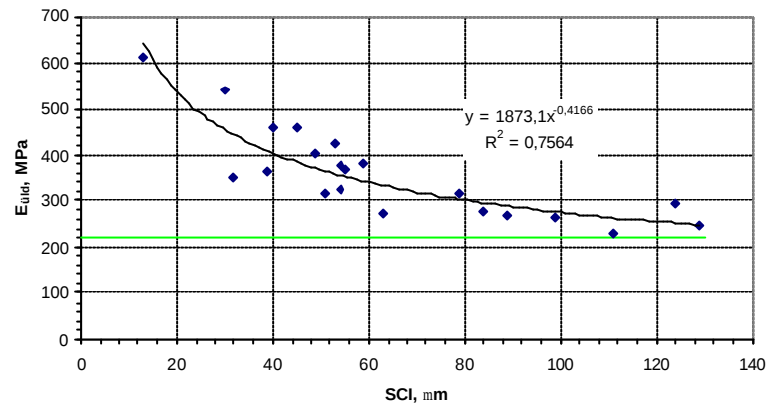
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektidega, 225-439
normtelge/ööp



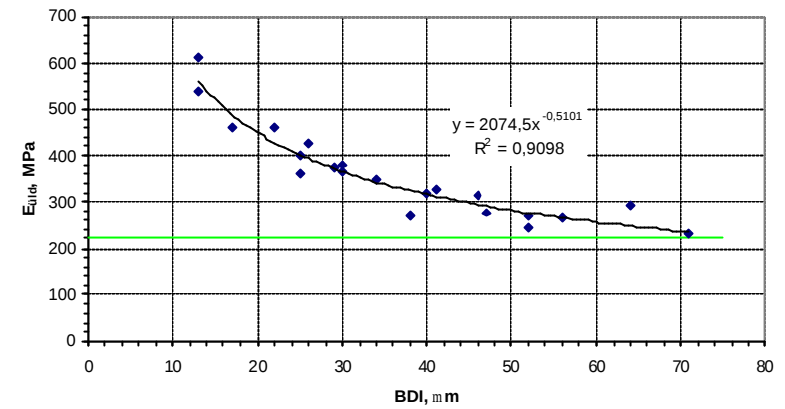
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektidega, 225-439
normtelge/ööp



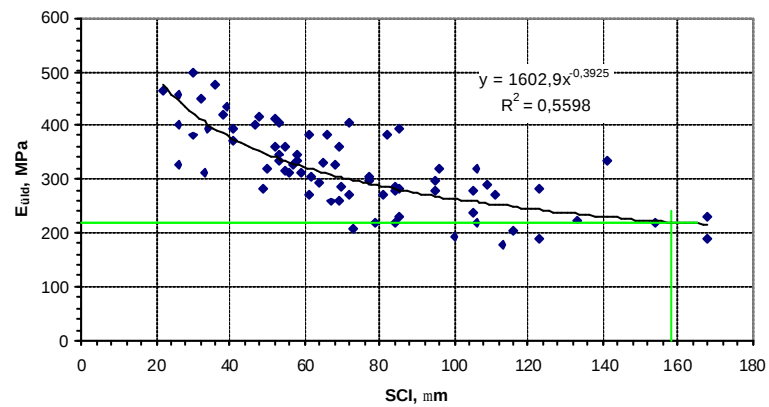
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektideta, 225-439
normtelge/ööp



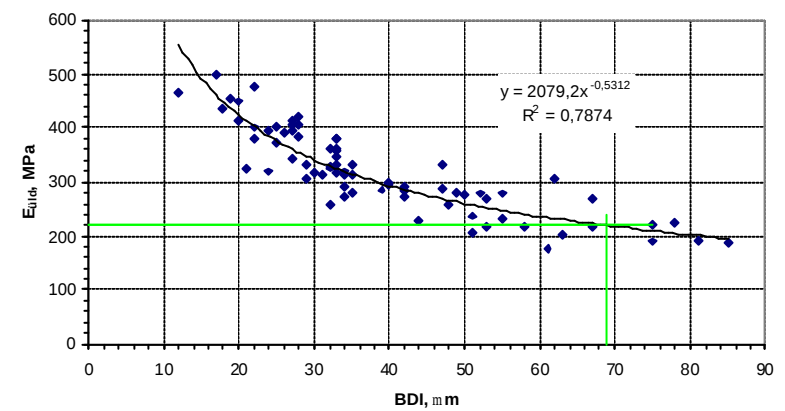
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektideta, 225-439
normtelge/ööp



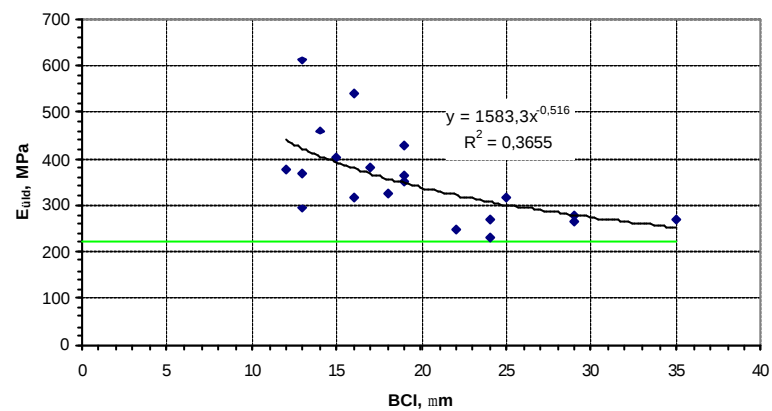
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektidega, 225-439
normtelge/ööp



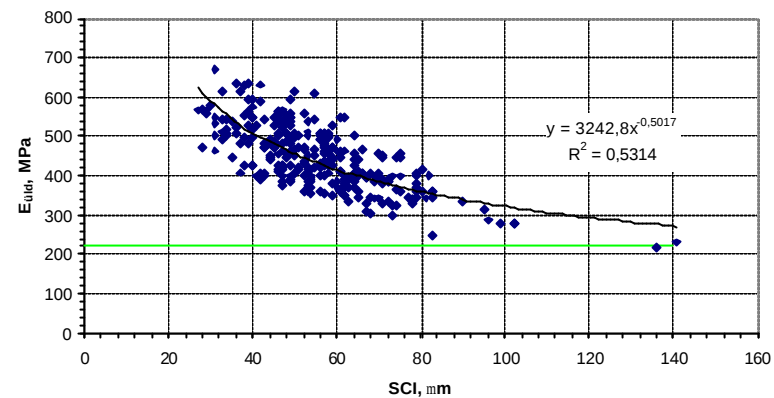
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektidega, 225-439
normtelge/ööp



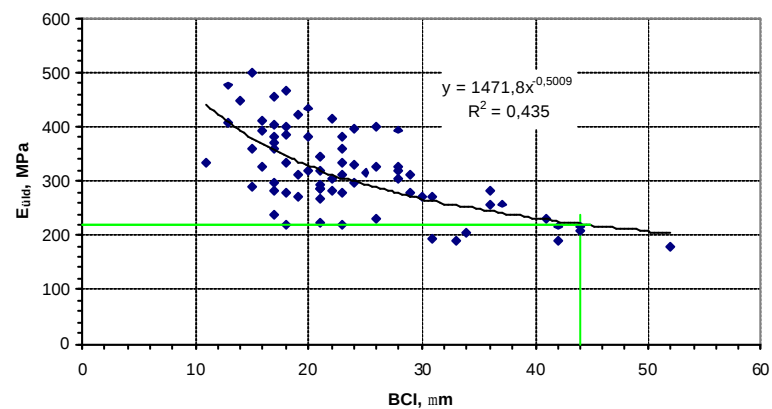
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



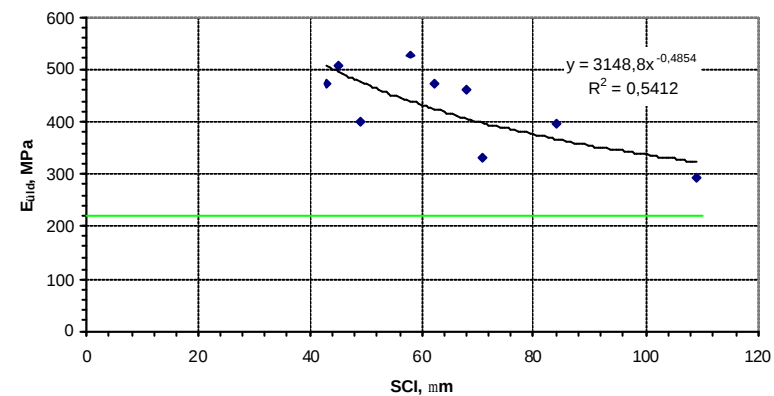
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



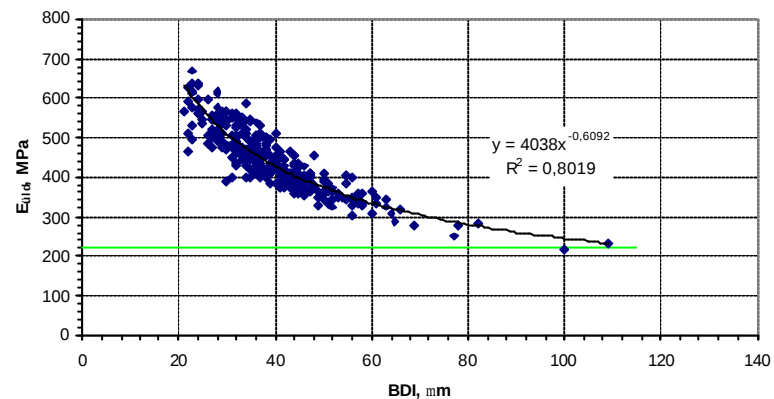
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



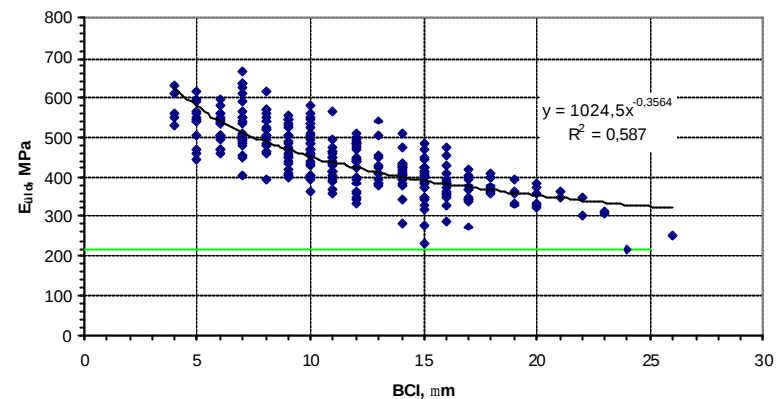
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



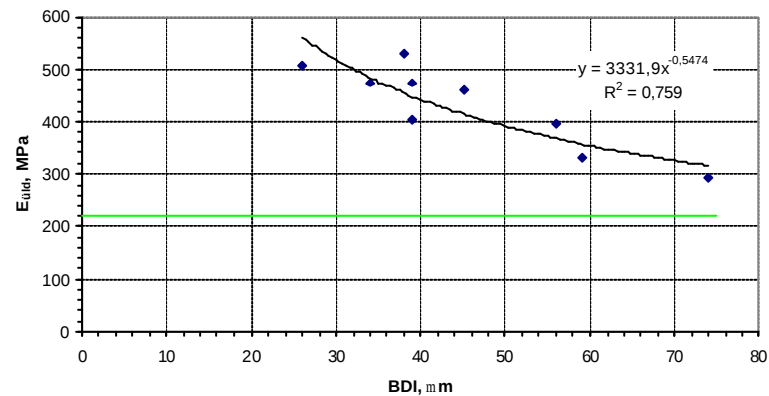
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
225-439 normtelge/ööp



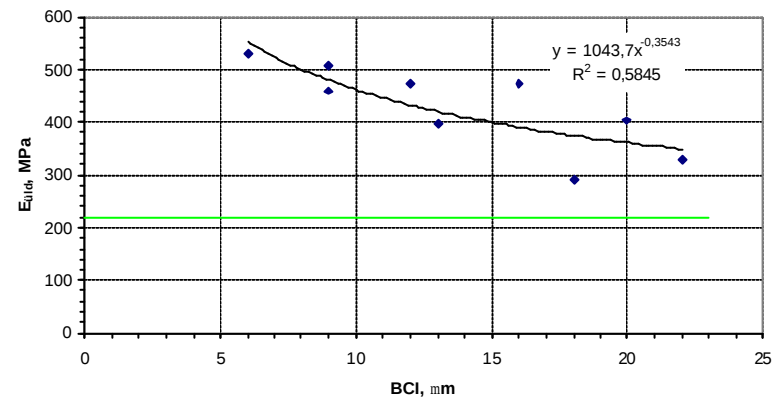
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
225-439 normtelge/ööp



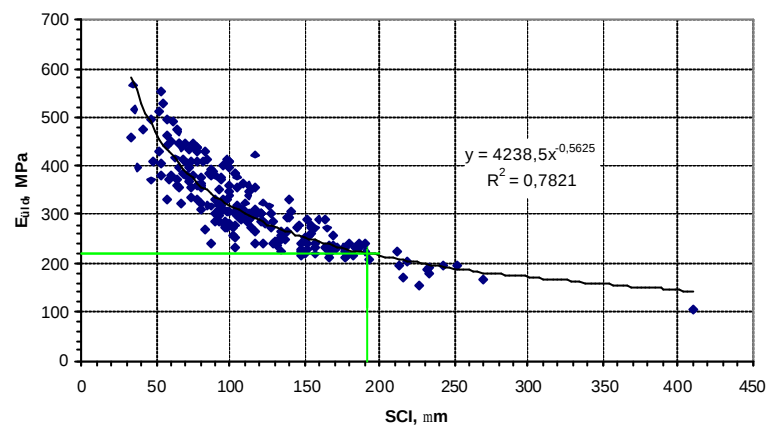
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
225-439 normtelge/ööp



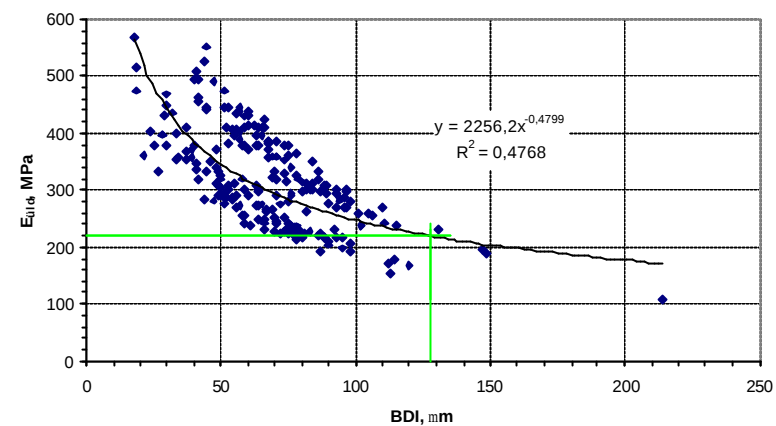
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
225-439 normtelge/ööp



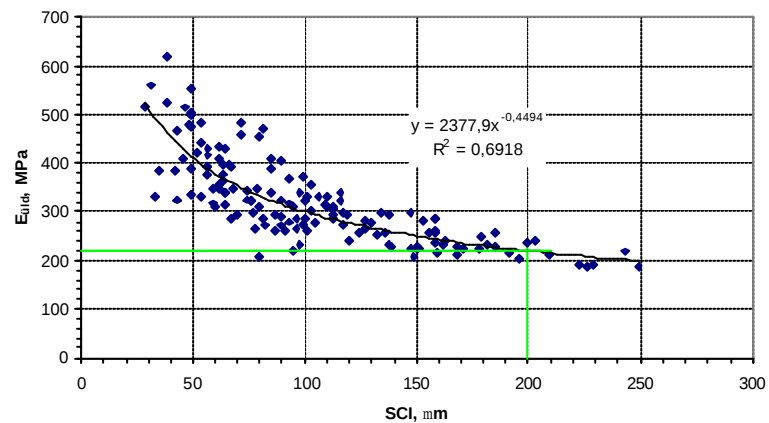
TAB-kate killustikalusel, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



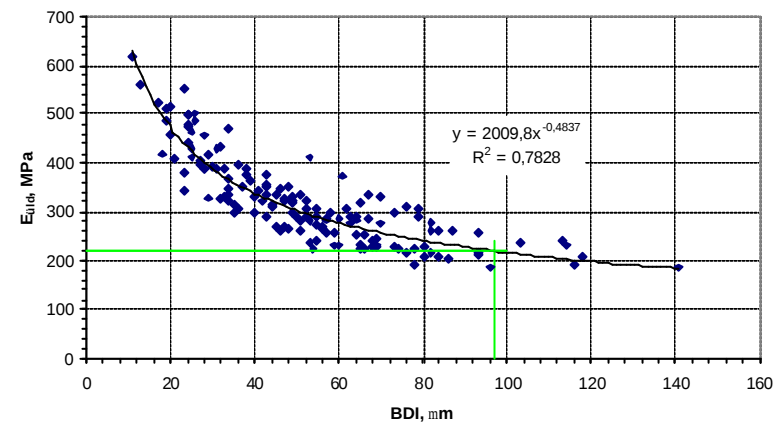
TAB-kate killustikalusel, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



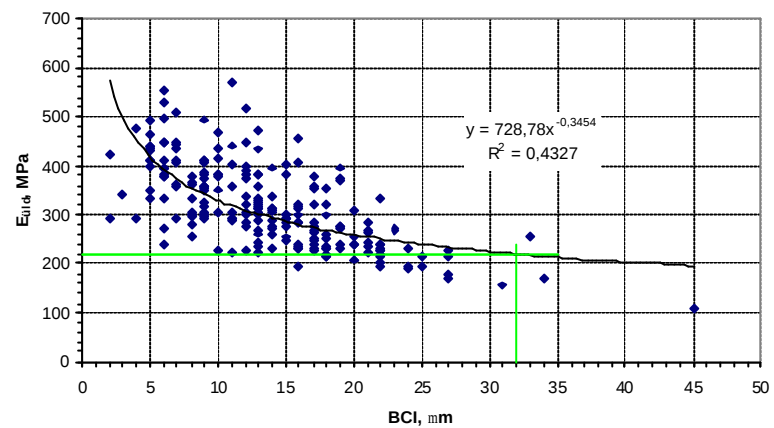
TAB-kate killustikalusel, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



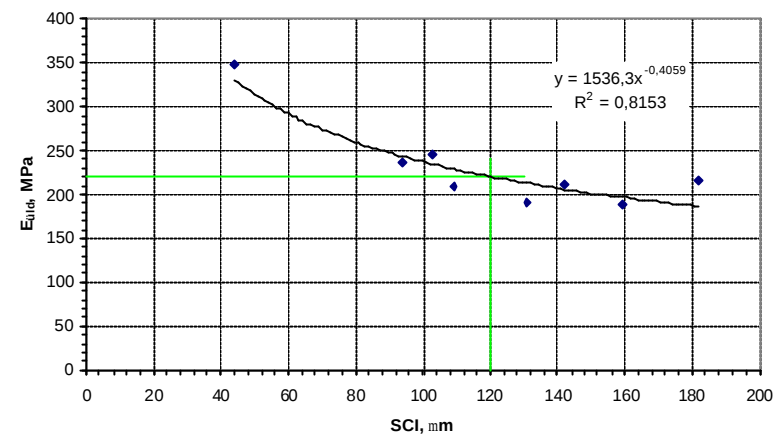
TAB-kate killustikalusel, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



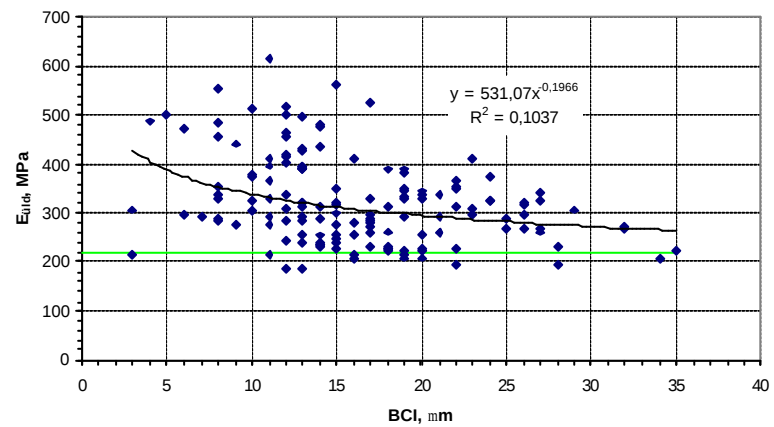
TAB-kate killustikalusel, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



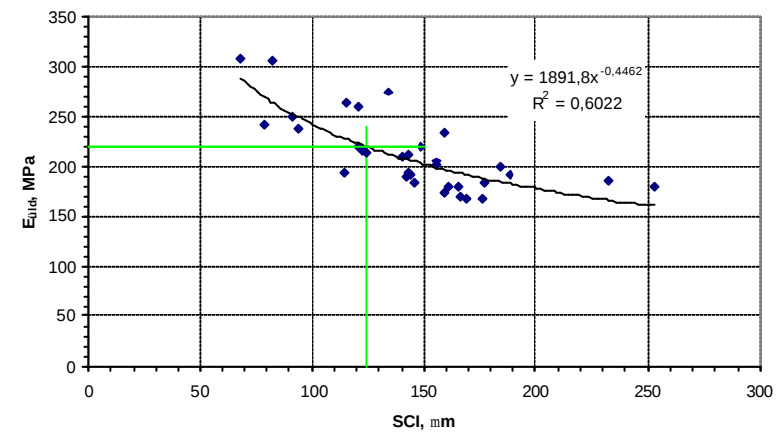
PAB-kate tasanduskihiga, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



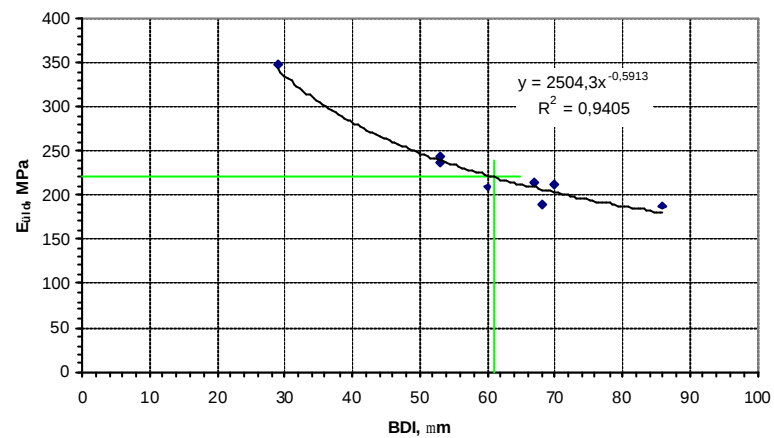
TAB-kate killustikalusel, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



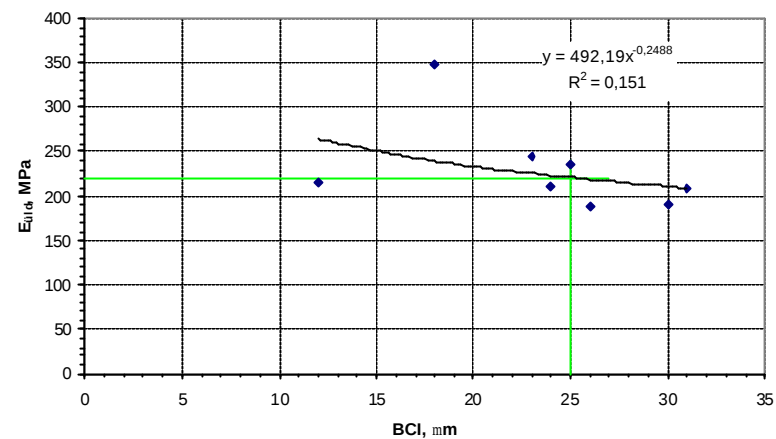
PAB-kate tasanduskihiga, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



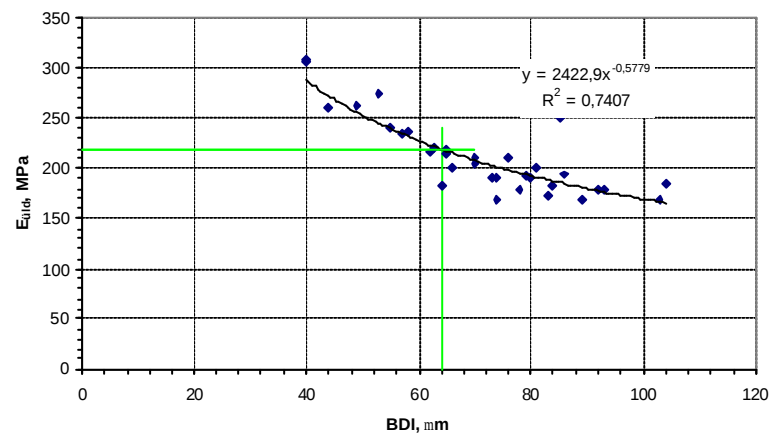
PAB-kate tasanduskihiga, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



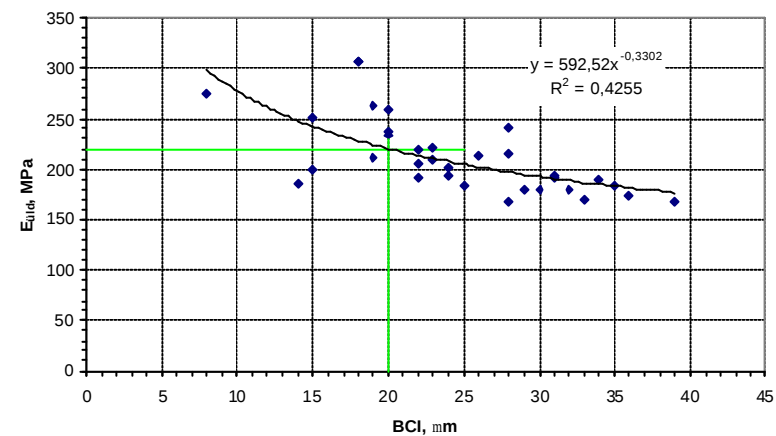
PAB-kate tasanduskihiga, defektideta, 225-439 normtelge/ööp



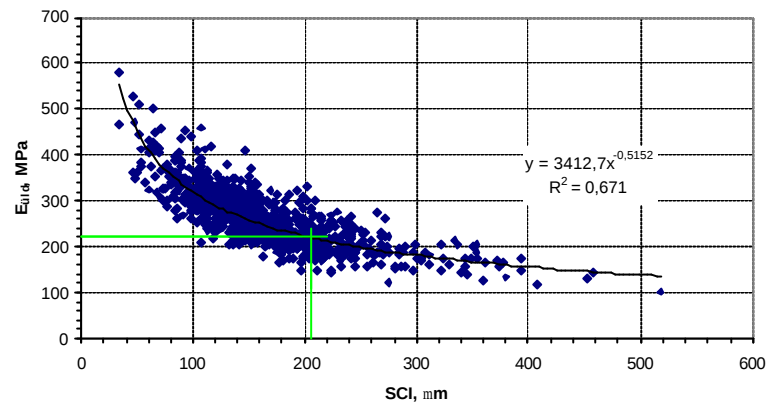
PAB-kate tasanduskihiga, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



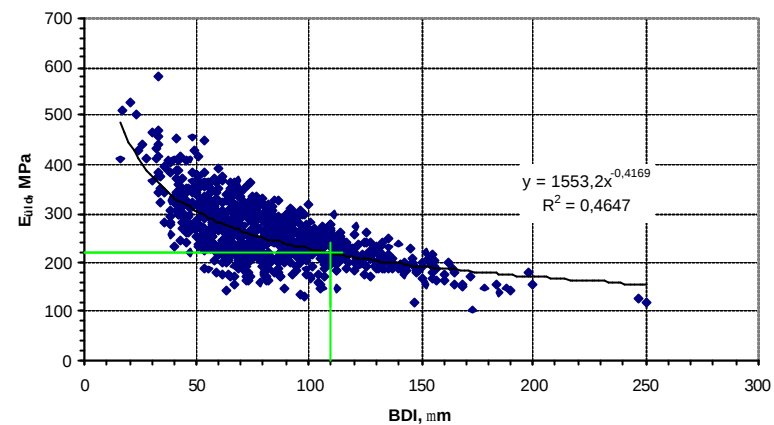
PAB-kate tasanduskihiga, defektidega, 225-439 normtelge/ööp



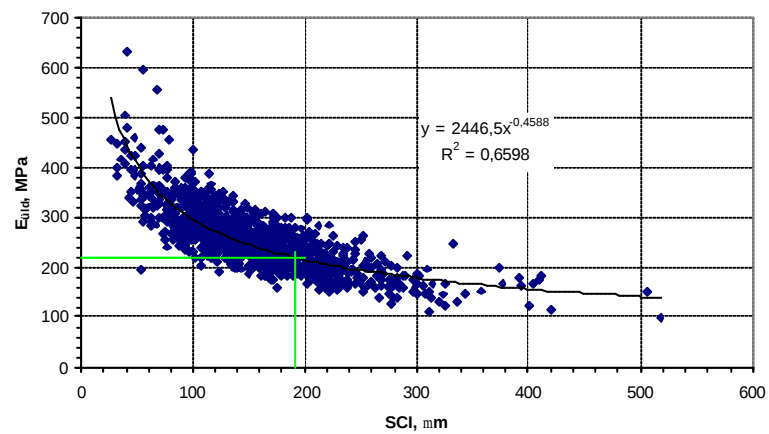
Mustkattega, defektideta teed, 225-439 normtelge/ööp



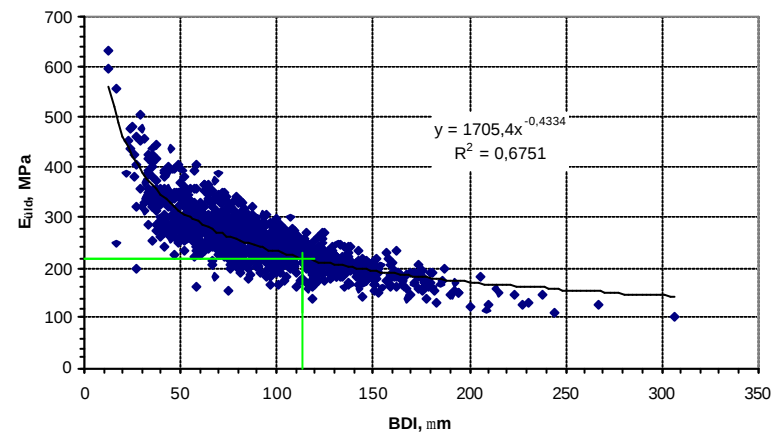
Mustkattega, defektideta teed, 225-439 normtelge/ööp



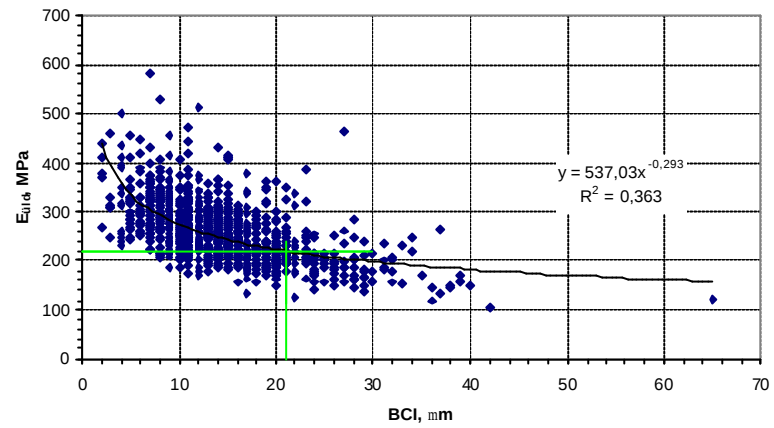
Mustkattega, defektidega teed, 225-439 normtelge/ööp



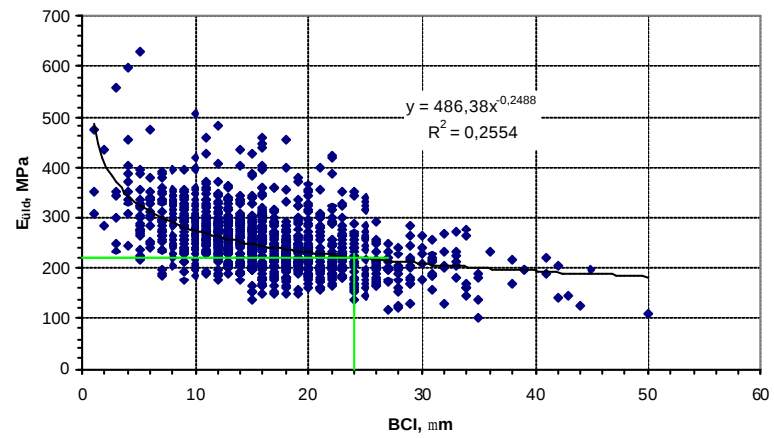
Mustkattega, defektidega teed, 225-439 normtelge/ööp



Mustkattega, defektideta teed, 225-439 normtelge/ööp

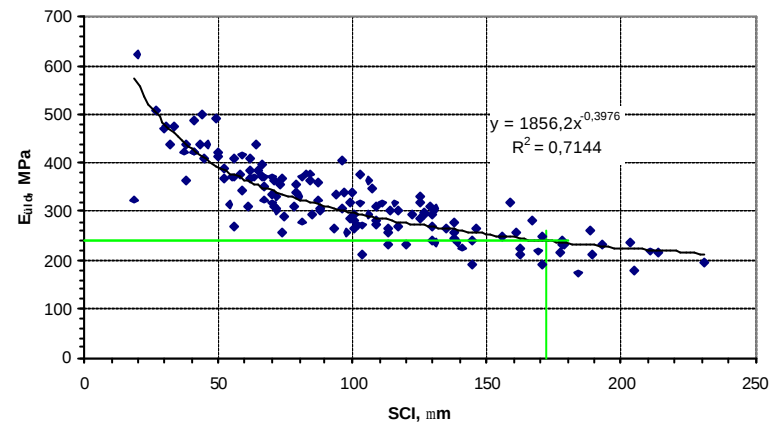


Mustkattega, defektidega teed, 225-439 normtelge/ööp

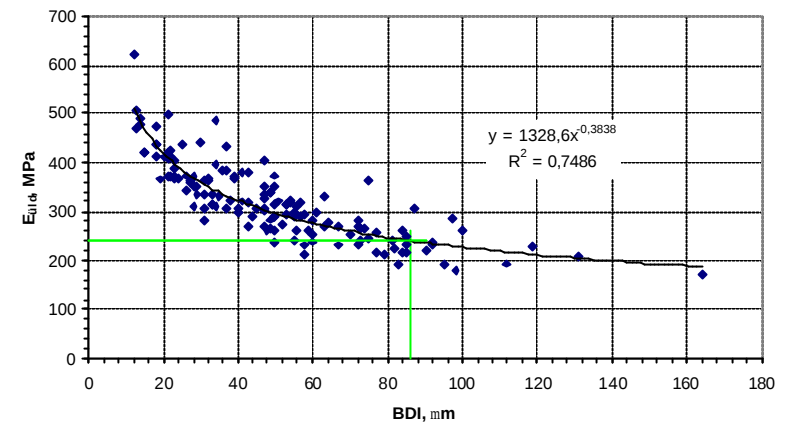


LISA F ANALÜÜSIGRUPP 6 – GRAAFIKUD

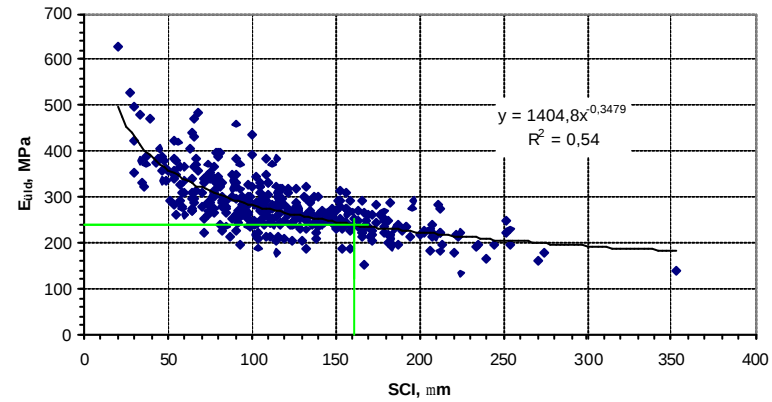
TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



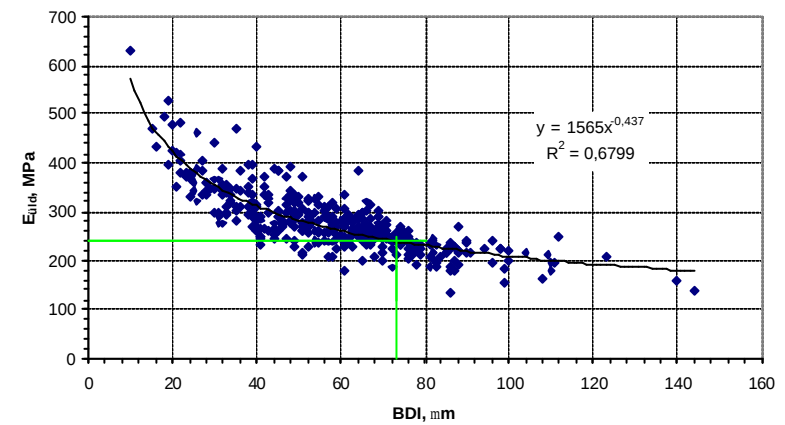
TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



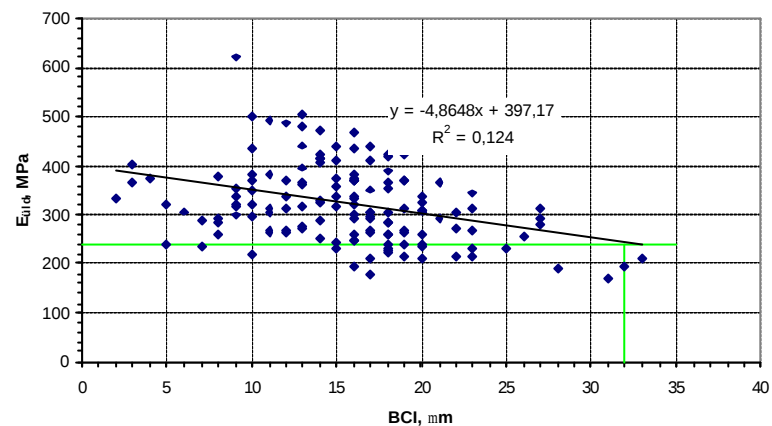
TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



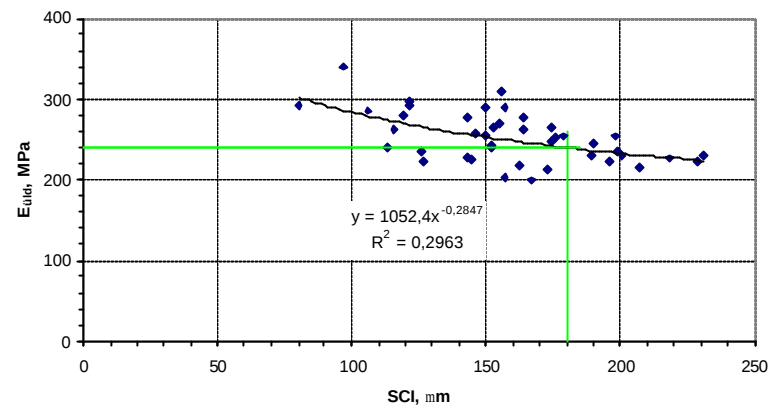
TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



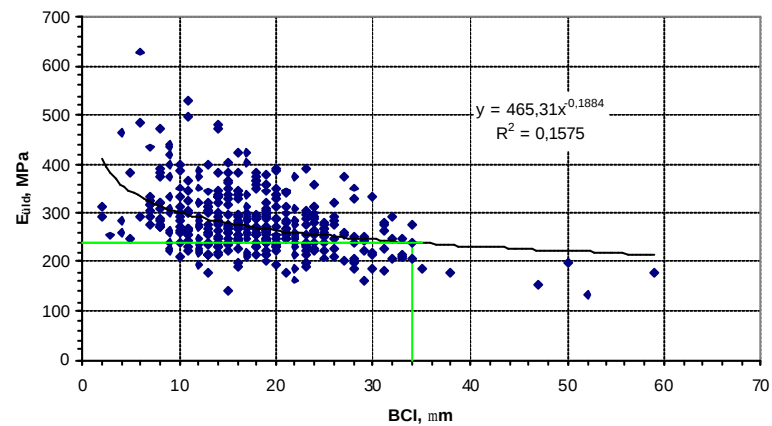
TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



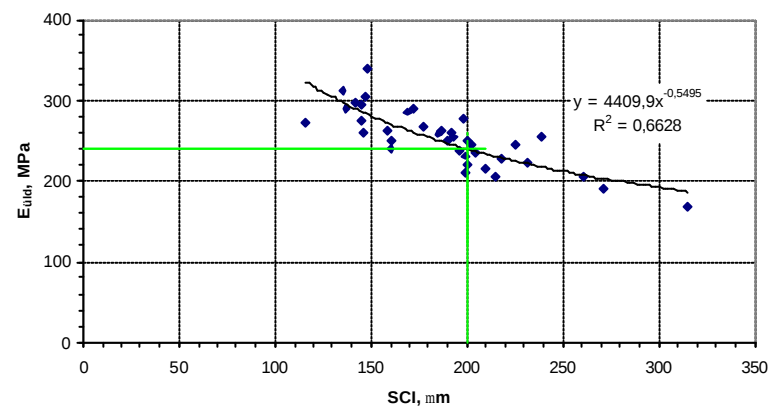
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



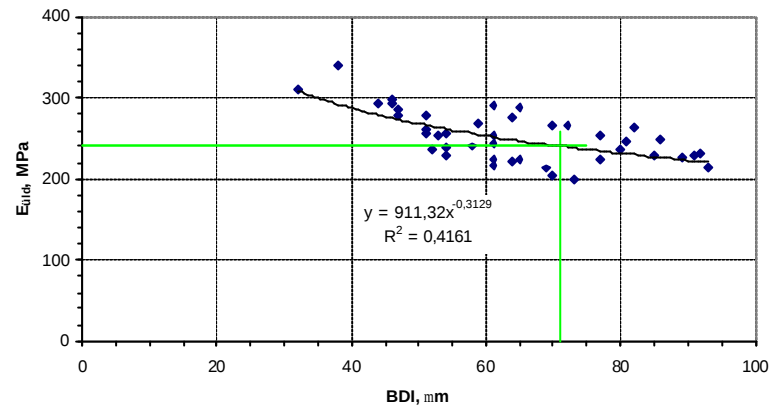
TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



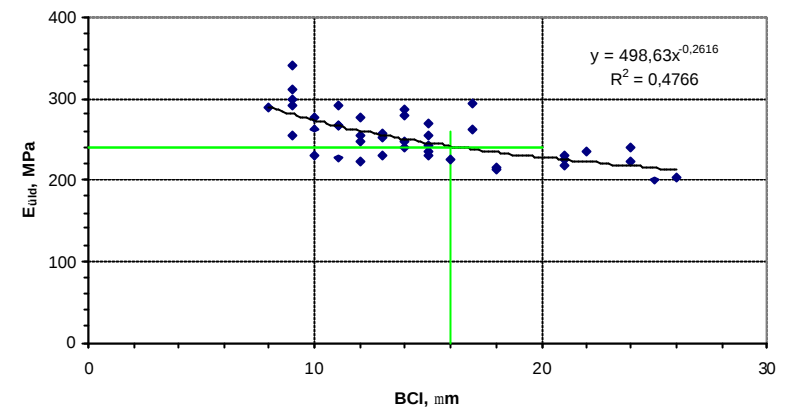
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



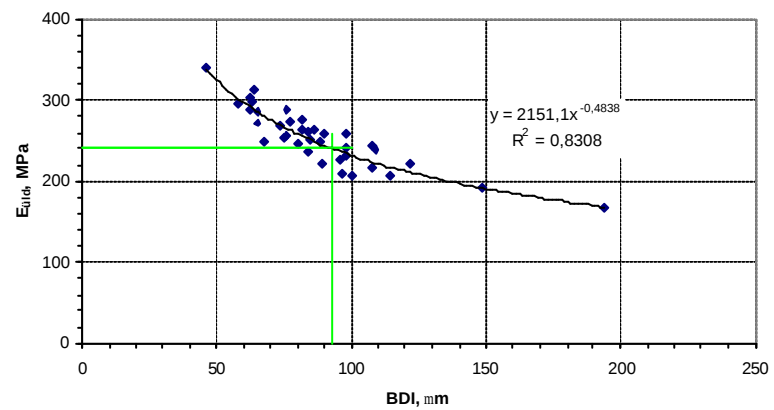
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektideta,
440-869 normtelge/ööp



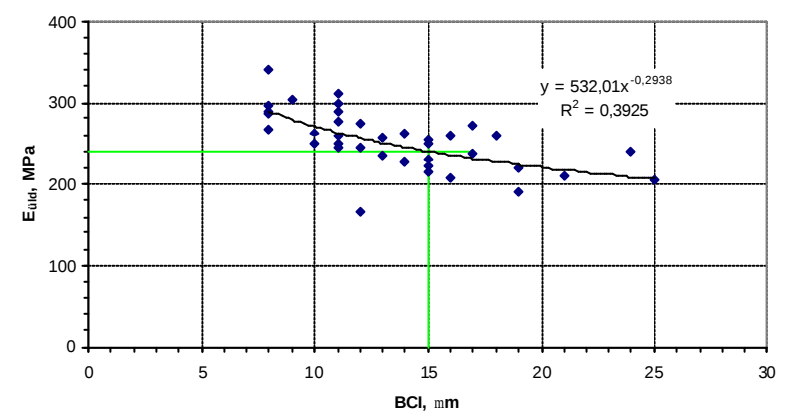
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektideta,
440-869 normtelge/ööp



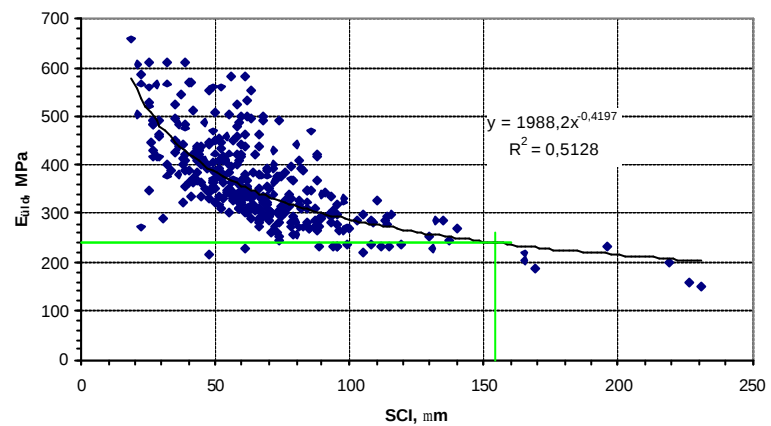
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektidega,
440-869 normtelge/ööp



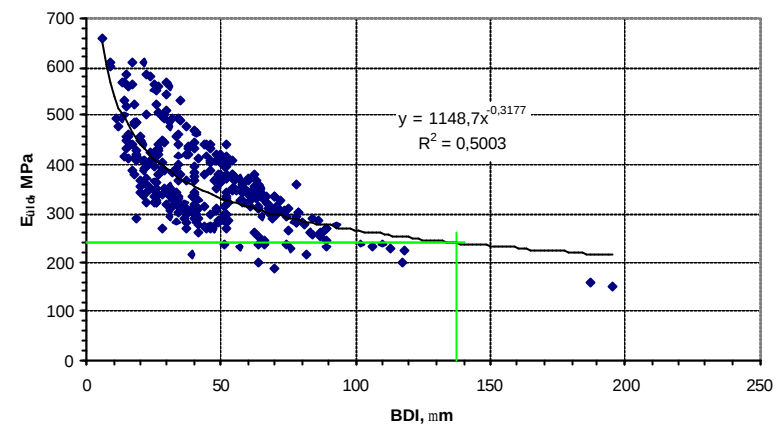
TAB-kate tasandusfreesimisele, defektidega,
440-869 normtelge/ööp



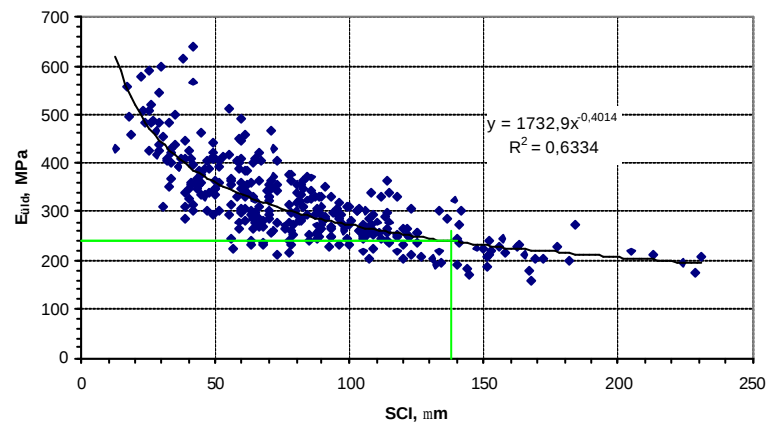
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



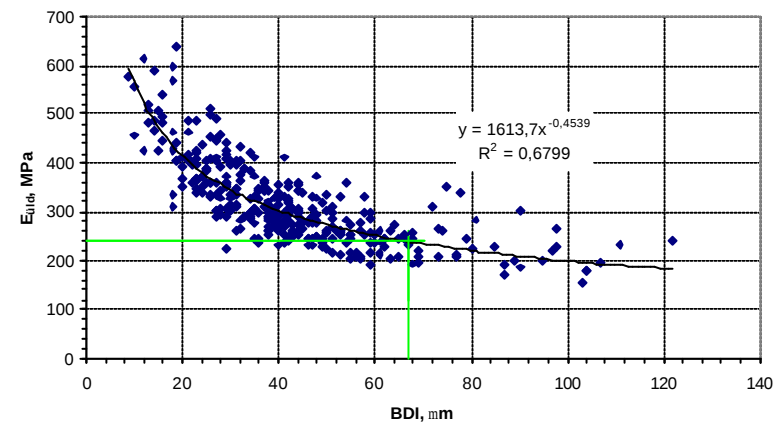
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



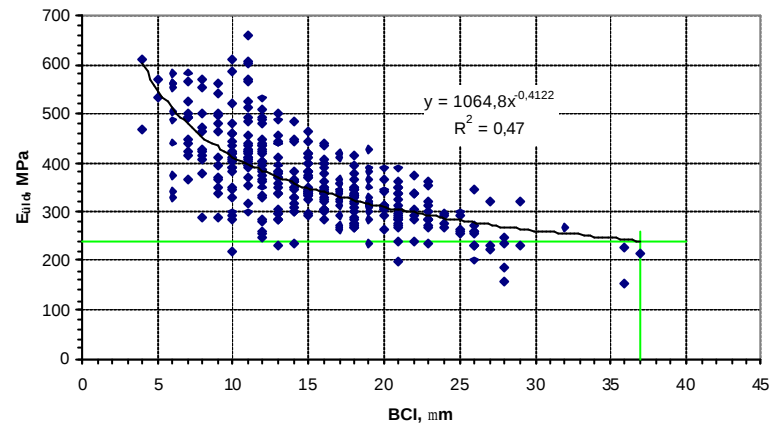
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



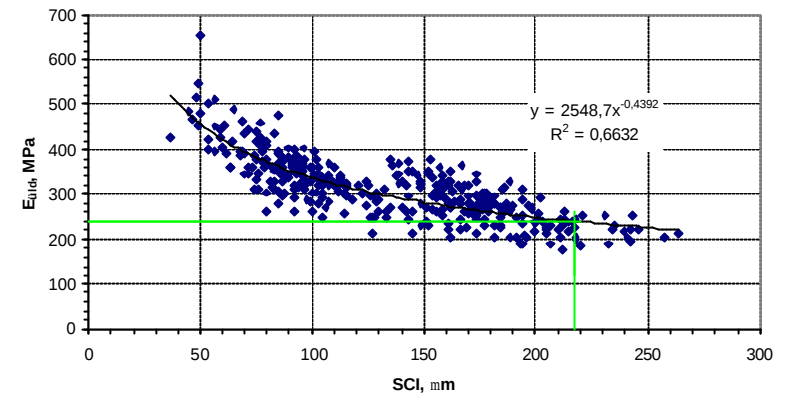
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



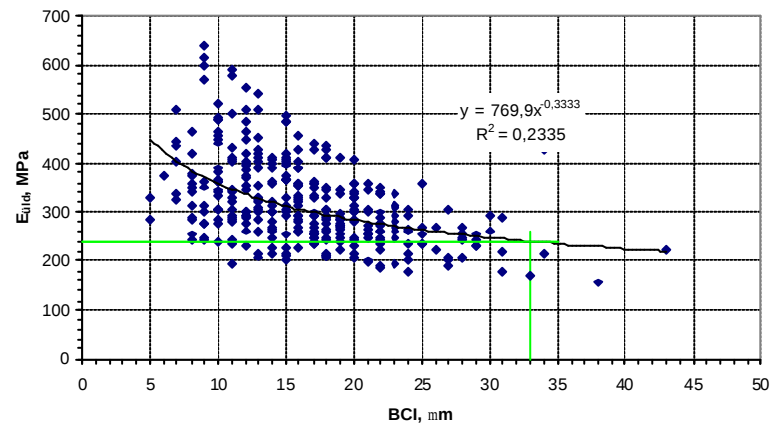
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



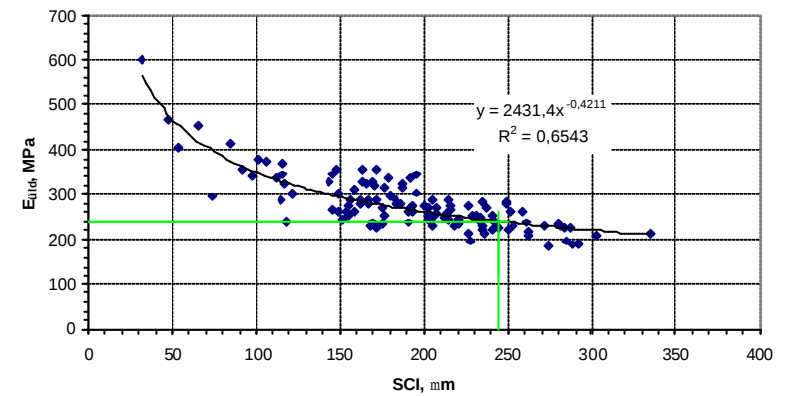
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



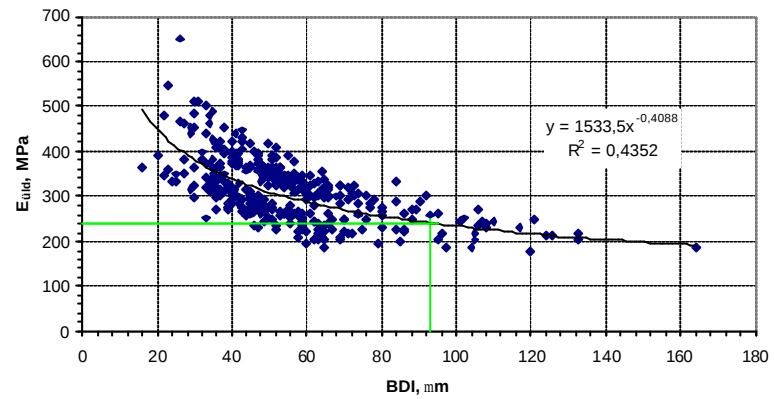
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



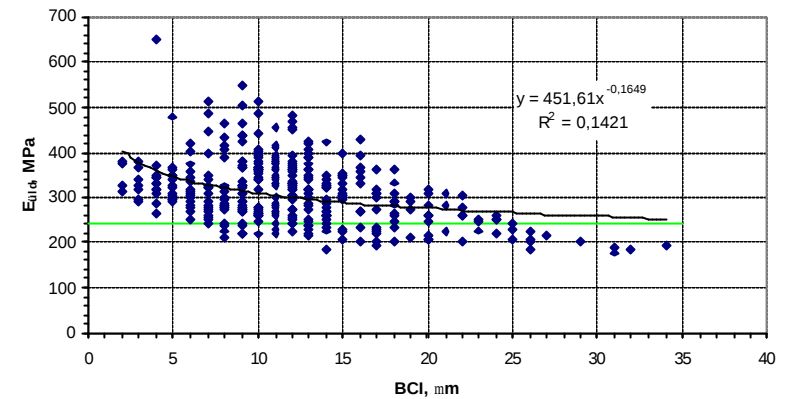
TAB-kate bit.stabiliseerimisega, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



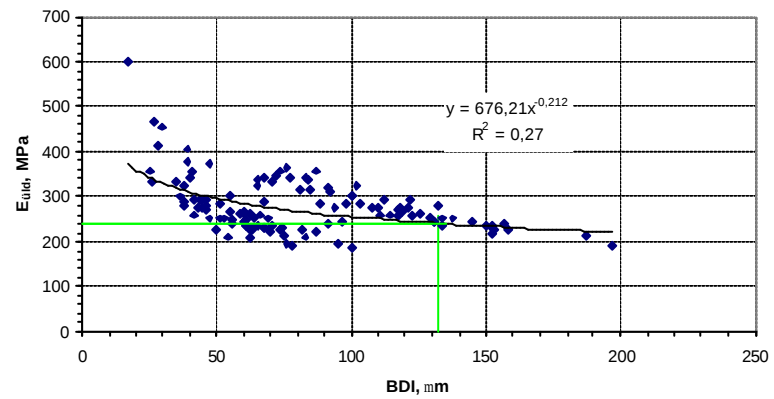
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta,
440-869 normtelge/ööp



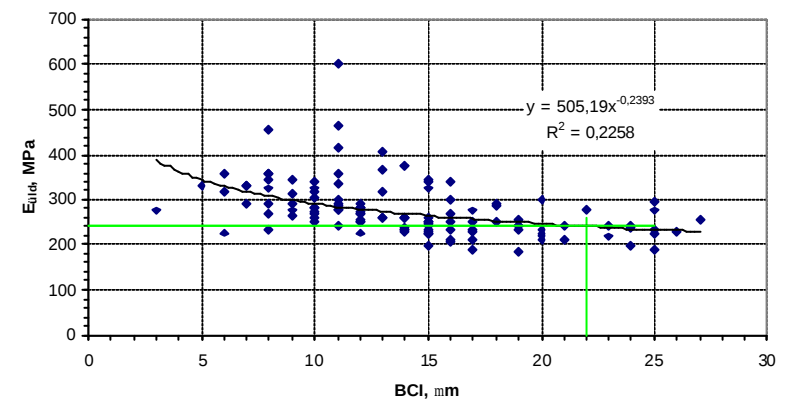
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta,
440-869 normtelge/ööp



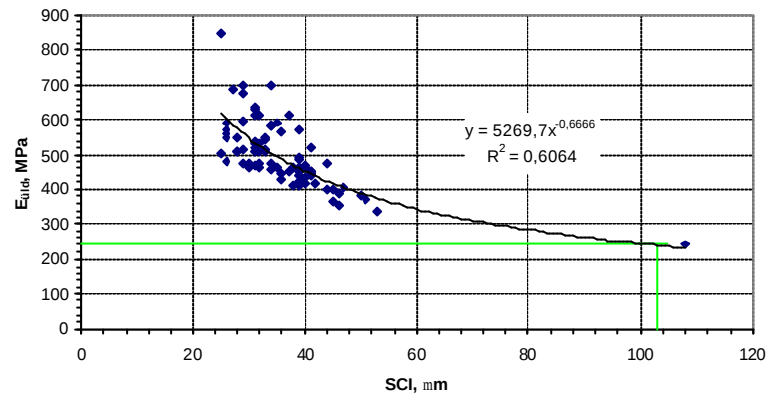
TAB-kate bit.stabiliseerimisega, defektidega, 440-869
normtelge/ööp



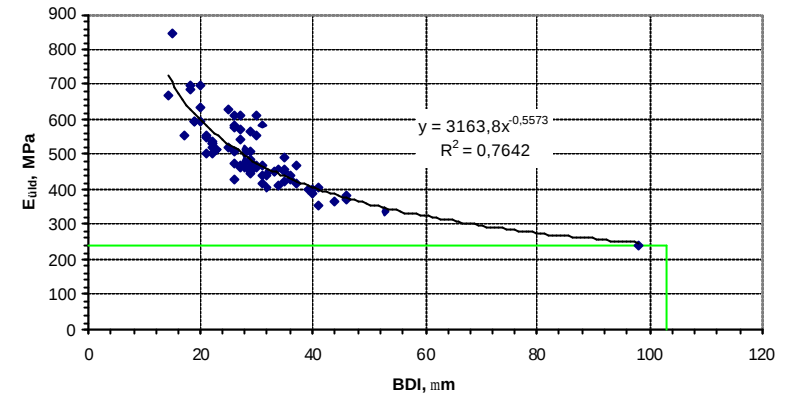
TAB-kate bit.stabiliseerimisega, defektidega, 440-869
normtelge/ööp



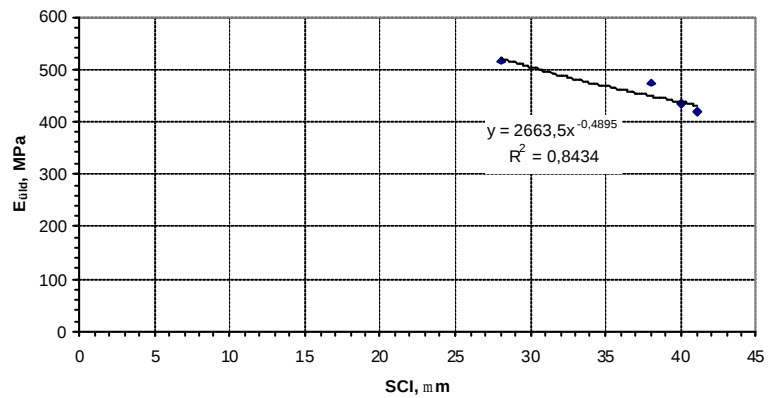
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
440-869 normtelge/ööp



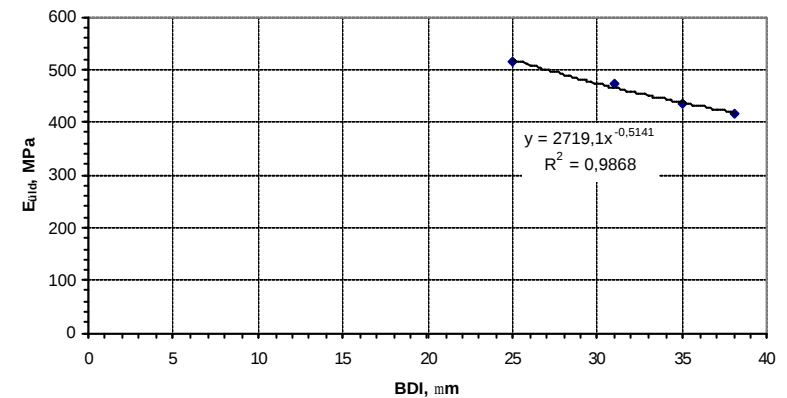
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
440-869 normtelge/ööp



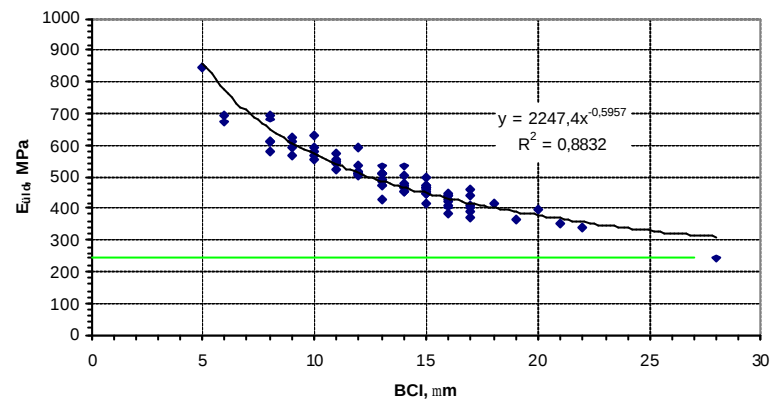
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
440-869 normtelge/ööp



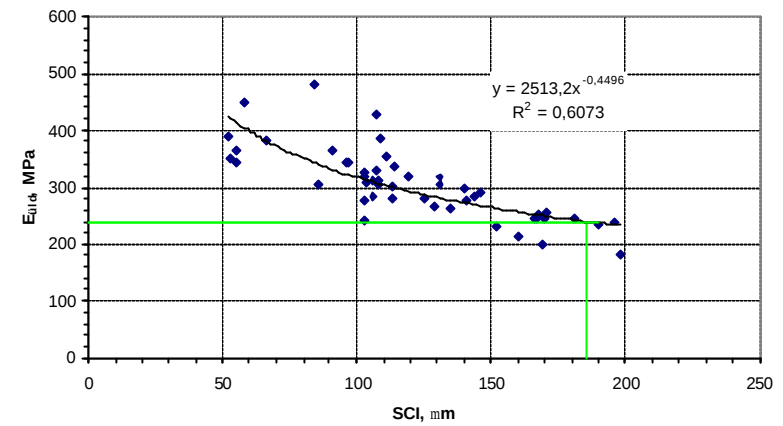
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
440-869 normtelge/ööp



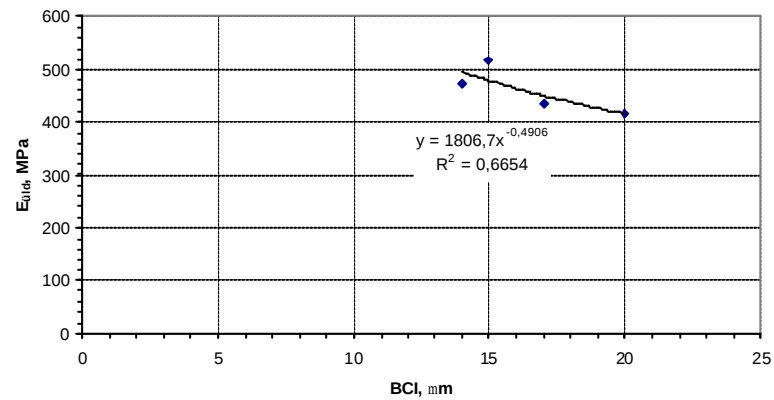
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
440-869 normtelge/ööp



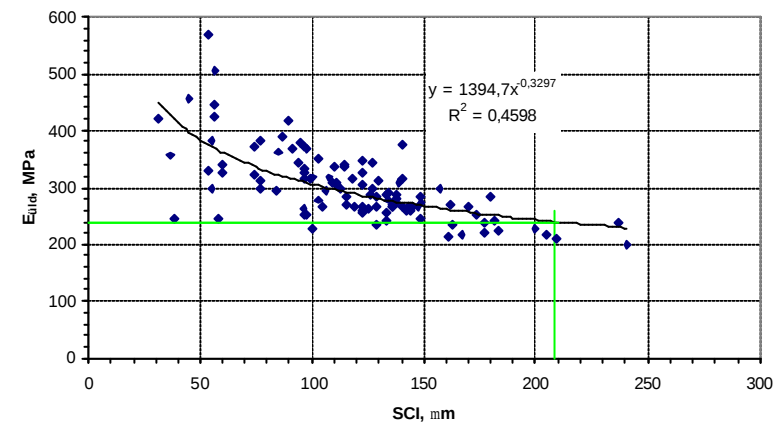
TAB-kate killustikalusel, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



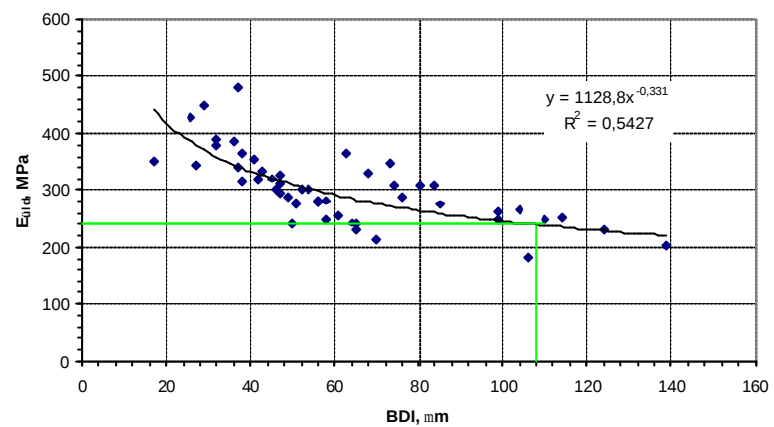
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
440-869 normtelge/ööp



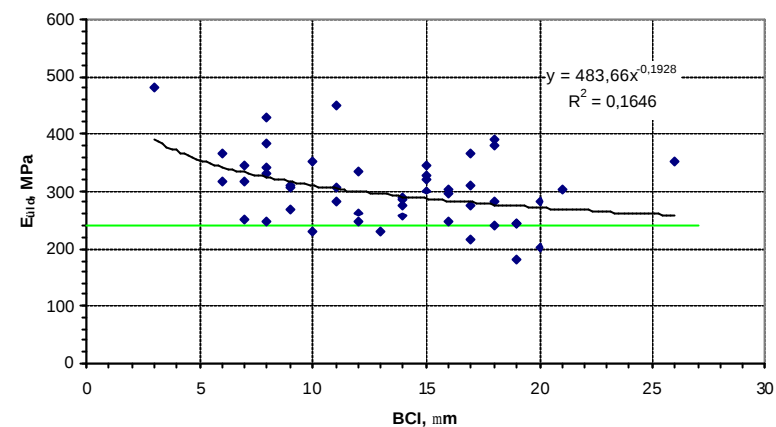
TAB-kate killustikalusel, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



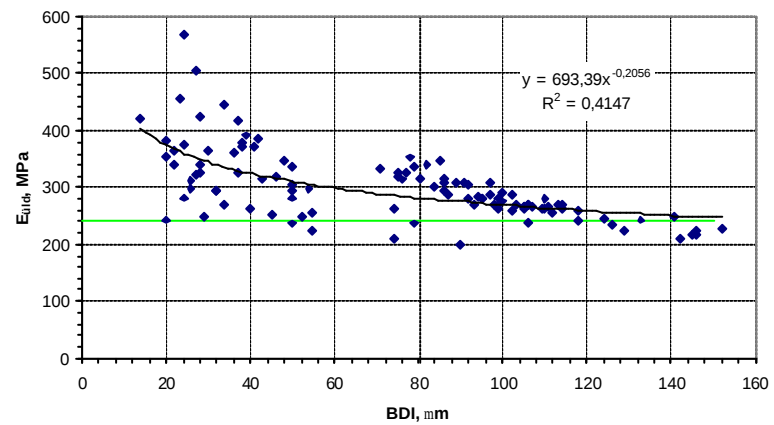
TAB-kate killustikalusel, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



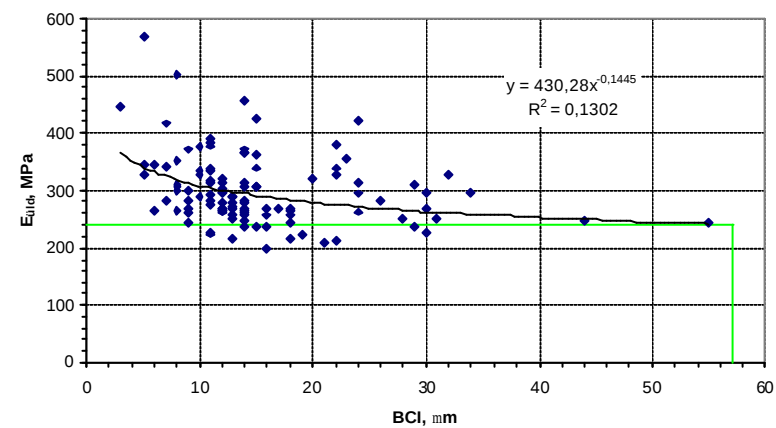
TAB-kate killustikalusel, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



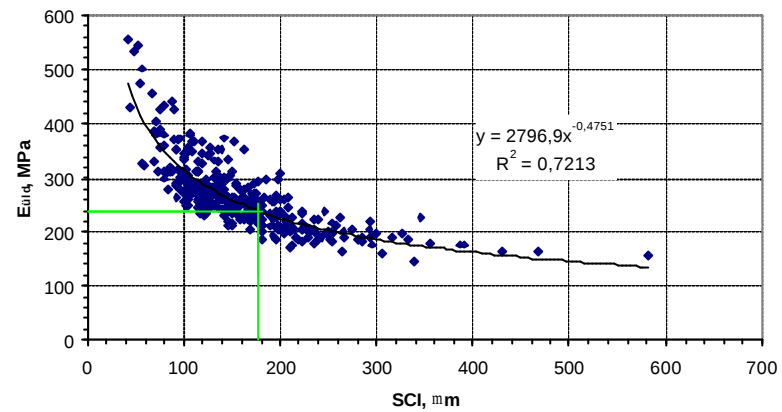
TAB-kate killustikalusel, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



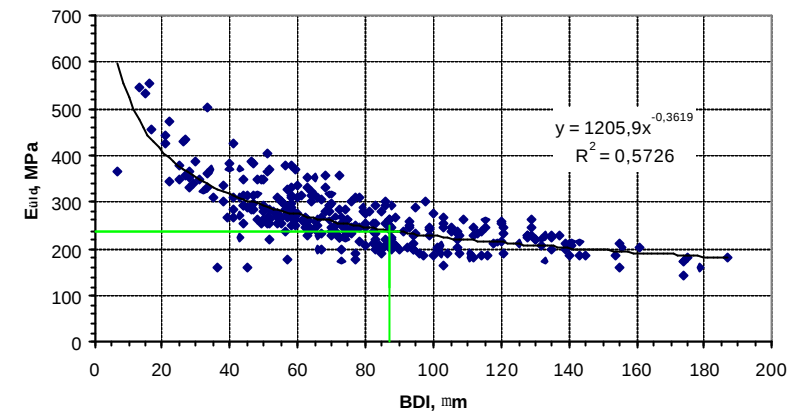
TAB-kate killustikalusel, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



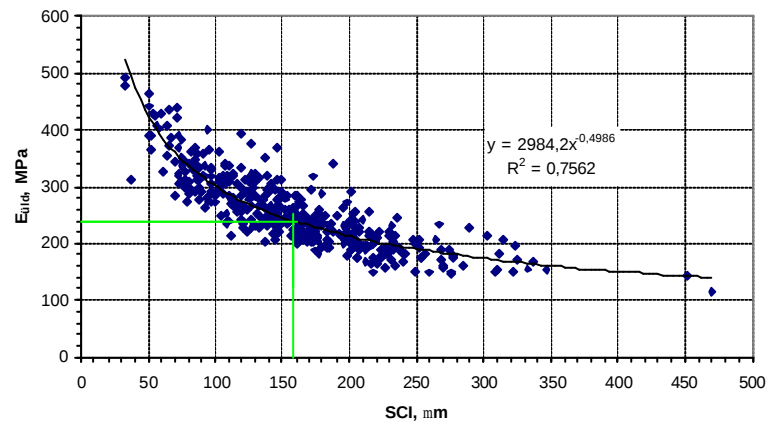
Mustkattega, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



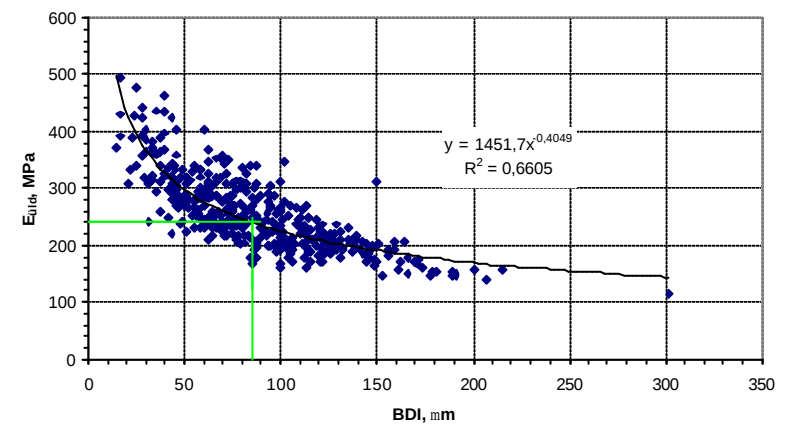
Mustkattega, defektideta, 440-869 normtelge/ööp



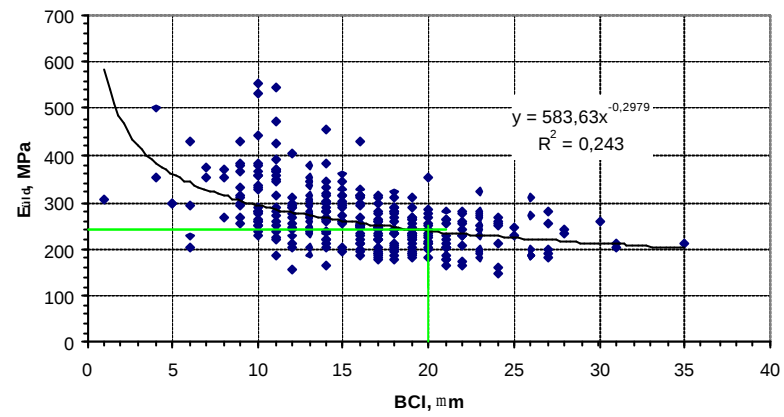
Mustkattega, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



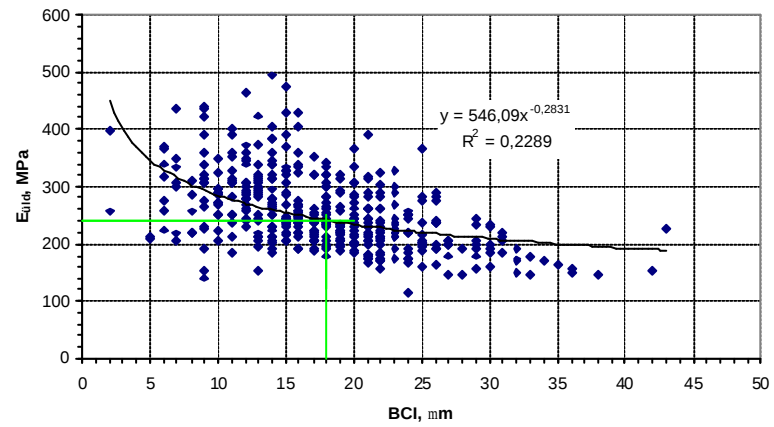
Mustkattega, defektidega, 440-869 normtelge/ööp



Mustkattega, defektideta, 440-869 normtelge/ööp

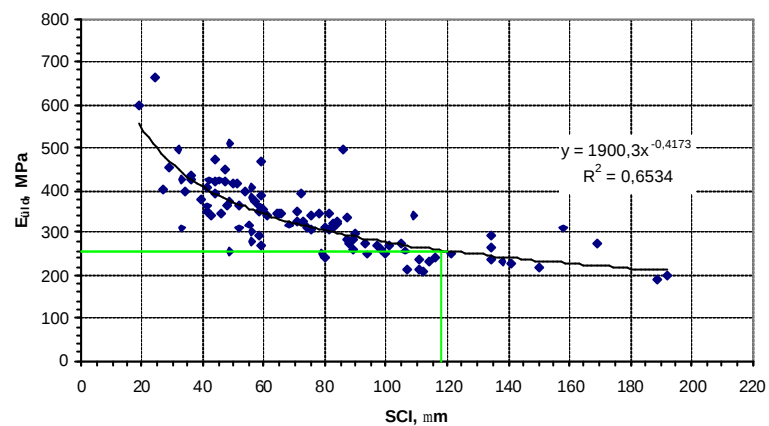


Mustkattega, defektidega, 440-869 normtelge/ööp

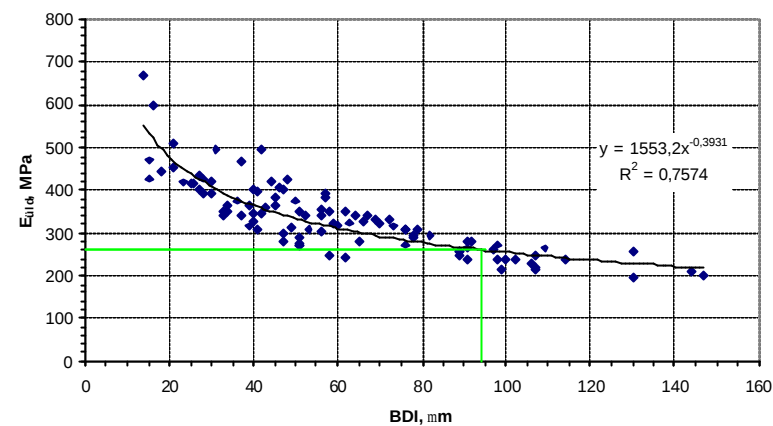


LISA G ANALÜÜSIGRUPP 7 – GRAAFIKUD

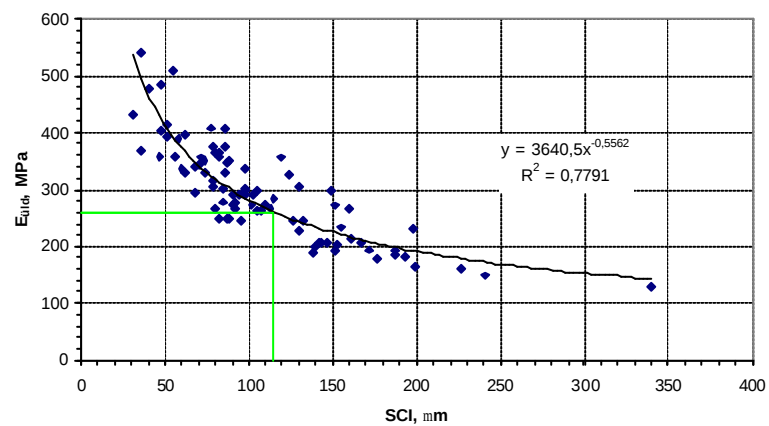
TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, >870 normtelge/ööp



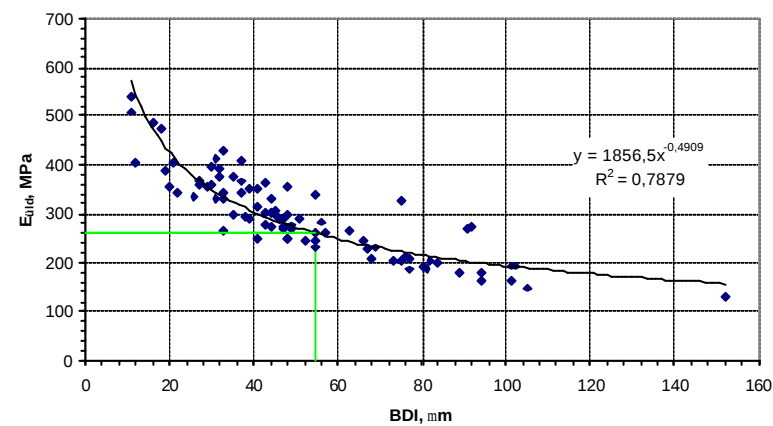
TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, >870 normtelge/ööp



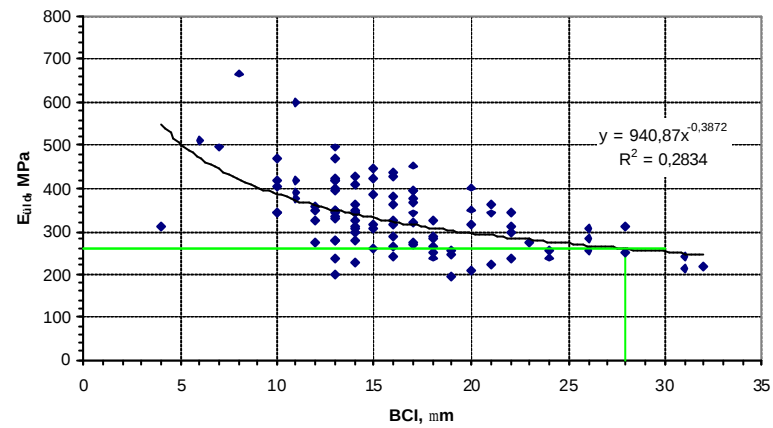
TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, >870 normtelge/ööp



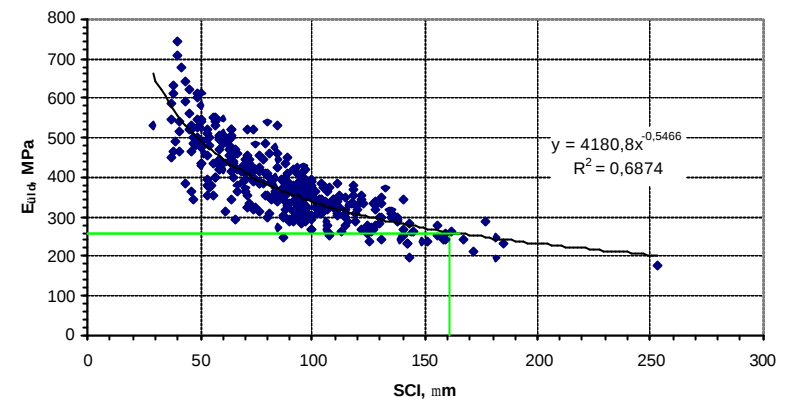
TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, >870 normtelge/ööp



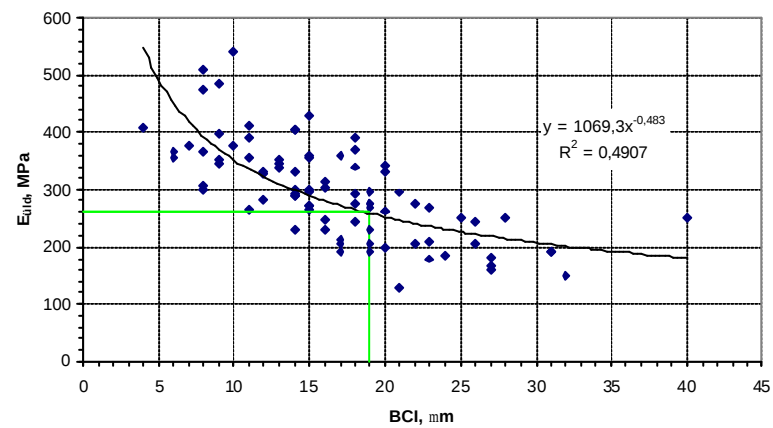
TAB-kate ol.ol.kattele, defektideta, >870 normtelge/ööp



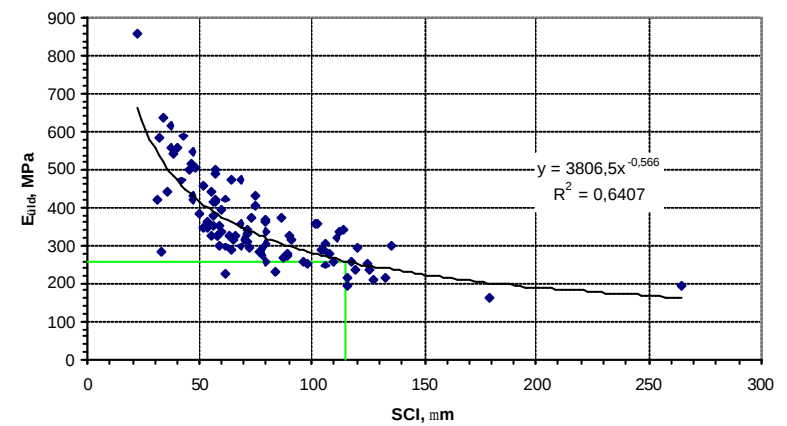
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta, >870 normtelge/ööp



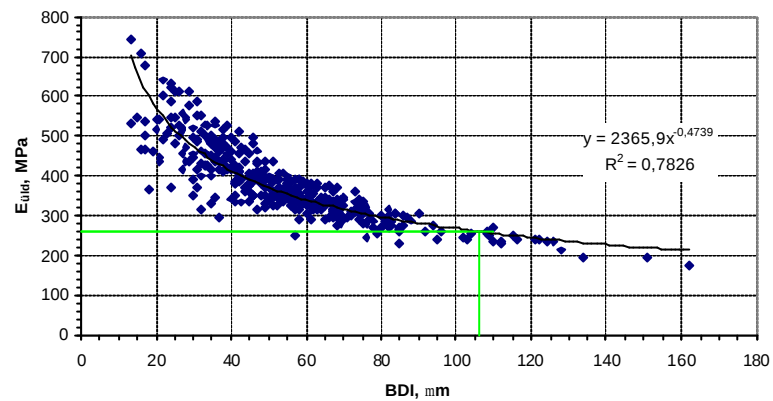
TAB-kate ol.ol.kattele, defektidega, >870 normtelge/ööp



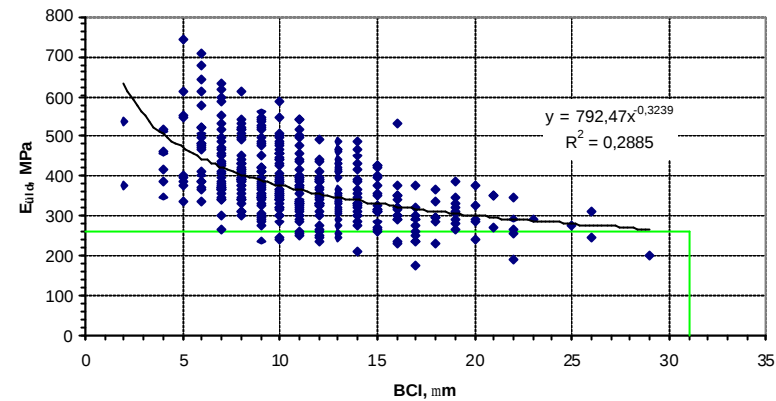
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega, >870 normtelge/ööp



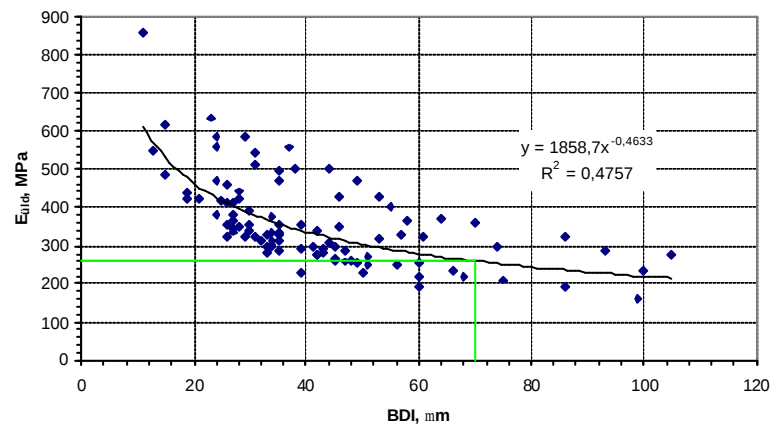
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta,
>870 normtelge/ööp



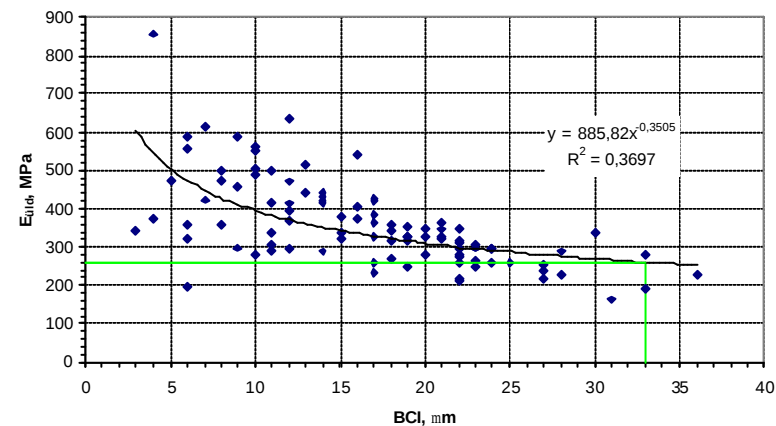
TAB-kate tasanduskihiga, defektideta,
>870 normtelge/ööp



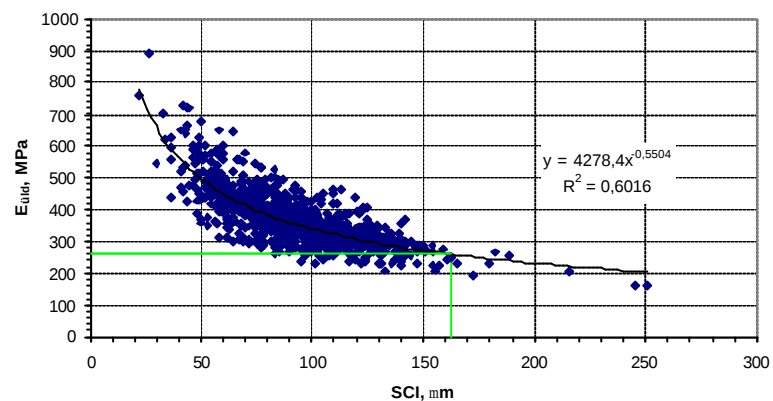
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega, >870 normtelge/ööp



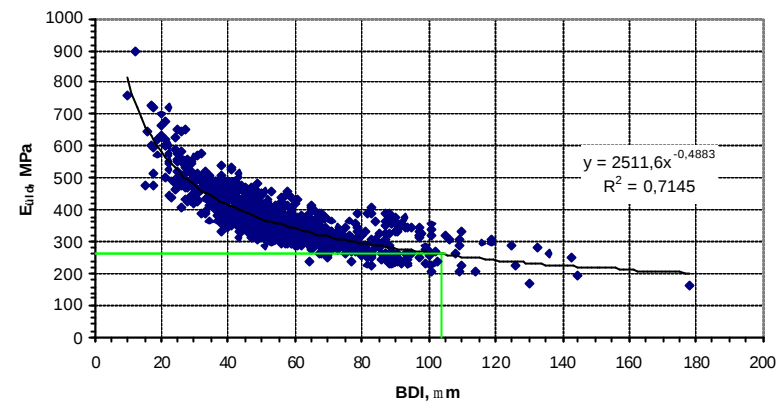
TAB-kate tasanduskihiga, defektidega, >870 normtelge/ööp



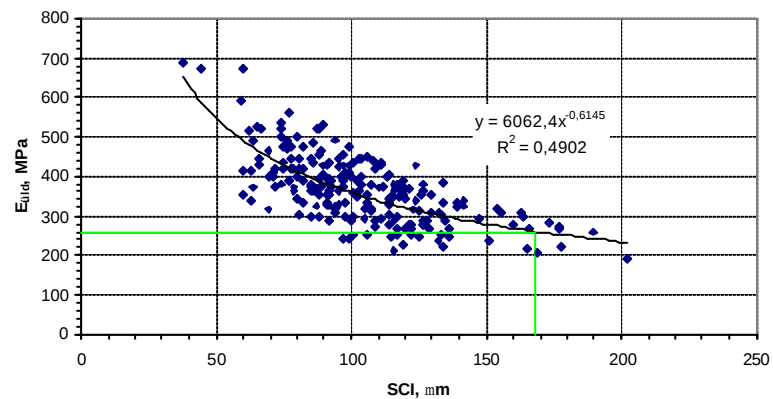
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



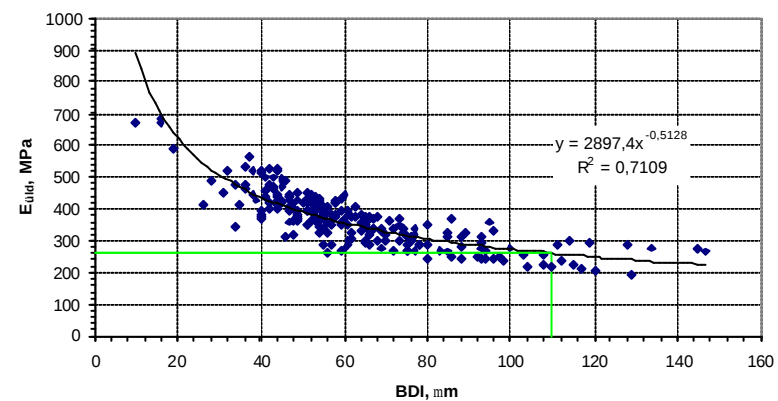
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



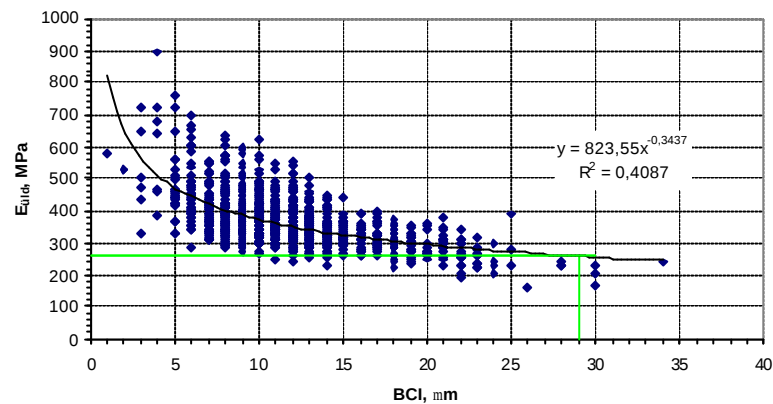
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



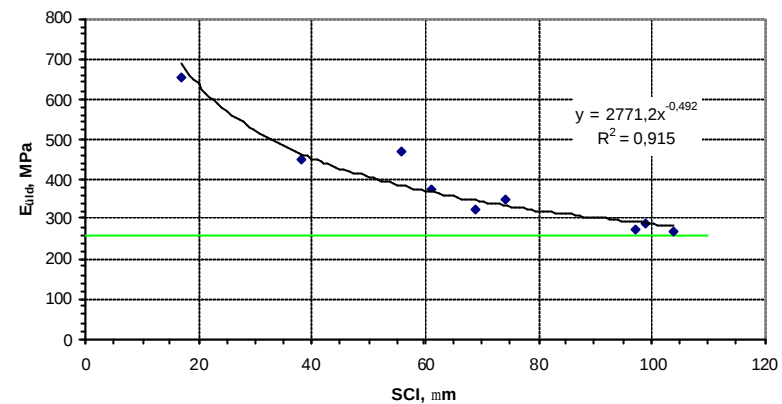
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



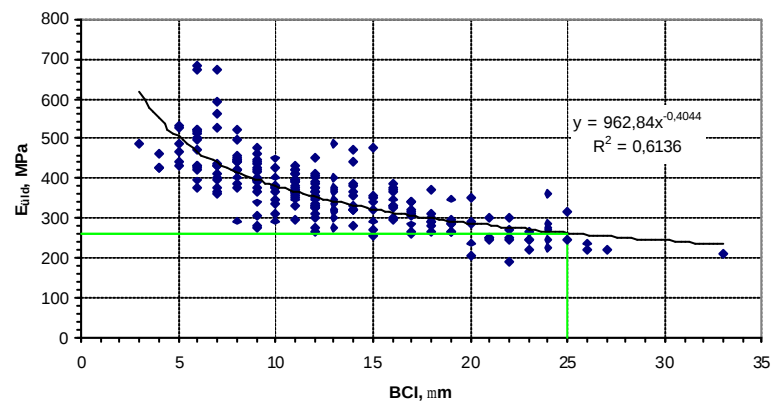
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



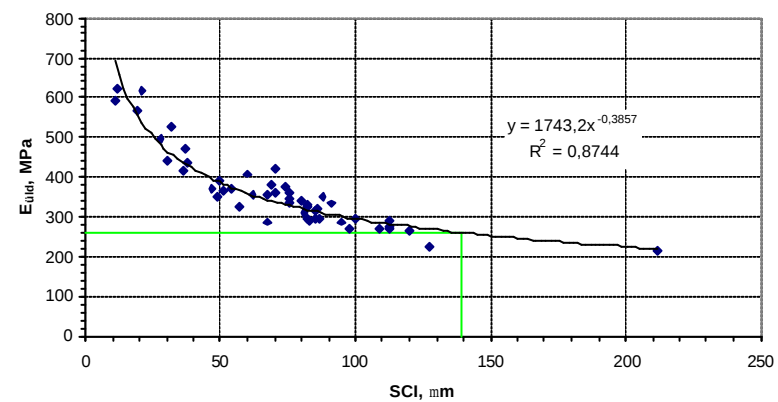
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



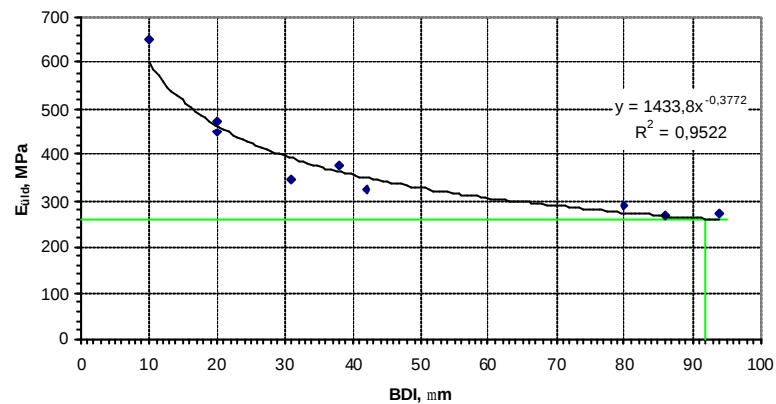
TAB-kate bit.stabiliseeritud alusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



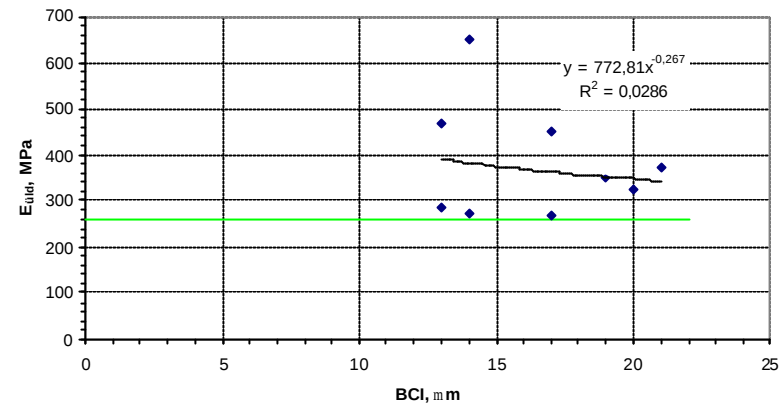
TAB-kate tuhkstabiliseeritud alusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



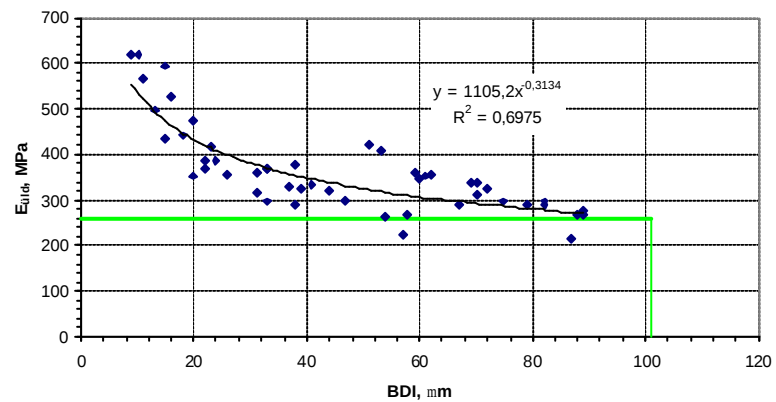
TAB-kate tuhkestabiliseeritud alusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



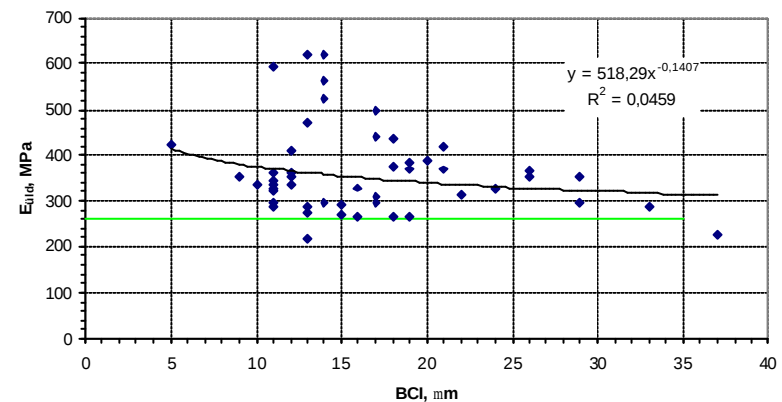
TAB-kate tuhkestabiliseeritud alusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



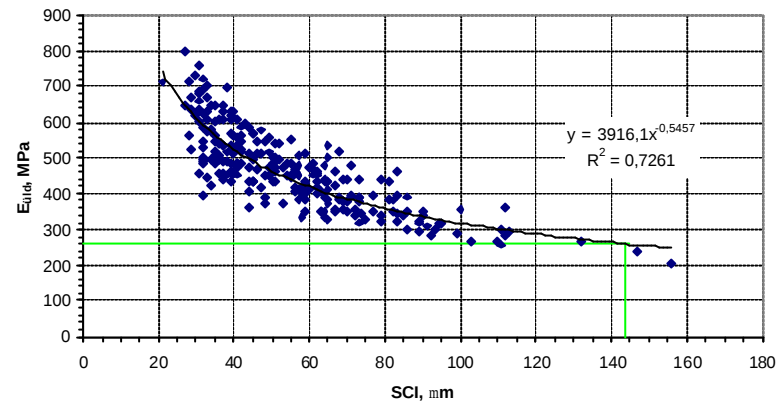
TAB-kate tuhkestabiliseeritud alusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



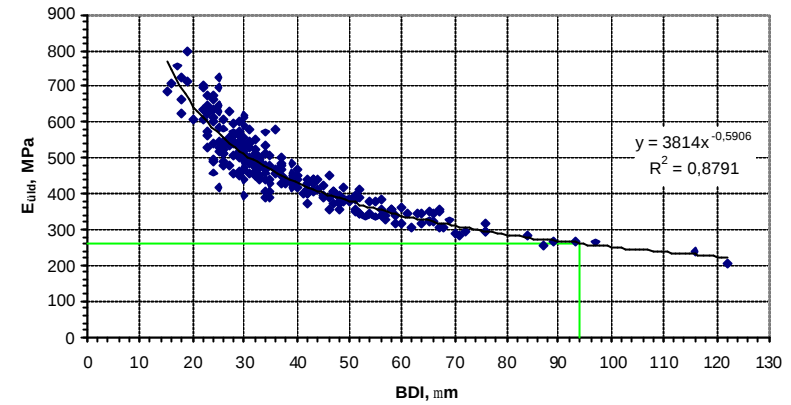
TAB-kate tuhkestabiliseeritud alusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



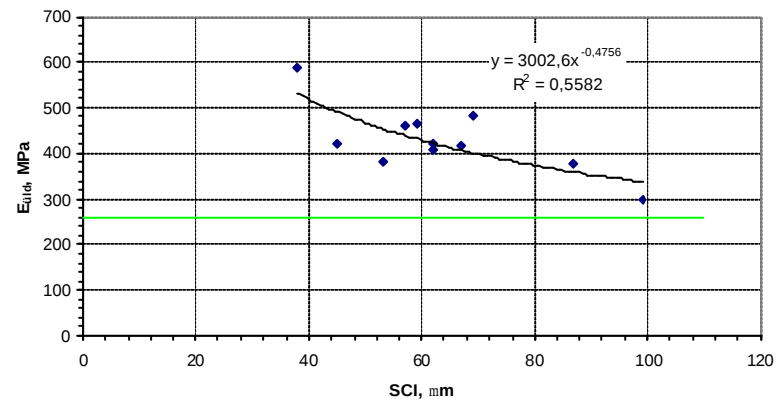
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



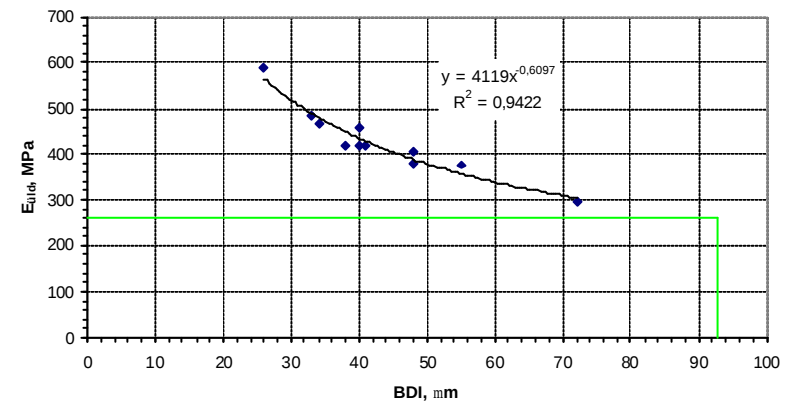
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



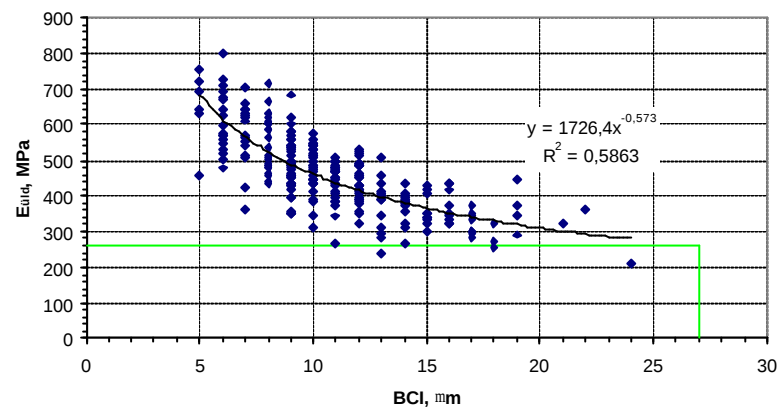
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



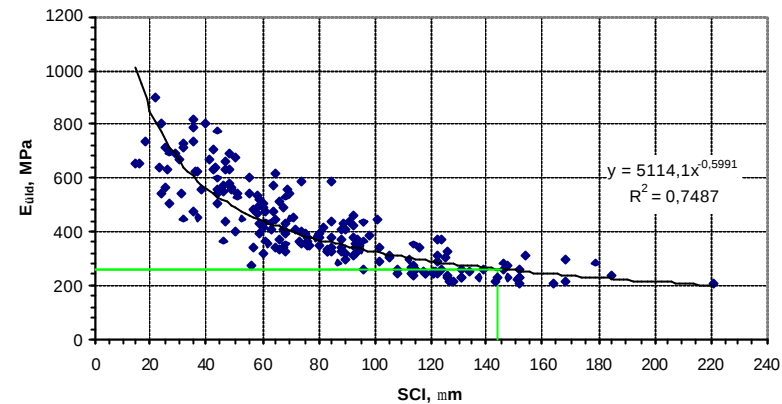
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



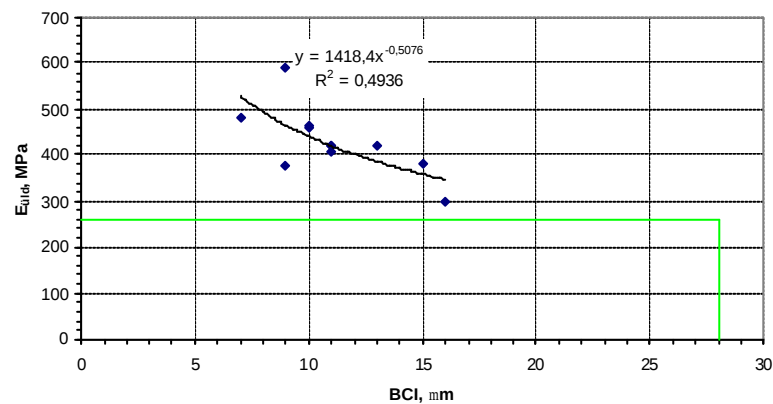
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



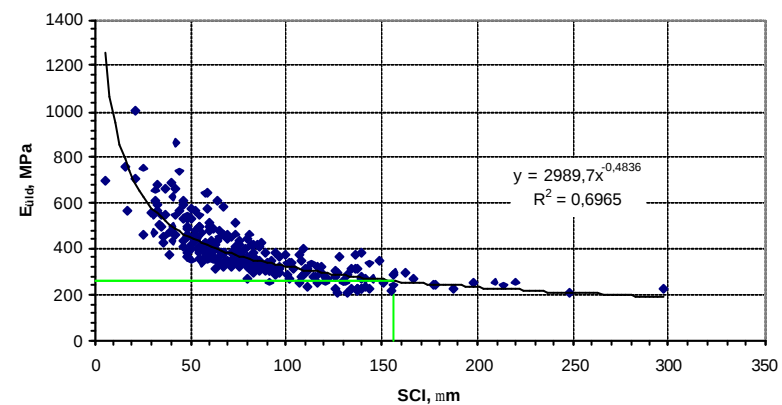
TAB-kate killustikalusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



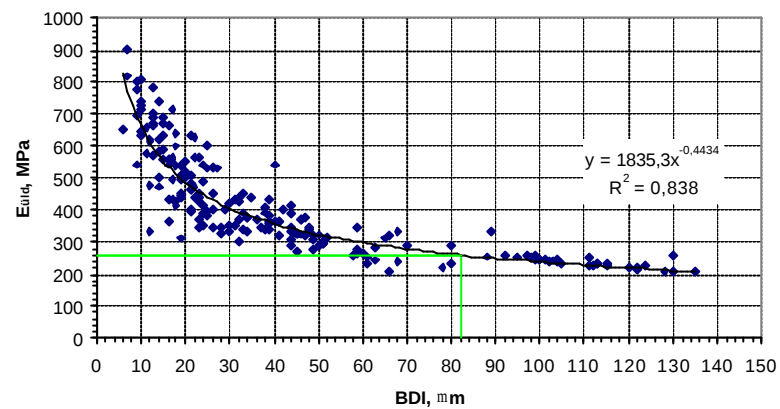
TAB-kate kompleksstabiliseeritud alusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



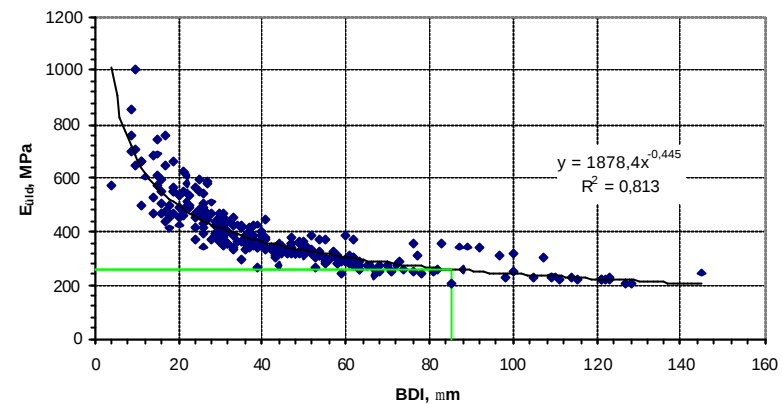
TAB-kate killustikalusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



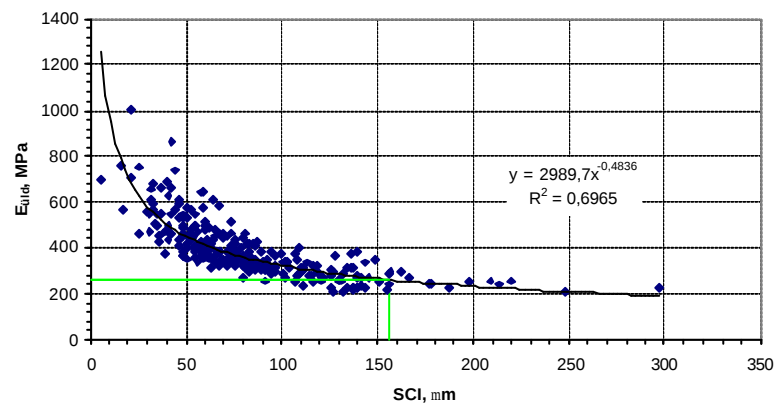
TAB-kate killustikalusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



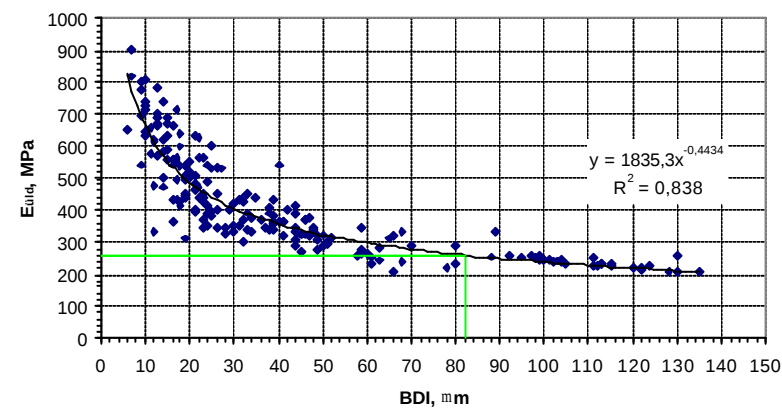
TAB-kate killustikalusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



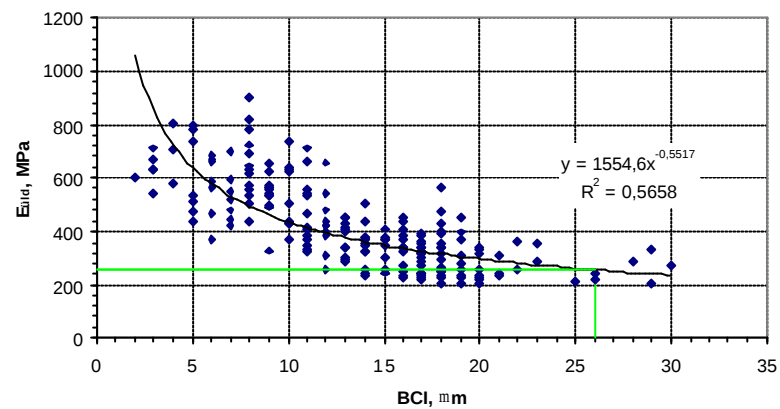
TAB-kate killustikalusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



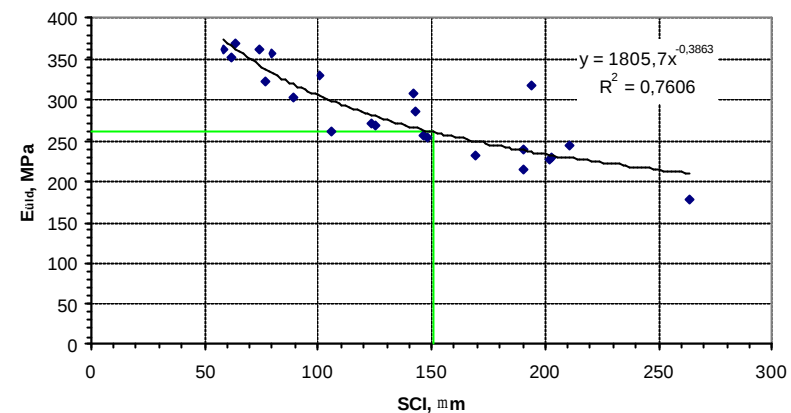
TAB-kate killustikalusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



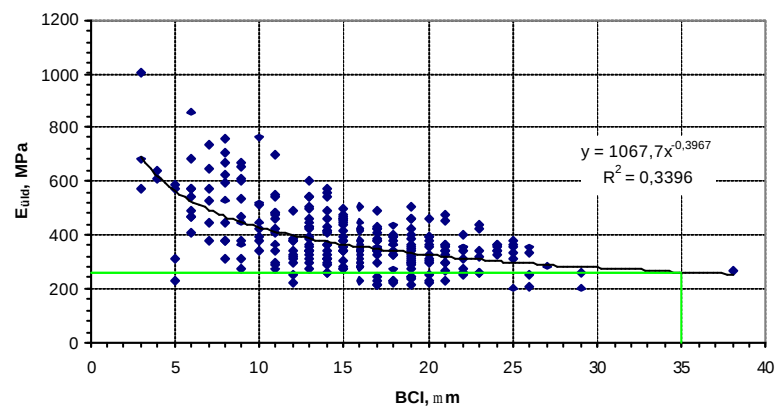
TAB-kate killustikalusega, defektideta,
>870 normtelge/ööp



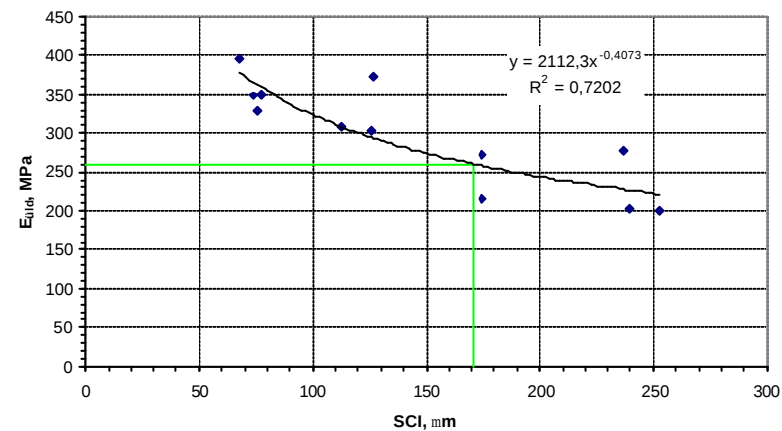
Mustkattega teed, defektideta,
>870 normtelge/ööp



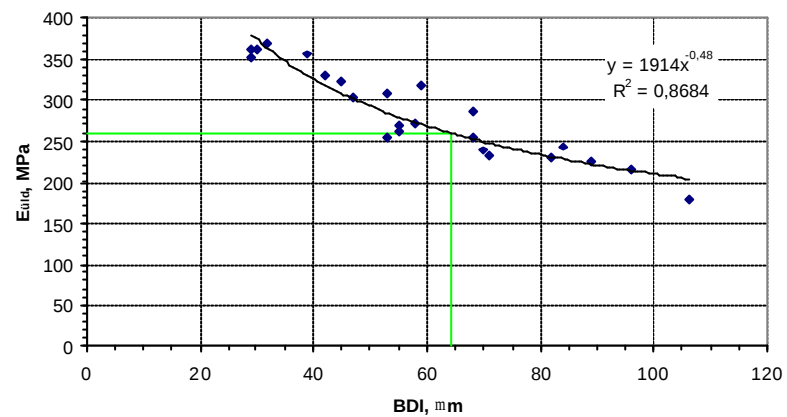
TAB-kate killustikalusega, defektidega,
>870 normtelge/ööp



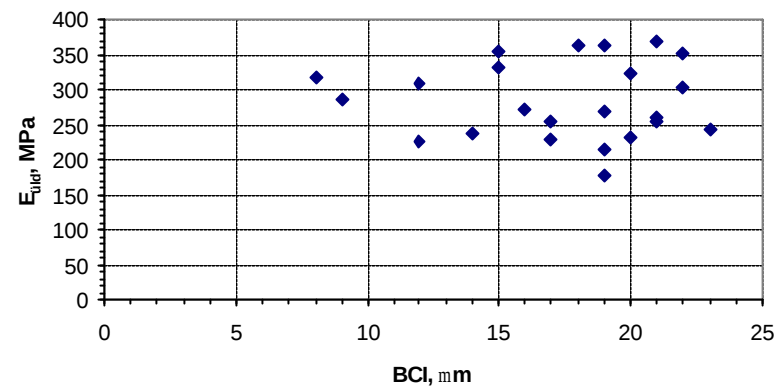
Mustkattega, defektidega, >870 normtelge/ööp



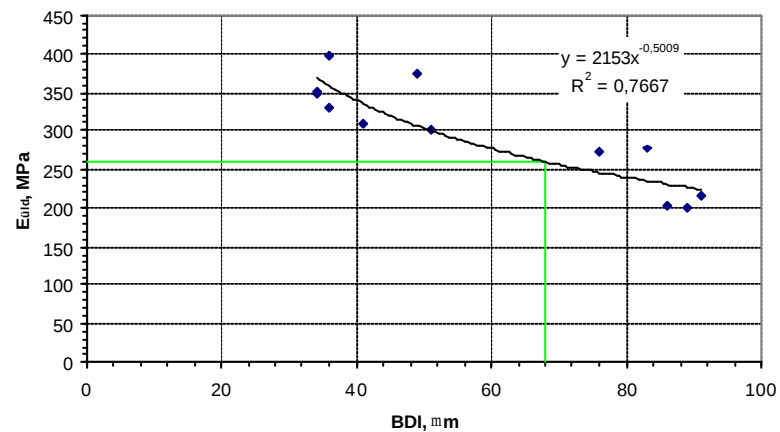
Mustkattedega teed, defektideta,
>870 normtelge/ööp



Mustkattedega teed, defektideta,
>870 normtelge/ööp



Mustkattedega, defektidega, >870 normtelge/ööp



Mustkattedega, defektidega, >870 normtelge/ööp

