TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

EESTIS KASUTUSEL OLEVA KATENDIARVUTUSMETOODIKA PROBLEEMID NING ALTERNATIIVSE PROGRAMMI REALISEERIMINE KASUTADES SOOME METOODIKAT

THE PROBLEMS OF THE PAVEMENT CALCULATION SOFTWARE IN ESTONIA AND THE DEVELOPMENT OF AN ALTERNATIVE APPLICATION USING FINNISH PAVEMENT DESIGN METHODOLOGY

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Simmo Talpas-Taltsepp

Üliõpilaskood 192624EATI

Juhendaja: Ain Kendra

Tallinn 2023

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

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

"....." ..... 20…..

Autor: .....
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20…..

Juhendaja: .....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."..... 20… .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks[1]

Mina Simmo Talpas-Taltsepp

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose EESTIS KASUTUSEL OLEVA KATENDIARVUTUSMETOODIKA PROBLEEMID NING ALTERNATIIVSE PROGRAMMI REALISEERIMINE KASUTADES SOOME METOODIKAT,

mille juhendaja on Ain Kendra,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (kuupäev)

[1] *Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.*

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Simmo Talpas-Taltsepp, 192624EATI

Õppekava, peaeriala: EATI02/17 – Teedeehitus ja geodeesia

Juhendaja(d): Lektor Ain Kendra

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Eestis kasutusel oleva katendiarvutusmetoodika probleemid ning alternatiivse programmi realiseerimine kasutades Soome metoodikat

(inglise keeles) The problems of the pavement calculation software in Estonia and the development of an alternative application using Finnish pavement design methodology

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Selgitada põhjused miks hetkel olemasolev katendiarvutusprogramm ei ole jätkusuutlik.
2. Uue lahenduse jaoks kehtestada põhimõtted.
3. Välja töötada uus katendi arvutusprogramm. Kasutades selleks MS Excel VBA võimalusi.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	VSN 46-83 metoodika ja KAP-rakenduse puudused	10.10
2.	Uue lahenduse põhimõtted	29.10
3.	Tarkvara testversioon ja töö vormistus	29.11

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 2. jaanuar 2024a

Üliõpilane: …….. ..... "....."..... 20…..a
/allkiri/

Juhendaja: …….. ..... "....."..... 20…..a
/allkiri/

Programmijuht: …….. ..... "....."..... 20…..a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

Eessõna 7
Kasutatavad mõisted 8
1. SISSEJUHATUS 9
2. KAP JA PÕHILISED PROBLEEMID 12
2.1 Pinnaste ja materjalide liigitus 13
2.1.1 Liivade elastsusmoodul on ülehinnatud 14
2.1.2 Vead KAPi materjalide liigituses 17
2.2 KAP rakendus ei ole terviklik 19
2.3 Kvaliteedikontroll valmis konstruktsioonil näitab puudujääki 21
2.5 Arvutuslik külmakerge 27
2.6 KAP projekteerimisel kaasnevad probleemid 28
2.6.1 Paksu kihi projekteerimisel tekkiv anomaalia 28
2.6.2 Nõrgem materjalikiht tugevamal aluspinnal 29
2.7 KAP suuremate liiklussagedustega teedel 30
2.8 Peatüki kokkuvõte 33
3. VÕIMALIKUD ALTERNATIIVID VSN METOODIKA ASENDAMISEKS 34
3.1 Soome süsteem 35
3.1.1 Odemarki valem 35
4. UUE RAKENDUSE KONTSEPTSIOON 38
4.1 Asfaldikihtide elastsusmoodulite diferentseerimine 42
4.1.1 Asfaldikihtide valik KRP rakenduses 45
4.2 Konstruktsiooni kestvuse prognoos 46
4.2 Sidumata kihtide diferentseerimine 47
4.3 Sidumata kihid KRP rakenduses 49
4.3 Külmakerke arvutus 50
4.4 Adekvaatne kvaliteedikontroll 52
4.4.1 Erinevad kvaliteedikontrolli seadmed sidumata kihil 52
4.4.2 KRP kvaliteedikontrolli funktsioon 54
4.4.3 Tehnoloogiliste kihtide mõju 55

4.5 Mahud ja maksumused 57
4.5 KRP lisafunktsioonid 58
4.5.1 Lõimisetegur Cu arvutamine 58
4.5.2 CO_2 arvestamine ehitusprotsessis 58
4.5.3 Väga tugev kiht nõrga kihi peal 60
5. KAVANDATUD ARENDUSED JA ETTEPANEKUD 61
KOKKUVÕTE 62
SUMMARY 63
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU 64
LISAD 67

Eessõna

Magistritöö EESTIS KASUTUSEL OLEVA KATENDIARVUTUSPROGRAMMI PROBLEEMID NING ALTERNATIIVSE RAKENDUSE VÄLJATÖÖTAMINE teema on algatatud autori poolt seoses hetkel kehtiva KAP-i (Katendi Arvutuse Programmi) kasutamisel esile kerkivate probleemidega.

Kasutusel olev arvutussüsteem ei ole terviklik, realiseeritud on osa juhisest MA 2001-52, mis omakorda on osa algsest NL juhisest VSN 46-83 (BCH 46-83) [1]. Lisaks ei ole olemasolev KAP materjalide suhtes paindlik (ehk ei ole loodussõbralik) ning konstruktsioonikihtide peal oleva vajaliku kandevõimenumbri määratlus tekitab segadust [2] [3]. Arvutatud tulemused ei ole mõõdetavad teadaolevate seadmetega.
Euroopa Liidu poolne suunitlus arvestada CO_2 emissiooni arvestusega kogu tee elukaare vältel paneb meid olukorda, kus peame katendeid projekteerides arvestama tekkiva õhusaastega, võrdlema erinevaid konstruktsioone omavahel ja leidma optimaalse lahenduse nii rahalisest, ressursi- kui ka keskkonnakaitselisest aspektist lähtuvalt [4].
See tähendab, et vajame täiesti uut rakendust, milles oleks täiendavate nõudmistega arvestatud ning milles oleks võimaluste piires lahendatud ka praeguse KAP-i iseloomulikud kitsaskohad [1].
Töös on kasutatud eri riikide teedeprojekteerimisnorme ning tehnilisi dokumente. Töö käigus valminud arvutusprogramm on koostatud MS Excel-i tabelarvutusprogrammi kasutades. Magistritöö eesmärk ei ole üksikasjalikult selgitada uue KRP (katendi rehkendamise programm) programmeerimislahenduste aspekte.

Võtmesõnad: KAP, Odemark, MS Excel VBA, teedeehitus, projekteerimine, kandevõime, magistritöö

Kasutatavad mõisted

KAP 2.0	-	Katendi ArvutusProgramm
KRP	-	Lõputöö raames loodav Katendi RehkendusProgramm
EVS-EN	-	Ühtne Euroopa standardiseeria
EVS-EN ISO	-	Euroopas ülevõetud rahvusvaheline standard
EVS	-	Eesti standardid
VSN/BCH	-	Nõukogude liidu aegne ehitusnorm (ehitusnormid)
GOST 25100	-	Nõukogude liidu aegne materjalide klassifitseerimise standard
VBA	-	Visual basic for applications
EMS	-	European modular system
Tm_65	-	Täitematerjal mille arvutuslik elastsusmoodul on 65 MPa
FWD	-	Falling weight deflectometer
LWD	-	Light weight deflectometer
TPN	-	Teede projekteerimisnorm, KLIM m71 (jõustus 25.11.2023)
SCI	-	Pinna kõverustegur
BCI	-	Aluse vigastuste tegur
BDI	-	Aluse kõverustegur
VAAB	-	Veoauto ja autobuss
AR	-	Autorong
EPD	-	Environmental Product Declaration
LCA	-	Life Cycle Assessment
E_{v2}	-	Plaatkoormuskatsega mõõdetud kandevõime teisel koormamisel
AKÖL	-	Aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus
Odemark	-	Sven Nils Odemark (1899-1989) – rootsi/norra teedeinsener, elastsusteooria juurutaja teekatendite projekteerimises, KTH audoktor

1. SISSEJUHATUS

Teekonstruktsioon koosneb katendist ja muldkehast. Katend koosneb kattest, alusest ja lisakihtidest [5]. Katendid jagunevad elastseteks ja jäikadeks – jäigaks saab lugeda betoonkatendit, aga teatud juhtudel ka sillutiskatendit (kui sillutiskivide/plaatide vahelised vuugid on täidetud jäiga vuugiseguga). Kõik teised on põhimõtteliselt elastsed. Püsikatendiks loetakse betoonist ja asfaltbetoonist kattega konstruktsiooni. Kergkatend on sillutiskatend, pinnatud stabiliseeritud kihiga või mustseguga katend. Kõik teised tuleks lugeda siirdekatenditeks, sealhulgas ka näiteks freespurukatend ka siis kui see on pinnatud [5].
Asfaltkattel võime eristada kolme kihti – kulumiskiht (SMA või AC surf), sidekiht (AC bin) ja kandevkiht (AC base) [5]. Alus võib olla kahekihiline. Aluse ülakiht seotud või kvaliteetsemast materjalist. Alakiht kohalikust killustikust või kruusast. Oluline on katendi dimensioneerimisel piisavalt adekvaatsete (mõõdetavate) parameetrite kasutamine.

Hetkel kehtival metoodikal on mitmeid suuri puudusi [1]. Tegemist on interneti-eelsel ajal koostatud algoritmide ja seostega, mille põhjendused ja taustmaterjalid ei ole enam lihtsalt leitavad [6]. On tõenäoline, et süsteemi koostamisel ei kujutatud ette koormusi, kuhu tehnika areng sisuliselt poolsajandi jooksul (juhise kehtestamisest on möödunud 40 aastat) meid viinud ja tõenäoliselt oleme väljunud algse süsteemi määramispiirkonnast. Nomogrammide digitaliseerimisel on väljutud ka algse süsteemi kasutuspiirkondadest, sest nomogrammide jooned on pikendatud telgedeni kuigi algses joonises nii see ei olnud [6] [5], selleks, et matemaatiliselt mitmekordse interpoleerimise teel igas olukorras vajalikud arvväärtused leida. Siit tulenevalt, esinevad tihti olukorrad, kus ühe parameetri aktsepteeritava taseme saavutamine viib lubatud piiridest välja mõne muu parameetri. Arvutuslikult aktsepteeritava tulemuse saamiseks on võetud kasutusele aluspinnase asendamine vähemalt 75 cm uue materjali (liiva) kihiga. Selle tõttu on praeguses süsteemis väga raske saavutada paindlikkust.
Probleemsed on ka muud valemid, mis ei tugine otseselt nomogrammidel. Näiteks, Peeter Talviste poolt tehtud uurimistöös selgus, et KAP 2.0 programm aladimensioneerib suurema liikluskoormusega teid, mis on põhjustatud 1983. aastast pärit logaritmvalemist ning mille valemi detailsed alused on puudulikud [7]. Tõenäoliselt on arvestatud toona kasutusel olnud sõidukite omadusi koormussageduse arvutamisel. Kuid 40 aastat tagasi olid autod ja autorongid kergemad kui nad on seda täna. Ka siirdeteguri muutmine ei muuda olukorda paremaks, sest viga peitub logaritmvalemis, mille tõus on nii väike, et olulised muutused koormuses põhjustavad marginaalse muutuse vajalikus kandevõimes [7]. See selgus ka näiteks 2015 tehtud (2017

rakendatud) siirdetegurite muutmisega, kus sisuliselt kahekordse arvutusliku koormuse tõusu tulemusena läks teekonstruktsioon paksemaks vaid ühe sentimeetri [1].

KAP rakenduses olev pinnaste liigitus põhineb Nõukogude aegsel normil GOST 25100-82 [5]. Seda liigitust on üritatud Euroopa süsteemiga vastavusse viia, kuid üks-ühest vastavust ei ole suudetud saavutada [8]. Uues teede projekteerimise (määrus 71) normis paragrahv 31 punktid 3, 4, 9, 11 ja 12 ning paragrahv 32 punktid 1 ja 5 sätestavad, et pinnaste liigitus peab põhinema EVS-EN standarditel [9]. Mistõttu on küsitav kas on võimalik jätkata GOST-põhise KAP kasutust.

2014 TTÜ uurimistöös püstitati ülesandeks teisendada GOST-põhised pinnaseliigitused EVS-EN ISO standardite kohasteks, kuid seda ülesannet suudeti täita vaid osaliselt [8]. Hetkel on probleemiks ka asjaolu, et arvutatud tulemused ei ole mõõdetavad ning ei ole võimalik ka kuidagi teisendada hetkel kehtiva KAP tulemusi mõõdetavateks mistahes kvaliteedikontrolli seadmega [3]. MKM määruses 101 sätestatud Inspector/Loadman seadmetega nõutud väärtused ei ole seostatud projekteerimisprotsessi ja arvutustega [10].

Transpordiamet on võtnud eesmärgiks 2027. aastaks arvestada teedeehituse hangetel ka keskkonnajalajälge ehk materjalidel peab olema keskkonna deklaratsioon (EPD) [11].

KAP 2.0 programmis ei ole arvesse võetud CO_2 heitmete tekke ulatust ning projekteerija valib sobivaima konstruktsiooni ainult hinna põhjal [5]. Euroopast tulevad suunised CO_2-ga arvestamiseks ja seetõttu on vajalik see uude metoodikasse sisse tuua [4]. Ehitamise tulemusel tekkiv CO_2 emissioon vajab ka diferentseerimist. Kõigepealt materjali enda kaevamisest/tootmisest tulenev heide ehk siis materjali müümisel on materjalil juba CO_2 näit küljes. Teiseks materjali transpordiga tekkiv heide (mida on võimalik taandada tonnkilomeetrile) ning kolmandaks materjali paigaldusel tekkiv heide. Täna on lahendamata ka elukaare jooksul teehoiutööde käigus või tee eeldatavast seisundist tulenev emissioon ehk Life Cycle Assessment (LCA), kuid ilmselt tuleb juba projekteerijal planeerimise faasis hinnata kogu elukaare protsessi. Ehitushanke võitja peaks selguma kahe suure komponendi kooslusest – hind ja emissioon. See tähendab, et uut lähenemist projekteerimises on vaja igal juhul ning olemasolev programm seda ei toeta.

Koostatud on järgmised uurimisküsimused:

1. Selgitada põhjused, miks hetkel olemasolev katendiarvutusprogramm ei ole pikas perspektiivis jätkusuutlik.
2. Analüüsida Soome metoodika sobivust.
3. Välja töötada uus Odemarki valemil baseeruv katendi arvutusprogramm (KRP – „Katendi Rehkendamise Programm"), kasutades selleks MS Excel VBA lisavõimalusi.

Uues süsteemis kasutatavad materjalid ja pinnaste liigitus peab vastama Euroopas kasutatavale (EVS-EN) [9]. Kandevõime arvutustulemused sidumata kihtidel peaksid olema mõõdetavad vähemalt plaatkoormuskatse seadmega. Ehk siis arvutuse tulemusel peab olema teada vajaliku kandevõime mõõdetav suurus igal konstruktsioonikihil ja seejuures eristades kvaliteedikontrolli seadmeid. Vajalik deformatsioonimooduli väärtus sõltub sellest millise seadmega kandevõimet mõõdetakse. [12]

Eesmärgiks on võetud, et uus programm oleks sarnane oma eelkäijale, kuid selle rakenduse sisu sobiks paremini tänasesse olukorda. Kuigi mõlemad nii KAP kui ka KRP baseeruvad sarnastel teoreetilistel alustel, siis KAPi kasutamisega ilmneb mitmeid põhimõttelisi probleeme (puudulik kandevõime, materjalide liigitus, EMS autorongide tulek ja CO_2 arvestamine ehituses). Uues KRP rakenduses lahendatakse uuesti ka vajaliku kandevõime väärtuse arvutus. On võimalik kasutada Soome astmelist metoodikat ja muuta see sujuvaks logaritmfunktsiooniks, mille abil on võimalik arvutada vajalik deformatsioonimooduli väärtus. [8]

2. KAP JA PÕHILISED PROBLEEMID

Vene katendite dimensioneerimise süsteemi (nii 1972 kui 1983 juhised) on põhjalikult kritiseerinud Kanada professor Leo Rothenburg Maailmapanga töö raames Vene laenuprojekti ettevalmistamisel 1993. aastal. Selle kohaselt on osaline põhjus Vene teede küsitavas kvaliteedis just projekteerimisjuhises. I ja II klassi teed projekteeriti 10-tonnisele teljekoormusele, madalamate teeklasside puhul on aluseks 6-tonnine telg. Siirdetegurid on arvestatud teljekoormuse suhte astendaja väärtusele 4,47. Võrreldes Vene katendit Jaapani ja Suurbritannia reeglite kohasega, on samale koormusele arvestatud Venemaal 13 cm asfalti Jaapani 22 cm ja Suurbritannia 26 cm vastu ehk vahe on suurema koormuse korral ca kahekordne. Asfaldikihtide paksused ei ole piisavad, et kaitsta alumisi kihte kriitilisel temperatuuri/niiskuse perioodil. Kokkuvõttes hindab professor, et Vene reeglite alusel dimensioneeritud katend kestab vaid kolmandiku etteantud tööeast/koormusest [14].

Probleemid hetkel kasutusel oleva katendiarvutusprogrammi ja juhendiga jagunevad kaheks suuremaks osaks. Esiteks tehnilised vead, mida oleks tõenäoliselt võimalik üsna lihtsasti parandada. Teiseks suuremad vead, mis on programmi sisse kirjutatud ning mille likvideerimine tähendaks uue programmi kirjutamist. Näiteks pinnaste ja materjalide liigitus, mis põhineb GOST 25100-82 (25100-95) [5], kuid uus TPN sisaldab endas tingimusi mis eeldavad EVS-EN kohast pinnase liigitust [9]. On tõenäoline, et KAP ja GOST pinnase liigitus töötavad koos komplektina [6] [15] ja EVS pinnase liigitust siduda KAP arvutusalustega oleks väga suur samm tundmatusesse – seda enam, et viimasel ajal on ka KAPis töö käigus tehtud muudatusi püütud tagasi võtta, taastades võimalikult autentse vastavuse 1983 juhisega. Hetkel kehtivasse programmi on jäänud sisse vigu ning need vead on suures osas jäänud parandamata [1], sest selleks puudub lepinguline kohustus. Seda probleemi saaks uue süsteemi elluviimisel elimineerida kasutades hooldusleping ut, mis kohustaks aja jooksul ilmuvaid vigu eemaldama ja mingil määral ka olemasolevat programmi edasi arendama. Vene süsteemi on oluliselt uuendatud aastal 2001 ja hiljemgi [16], kuid sellegipoolest ei ole SRÜ riikides lubatud koormusi tõstetud üle tavapärase 40/44 tonni taseme. Kuigi algses juhendis on lahendatud ka staatilise kontrolli osa (10 minutit seismist suvetemperatuuridel), puudub see KAP-rakendusest [17].

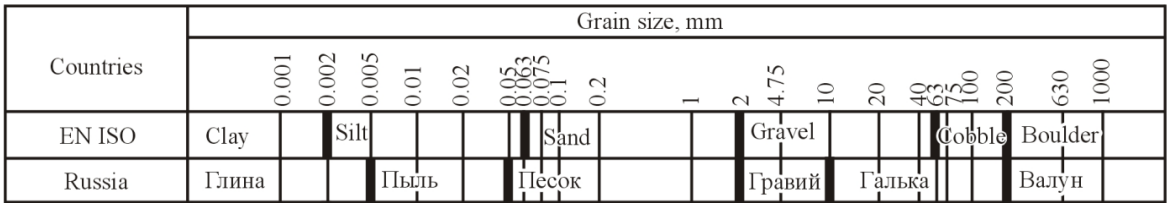
Lisaks on teada, et Transpordiamet kaalub EMS1 (European Modular System) 60 t täismassiga (kuni 25,25 m pikkade) autorongide lubamist riigiteedel [13]. Tulevikus ei ole välistatud ka võimalus, et hakatakse kasutama EMS2 76 t täismassiga (kuni 34,5 m pikki) autoronge. Seetõttu on eriti oluline, et teekonstruktsioonid oleksid aegsasti projekteeritud pigem tugevamad kui nõrgemad. Suurema täismassiga EMS autorongide

kasutuselevõtt on veel üks lisaargument miks valida Soome valemitel põhinev teekonstruktsioonide arvutus. Põhjanaabritel on 60-tonnised autorongid tavalised alates 1990st aastatest ning EMS2 autorongid juba 10 aastat kasutusel ning nende teekonstruktsioonid on seni vastu pidanud [18]. Soome süsteemi Eestis rakendades tuleb teha mõningaid muudatusi – ei ole otstarbekas kõike üks ühele üle võtta. Asfaldikihtide elastsusmoodulid tuleks diferentseerida ning killustiku sõelkõvera alusel selle elastsusmooduli määramine tuleks Eesti tingimustes täpsustada, sest Soomes on kasutusel ainult tardkivikillustik, meil seni aga nõrgem paekillustik. Ka on vaja võrrelda optimaalse koostisega tardkivikillustikusegu fraktsioneeritud ehk pika reaga paekillustikuga (peenosis tekib tihendamisprotsessis ja ekspluatatsioonis).

Soome põhimõtete alusel on katendikonstruktsioonis kate, alus ja filterkiht, kusjuures filterkiht võib täita ka külmakaitsekihi ülesandeid. Filterkihi ülesandes võib kasutada ka eristavat geosünteeti, sest filtri ülesanne on materjalide eristamine, takistades peenosiste liikumist konstruktsioonis, kuid võimaldades vee liikumist. Dreenkihti kui mõistet, eraldi ei kasutata ja vesi viiakse teekonstruktsioonist välja killustikukihis [19].

2.1 Pinnaste ja materjalide liigitus

Pinnaste ja materjalide liigitused KAP rakenduses tuginevad GOSTil [5]. Varasemalt on püütud seda materjalide liigitust vastavusse viia Euroopa süsteemiga, kuid ei ole suudetud Euroopa liigitusega defineeritud materjale kasutada GOST-põhisena [8]. See asjaolu seab kahtluse alla, kas uuest TPN (Teede Projekteerimisnorm) redaktsioonist tulenevalt on võimalik praegusel kujul KAPi kasutamist jätkata [9].

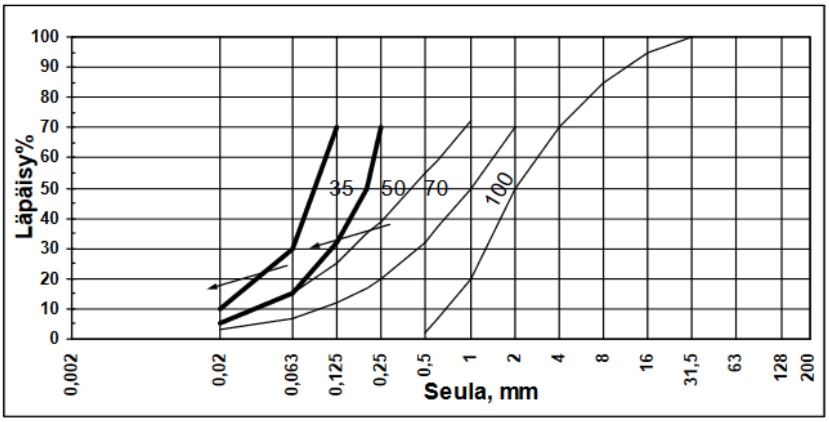


Tabel 1: Euroopa ja Vene normide materjalide liigitused ja võrreldavus [20].

Kehtivas TPN versioonis on paragrahv 31 punkt 4 nõue, et tee konstruktsiooni projekteerimisel lähtutaks standardisarja EVS-EN ISO 14688 ja standardi EVS-EN ISO 14689 sätestatud pinnaste identifitseerimisest ning standardi EVS-EN 16907-2 sätestatud liigitusest. Sama paragrahvi punkt 9 ütleb ka et tee konstruktsiooni mullatööde osa projekteerimisel arvestatakse standardisarja EVS-EN 16907 nõudeid [9].

2.1.1 Liivade elastsusmoodul on ülehinnatud

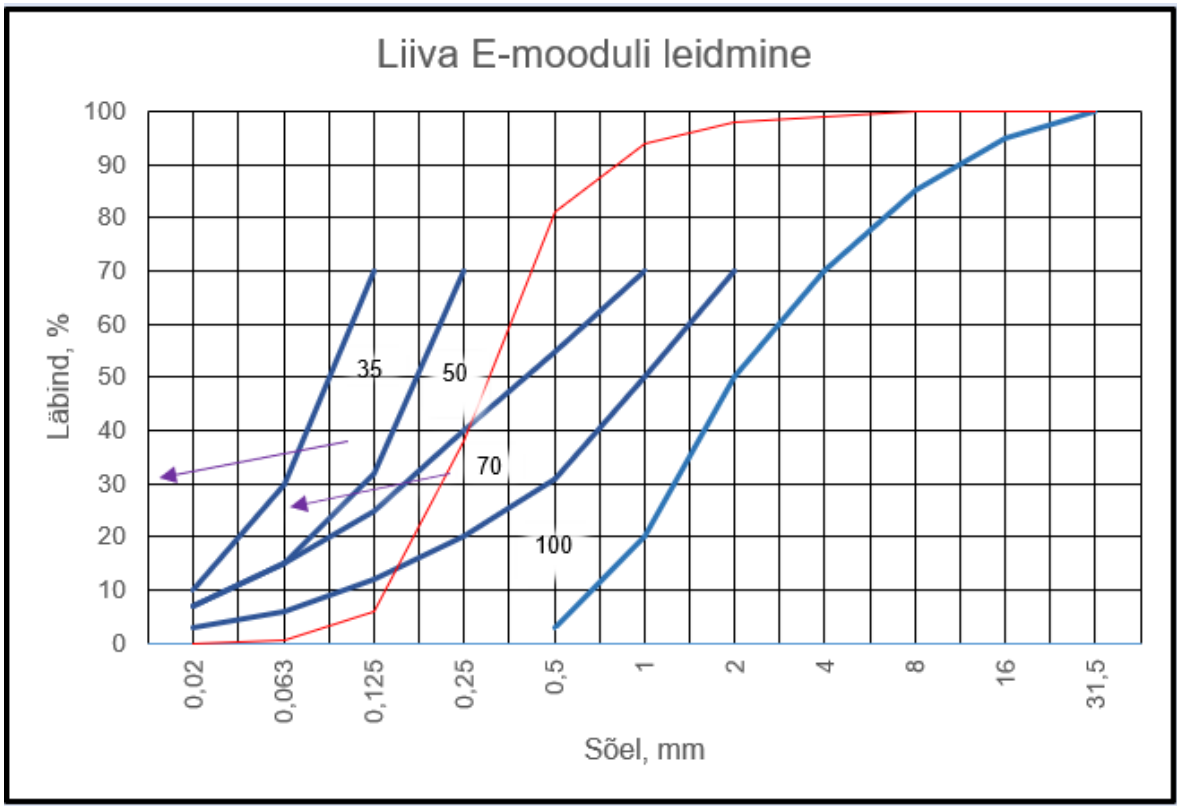
Uue süsteemi loomisel on eesmärgiks Euroopas kehtiva süsteemi EVS-EN ISO kasutusele võtmine. See tähendab, et tõenäoliselt on kõige kergem kasutusele võtta Soome 2018. aasta juhendis paiknevad tabelid ja graafikud, mille abil on võimalik sõelkõvera alusel materjale ja pinnaseid liigitada (vt juhendi 2018/038 joonis 17, 18 ja 19) [19].



Joonis 1: Liiva elastsusmooduli määramiseks kasutatav sõelkõvera graafik [19].

Graafikul on määravaks kõige nõrgema mooduliga ala, mida joon läbib. Vasakul määratletud alast on pinnased, paremal juba kruusad – selles mõttes on süsteem terviklik. Liiva graafikul (joonis 1) on määratud veel nooltega lisatingimused. Materjali sõelkõvera joon ei tohi läbida graafikul toodud paksu joont noole suunas – sel juhul ei ole liiv kasutatav filterkihis [19].

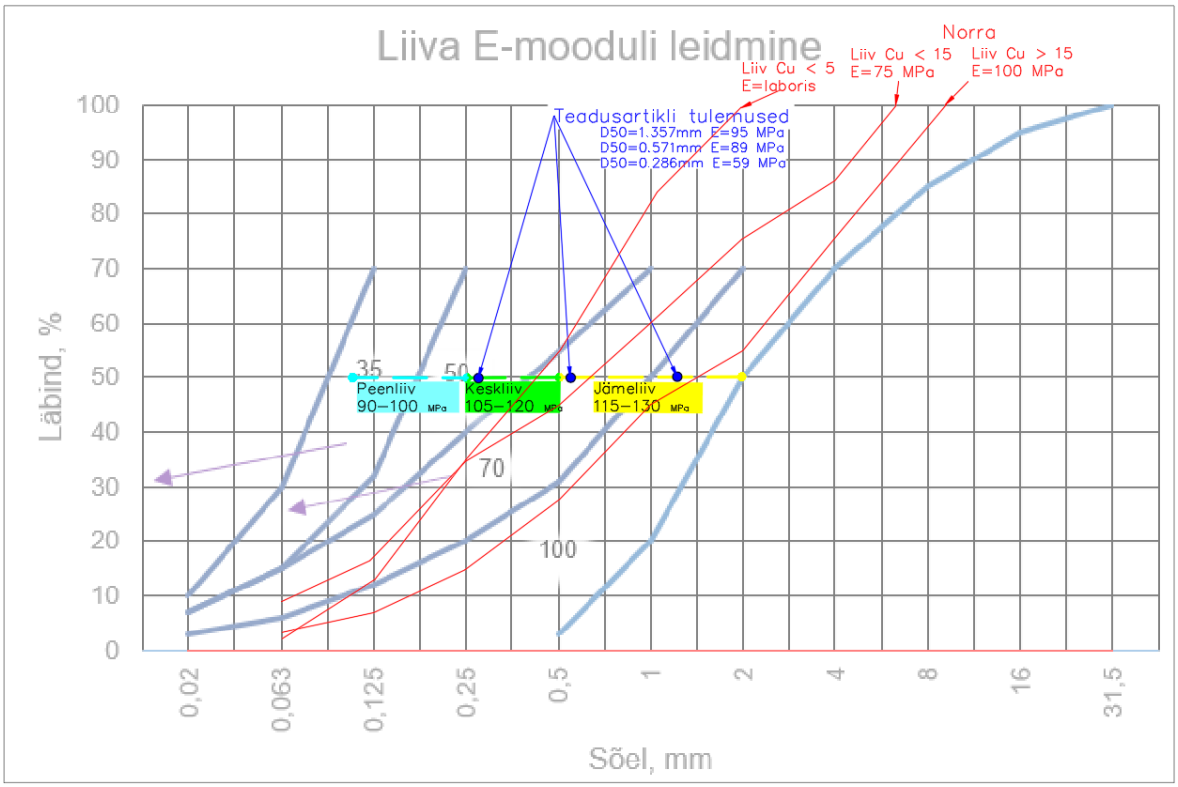
Tm_105 uMSa ühtlaseteralise keskliiva E-mooduli määramine Soome reeglite järgi:



Joonis 2: Soome teedeprojekteerimisjuhise 2018-38 järgi graafik koos Tm_105 liiva sõelkõveraga.

Elastsete teekatendite projekteerimisjuhise järgi on tegemist ühtlasteteralise keskliivaga. KAP rakenduses oleks antud liiva arvutuslik elastsusmoodul 105 MPa [5]. Soome reeglite järgi hoopis 50 MPa. [19] **Võrdlus viitab asjaolule, et Eestis on liivade elastsusmoodulid tõenäoliselt ülehinnatud.**

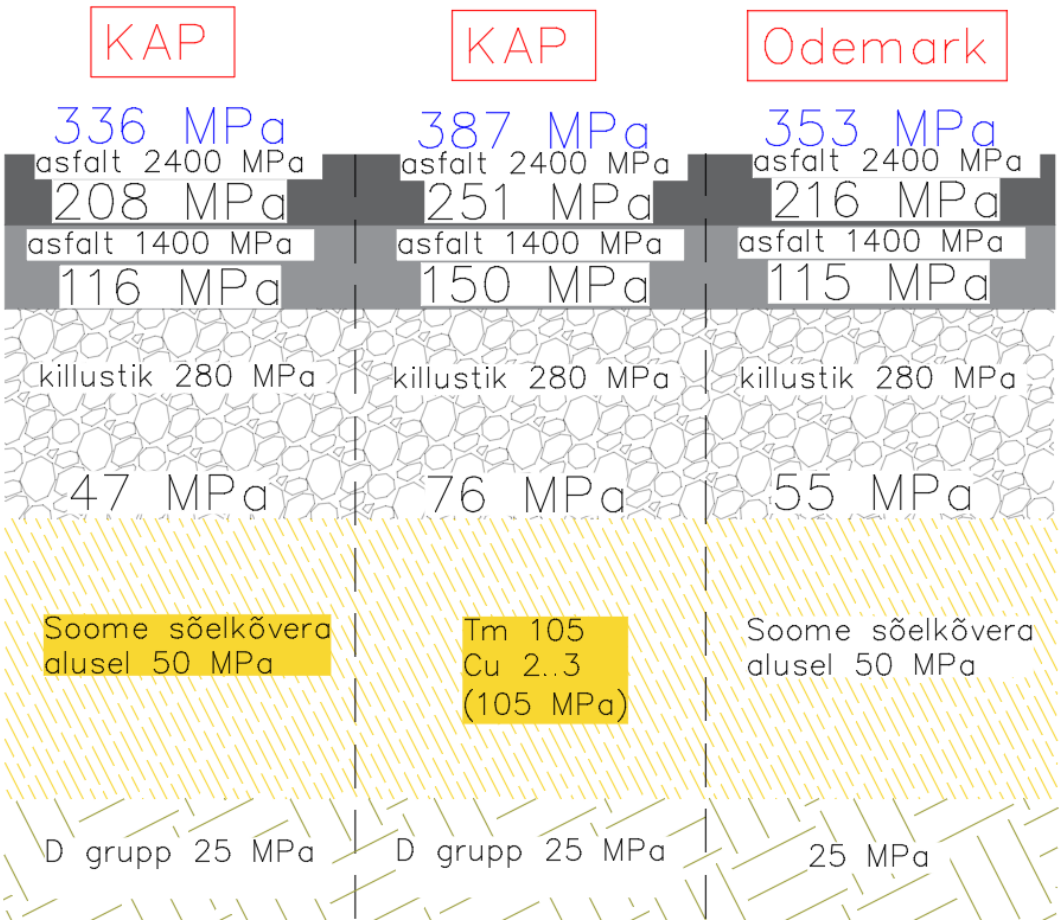
Järgnevalt on koostatud graafik, kus on visualiseeritud erinevatelt allikatelt pärinevad liiva elastsusmoodulid ning on üheselt näha, et KAP-i ehk GOST 25100-82 järgne liiva elastsusmooduli määrang eristub suurel määral ülejäänud allikatest (1 teadusartikkel ning Soome ja Norra projekteerimisjuhend) [21] [19] [22].



Joonis 3: Soome sõelkõvera joonisele kantud muudest allikatest pärit E-mooduli väärtused.

Suures pildis saab väita, et GOST järgse liiva elastsusmooduli õigsuses on põhjust kahelda. Töö autor on seisukohal, et Soome normi järgne määrang on tõenduspõhisem kui GOST põhine määrang.

Eelnevalt tuvastatud vea tulemust on visualiseeritud järgneva joonise abil.



Joonis 4: Liivakihi valest sisendinfost põhjustatud vea suuruse hinnang. Kihipaksused on võrdsed.

Liiva suhteliselt tugevamaks hindamine annab lõpptulemuses ca 50 MPa erisuse ning see on arvestatav puudujääk. Võttes lähtepunktiks 387 MPa ning eeldades, et konstruktsioon peaks 20 aastat kestma, tuleb eeldatav tööiga 336 MPa korral ainult 9 aastat. See arvutuskäik põhineb eeldusel, et E_{vaj} leidmine valem 7 alusel on tõene. **Selgub ka, et kui sisestada KAPi ja Odemarki valemisse samad andmed siis tulemused on vägagi lähedased.** Tuleb tähele panna, et antud joonisel on võrreldud ainult arvutuse tulemust, seejuures jättes kõrvale kõik muud aga samuti olulised tegurid. Näiteks pole arvestatud, et mõlemal arvutusskeemil on oma spetsiifiline materjalide nomenklatuur (KAPi puhul GOST ja Odemarki puhul EVS-EN ISO). Töö autori poolt tehtud võrdluses (joonis 4) on võetud samad materjalide elastsusmoodulid ning võrreldud ainult arvutusvalemit.

2.1.2 Vead KAPi materjalide liigituses

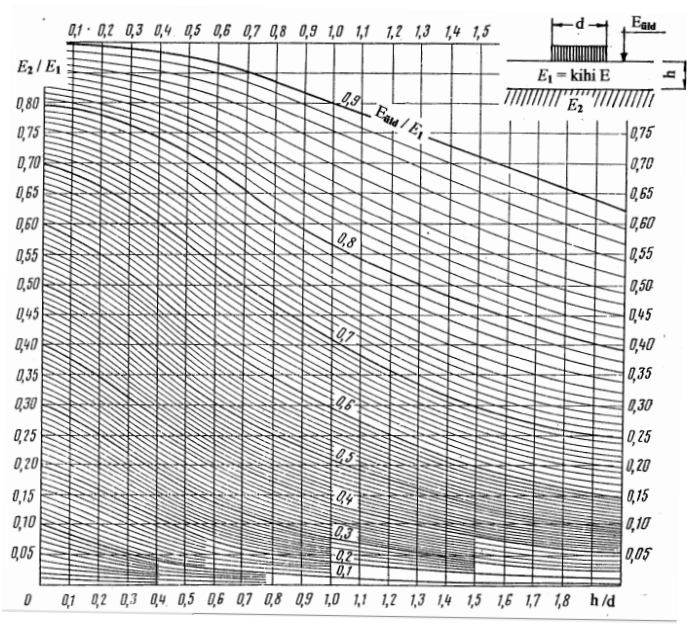
Elastsete teekatendite projekteerimisjuhises - KAP arvutuslehe kohustuslik lisa materjalide klassifikatsiooni tabel (L2.T3) - on põhimõtteline viga, kus täitematerjali „jäme kerge saviliiv (Tm_65)" definitsioon puudub ja on sattunud „kerge saviliiv, A-

grupp" reale (jäme kerge tähendab, et üle 50% on 0,25…2 mm vahemikku; kerge saviliivaga on tegu siis kui üle 50% on 0,05…2 mm vahemikku). Selle tulemusena tegelik „kerge saviliiv, ehk A grupi pinnas" liigitatakse D-gruppi ka siis, kui D-grupp peaks kehtima ainult juhul, kui liiva (0,05…2 mm) on pinnases alla 50%. [5] Veal on oluline majanduslik mõju, sest A-grupi pinnas on nõrgem kui Tm_65 ja omakorda D-grupi pinnas on nõrgem kui A-grupi pinnas ning D-grupi parameetrite tõttu osutub kriitiliseks nihkepinge aluspinnases, mille vältimiseks kasutataksegi vähemalt 75 cm paksust liivakihti mis võimaldab lisatud liiva käsitleda aluspinnasena [17].

Ebatäpsus GOST-EVS konversioonis ilmneb ka näiteks GOSTi järgse kruusliiva liigitumises L2.T3 tabelis keskliivaks – see pole ainuke, mille tulemusena me mõnesid materjale ka alahindame. Laias plaanis võivad need ebatäpsused tasanduda, kuid reaalses elus on tagajärjeks kas üledimensioneerimine või katendi kiirem lagunemine.

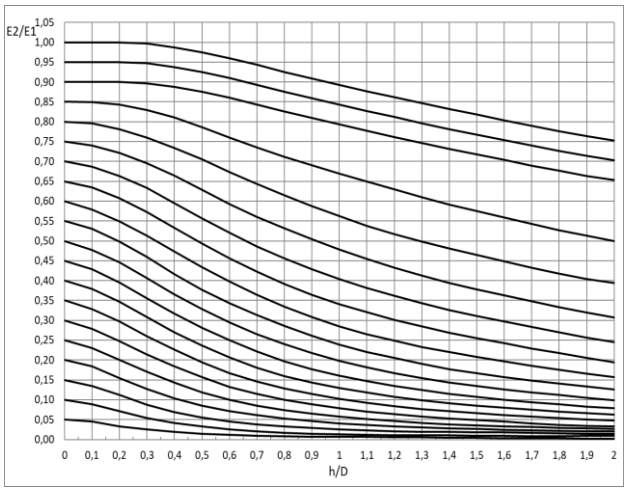
2.2 KAP rakendus ei ole terviklik

Kasutuses oleva katendiarvutusprogrammi KAP 2.0 algsed juured ulatuvad 40 aasta tagusesse aega mil koostati Vene juhis VSN 46-83 [6] [17]. Katendeid projekteeriti toona käsitsi arvutades ning arvutusaluseks kasutati nomogramme (joonis 3). Venemaal kasutatud programm КРЕДО on kasutatud DOS-keskkonnas, tõlgitud ja turustatud KRAADE nime all [1] enne KAPi koostamist.



Joonis 5: $E_{üld}$ arvutamiseks kasutatav nomogramm [6].

KAPi programmeerides on nomogrammid digitaliseeritud tabelikujule ning andmemassiivist on tehtud nomogramm mis presenteerib KAPis kasutatavaid andmeid. (vt joonis 4).



Joonis 6: $E_{üld}$ arvutamiseks KAPis [17].

Algsed nomogrammid on mittetäielikud - see tähendab, et nomogrammi joonte otsad pole täpselt fikseeritud ning et algoritmid toimiks, on digitaliseerimise käigus algseid graafiku otsi pikendatud aladele kus neid algselt pole olnud. Ühe näitena saab tuua $E_{üld}$ arvutamiseks kasutatavat nomogrammi. Digitaliseerimise käigus on laiendatud E2/E1 suhtarvu 0-st kuni 1-ni võrreldes esialgse nomogrammiga kus suhtarvu väärtused lõppesid 0,9 juures ära (joonis 5 ja 6). Mõnel juhul on nomogramm asendatud valemiga [17] mis tähendab, et nomogrammi alalt väljumine on garanteeritud. Käsitsiarvutusel valis projekteerija sellisel juhul teised parameetrid, et mitte sattuda nomogrammi alast välja. KAPis sellist võimalust pole ja see võib viia arvutustulemused ebarealistlikeks. Vene juhendi nomogrammid on väga sarnased Odemarki poolt 1949 aastal empiiriliselt leitud nomogrammidele [23] [6]. Kuid siiski mitte täpselt samad. Hetkel saab ainult oletada, et vene norm põhineb kaudselt Odemarki seostel ning neid seoseid on seejärel veelgi muudetud. Pole fikseeritud detailseid aluseid, kuidas on vastavad nomogrammid Vene juhises saadud/arvutatud, seega on õigustatud tänase KAPi arvutusloogika kahtluse alla seadmine.

2.3 Kvaliteedikontroll valmis konstruktsioonil näitab puudujääki

Valmis ehitatud teel teostatakse kvaliteedikontroll FWD (Falling Weight Deflectometer) seadmega. Eestis teostab FWD mõõtmisi Tehnokeskus AS ja selleks tööks kasutatakse Dynatest FWD – 8002 seadet. Teeregistris olevate andmete (mõõdetud E-moodul ja asukoht) baasil analüüsiti Transpordiameti tellitud uuringu raames, kui suur osa tänasest teedevõrgust vastab KAP järgsele vajalikule kandevõime tasemele [8]. Seda eeldusel, et arvutustulemused katte pinnal on võrreldavad FWD mõõtmistulemustega.

Joonis 7: Teede Tehnokeskuse FWD seade Dynatest FWD 8002. [24]

Tee nr	Pikkus km	AKÖL	FWD (MPa)	KAP (MPa)	OK km %
1	179	8020	478,3	290,6	85%
2	250	7807	440,7	289,2	95%
3	208	3573	348,6	248,9	85%
4	177	8298	475,6	313,7	94%
5	159	3054	401,6	249,9	97%
6	121	2241	331,8	234,4	90%
7	21	453	390,8	208,7	100%
8	35	7826	450,6	278,8	95%
9	56	5092	404,6	253,2	97%
10	132	2497	339,8	225,2	91%
11	34	17052	413,9	341,2	80%
92	106	3011	361,2	233,0	97%

Tabel 2: FWD ja KAP kandevõime väärtuste võrdlus. Vajalik kandevõime on arvutatud 2021 aasta liikluse alusel [13]-

Analüüsi käigus on uuritud põhimaanteede mõõdetud FWD väärtusi ja igale vastavale lõigule arvutatud KAP väärtus. Tabelis on iga tee kohta kaalutud keskmised tulemused ning näiteks põhimaanteel nr 11 on 20% teest väiksema FWD kandevõimega võrreldes samas ristlõikes arvutatud KAP miinimumnõudega. Samas KAPi järgi arvutatud E-moodul ja reaalselt FWD-ga mõõdetud E-moodul ei ole üheselt võrreldavad sest FWD mõõtmistulemus sõltub mõõtmishetkel olevatest tingimustest (nii hetketemperatuur kui pikaajalisem). [25] Teeregistrisse kantud näitajad on taandatud võrreldavale temperatuurile [2].

Valem 4: $\mathbf{E_{eq2001\text{-}52}=C*E_{eq}*T^{t}*M_i*H_j,}$ [25]

Kus

$E_{eq2001\text{-}52}$ – katendi elastsusmoodul (MPa) võetakse arvesse erinevaid muutujaid ning tulemus peaks olema võrreldav KAPis arvutatud sihtkandevõimega.

T - katte temperatuur mõõtmise ajal (°C)

C - empiiriline konstant

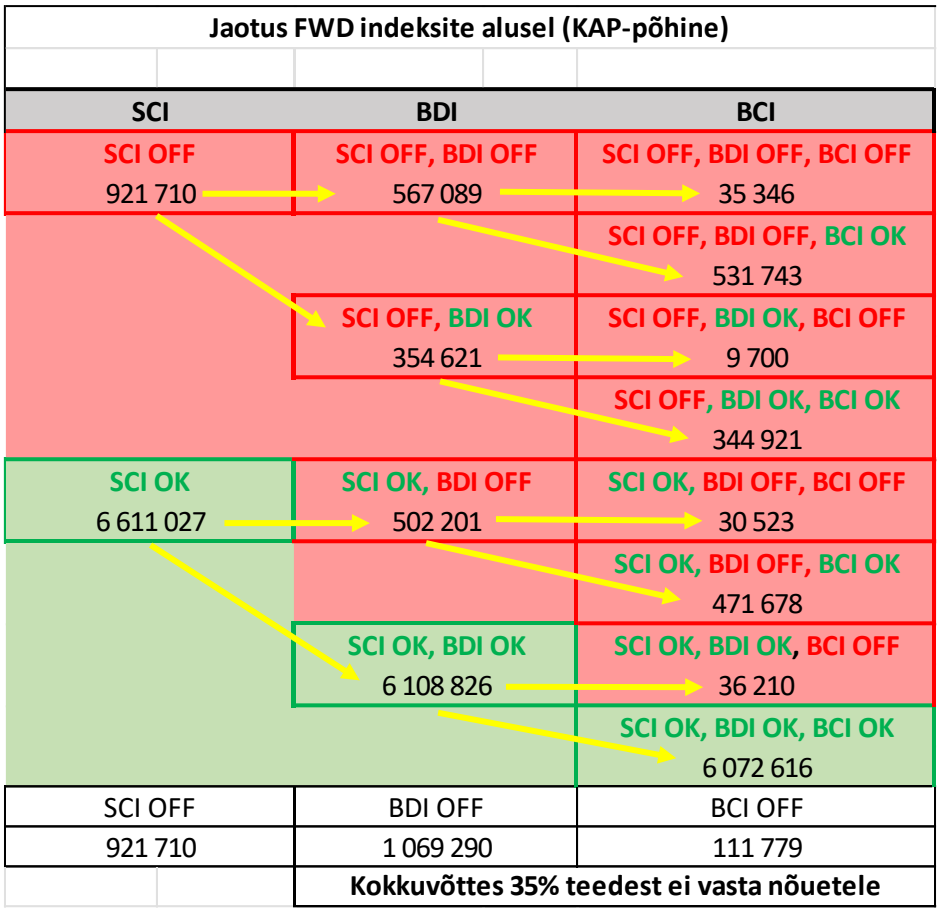
M - kuutegur

H - mulde kõrgustegur (m)

Tulemuste võrdlemiseks on Soomes kasutusel erinevad astmefunktsioonid (seos asfaldikihtide paksuse kaudu), A.Aavik on oma doktoritöös [25] toonud välja ka võimaluse taandada FWD mõõtmistulemused KAP arvutustega võrreldavaks, kuid seda algoritmi ei ole kasutatud kuna Tehnokeskus ei pea teeregistris toodud asfaldikihtide paksusi piisavalt adekvaatseks selle alusel järelduste tegemiseks. Ka Soome uuringutest selgub, et arvuliselt **peaks FWD väärtus olema oluliselt suurem kui projekteeritud kandevõime väärtus [27] [2].** Kaudselt viitab analüüs asjaolule, et KAP aladimensioneerib suurema liiklussagedusega teid.

Sellegipoolest, on FWD mõõtmistulemusi võrreldud KAP arvutustega ja kui tegemist ei ole hinnanguga kandevõime absoluutväärtusele, on siiski adekvaatsena võimalik kasutada FWD indekseid [28], mis arvutatakse andurite vajumite vahede kaudu. Aluseks on võetud Teeregistri andmestik riigiteede kohta ja arvutatud tänaste liiklussageduste järgi leitud koormustele igas FWD mõõtmispunktis KAPi minimaalne vajalik kandevõime. Tulenevalt 2011 uuringus fikseeritud seosest vajaliku kandevõime ja indeksite vastavuse vahel [28] [29], on hinnatud kolme konstruktsioonikihi (sügavustaseme) vastavust vajalikule kandevõimele võrreldes teeregistrist leitud indeksite väärtusi vastavalt kandevõimelt eeldatavaga.

Andmete analüüsist nähtub, et 35% mõõdetud riigiteedest ehk ca 2000km jagu teid ei anna FWD indeksite vajalikku minimaalset taset välja (vt joonis 8).



Joonis 8: FWD indeksite SCI, BDI ja BCI indeksite analüüs teeregistri andmete põhjal.

Andmed viitavad võimalusele, et Eesti teedevõrk võib olla aladimensioneeritud. FWD indeksite arvutusvalemid on tunnustatud (probleemseks on siiski valik, milliste andurite vahega hinnata katendi alakihte). Seosed FWD indeksi ja vajaliku kandevõime (konstruktsiooni elastsusmooduli) vahel tuginevad Ott Talviku varasemale tööle [29] ja võrreldud on indeksite väärtusi just konkreetse koormussageduse jaoks adekvaatseks hinnatava väärtusega [27] tulenevalt mõõdetud indeksite ja tuvastatud defektide võrdlusest Talviku töös.

	T 1…11	T 12…98	T 100+
	Põhimnt	Tugimnt	Kõrvalmnt
SCI, BDI, BCI OK (km)	1 459 202	1 962 709	2 650 705
kokku km	1 567 458	2 385 306	3 579 973
	93%	82%	74%

Tabel 3: FWD indeksite SCI, BDI ja BCI analüüs maantee tüübi järgi.

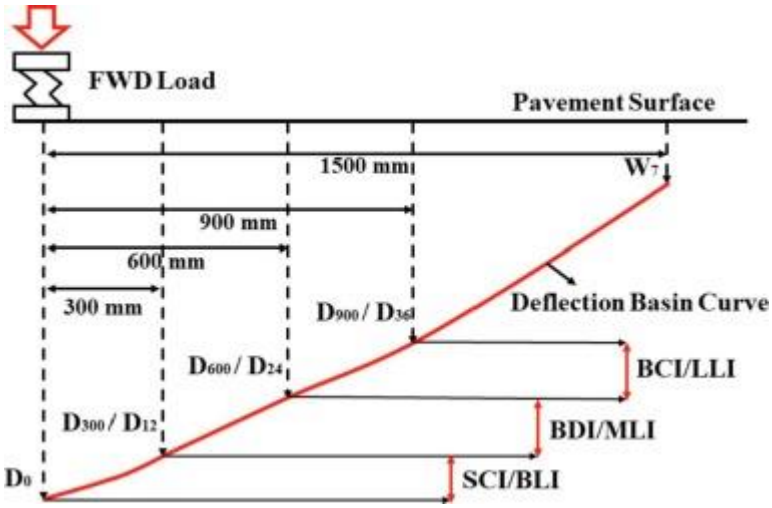
Jaotus maantee tüübi järgi näitab, et probleemsemad on kõrvalmaanteed (74% teedest vastab indeksite piirmäärale), kuigi olukord pole parim ka tugimaanteedel. Kõige suurema liikluskoormusega põhimaanteede **tänasele koormusele kindlalt mittevastav** mõõdetud kandevõime 7% teepikkuses võib viidata nii

aladimensioneerimisele kui samas ka etapiviisilise ehituse võimalikkusele, mille korral viimane asfaldikiht peaks paigaldatama hiljemalt 7-ndal kasutusaastal. Jaotus pole tehniliselt korrektne sest T92 loetakse põhimaanteeks kuigi ta ei vasta põhimaanteelt eeldatud parameetritele.

FWD andmete analüüsis võib olla põhjust ka kahtlemiseks, sest Eestis täna kasutusel olev võrdleva taandamise metoodika arvestab küll õhu- ja kattetemperatuuri, kuid ei arvesta asfaldikihi paksust ja seega võib esile kerkida õigustatud kahtlus mõõdetud tulemuste võrreldavuses.

Teatava indikatsiooni saame andmete analüüsist sellegipoolest ning saab olla kaks varianti – KAPiga dimensioneeritud konstruktsioon on aladimensioneeritud (põhjus võib olla ka vales sisendinfos) või on FWD indeksite piirmäärad millega võrreldakse, ebatäpsed.

FWD indeksite teoreetiline taust on toodud joonisel. Üldistatult saab öelda, et SCI ehk Surface Curvature Index (sügavus 300mm) presenteerib katte tugevust. BDI ehk Base Damage Index (sügavus 600mm) iseloomustab killustiku/liiva kihi kandevõimet ning BCI ehk Base Curvature Index (sügavus 1500mm) näitab muldkeha/aluse kandevõimet.



Joonis 9: FWD indeksite olemust kirjeldav joonis. [26]

Alar Tooming on uurinud (käsikirjalised materjalid) FWD detailandmete seost roopasügavuse arengu kiirusega uutel põhimaantee lõikudel ja on leidnud, et viimase indeksiga võrdleme liiga sügavat kihti ja tugevaim seos roopa arengukiiruse ning FWD indeksi vahel ilmneb vajumite 600-900 mm vahemiku võrdlusega. Selles sügavuses aga on meil reeglina liiv.

	Põhimaanteed	%, kus katend korras	%, kus katend probleemne	%, kus katend väga probleemne
1	Tallinn - Narva	**93,67**	**6,29**	**0,04**
2	Tallinn - Tartu - Võru - Luhamaa	**96,36**	**3,61**	**0,03**
3	Jõhvi - Tartu - Valga	**79,31**	**20,36**	**0,34**
4	Tallinn - Pärnu - Ikla	**97,52**	**2,48**	**0,00**
5	Pärnu - Rakvere - Sõmeru	**93,36**	**6,64**	**0,00**
6	Valga - Uulu	**70,47**	**28,55**	**0,98**
8	Tallinn - Paldiski	**96,36**	**3,64**	**0,00**
9	Ääsmäe - Haapsalu - Rohuküla	**94,37**	**5,46**	**0,18**
10	Risti - Virtsu - Kuivastu - Kuressaare	**82,96**	**16,74**	**0,30**
11	Tallinna ringtee	**93,00**	**7,00**	**0,00**

Aluspinnas BCI (USA) d600-d900	Kihi iseloomustus
<50 µm	Korras
50-100 µm	Probleemne
>100 µm	Väga probleemne

Tabel 4: Analüüsitud BCI indekseid (andurite vahe võetud USA loogika järgi 60-90cm) ja võrreldud kvaliteeti USA reeglistiku järgi [31].

Analüüsist selgub, et USA normi järgi ei vasta nõuetele suur osa põhimaanteedest. Kuna FWD seadmed on standardiseeritud ja samasugused üle maailma [32], siis on ka täiesti adekvaatne võrrelda USA-s kehtivaid reegleid Eestis kehtivatega. Tegelikult on olukord kehvem kui tabelist nähtub, sest analüüsis pole arvestatud stabiliseeritud alustele rangema nõude arvestamist – see muudaks pildi oluliselt süngemaks sest sel juhul saaks katendile omistada „Korras" ainult juhul kui vajum on alla 40 mikroni. [31]

	Põhimaanteed	kattuvus % kus kehv BCI USA järgi ning samal ajal olemas ka roopad
1	Tallinn - Narva	55%
2	Tallinn - Tartu - Võru - Luhamaa	70%
3	Jõhvi - Tartu - Valga	43%
4	Tallinn - Pärnu - Ikla	72%
5	Pärnu - Rakvere - Sõmeru	54%
6	Valga - Uulu	32%
8	Tallinn - Paldiski	77%
9	Ääsmäe - Haapsalu - Rohuküla	46%
10	Risti - Virtsu - Kuivastu - Kuressaare	61%
11	Tallinna ringtee	93%

Tabel 5: Protsentuaalne kattuvus kehva BCI (USA järgi d900-d600) ja suhteliselt sügavate (12mm) roobaste vahel.

Analüüsi aluseks on teeregistri andmed ning põhimaanteed 1-11 seejuures kogu ulatuses. Kattuvus kehva BCI taseme ja roobaste vahel on üsna suur ning arvestades, et ei analüüsitud eraldi uusi ja vanu teelõike siis on tegelik seos veelgi suurem sest uutel

teedel võib olla küll kehv kandevõime ja kehva BCI indeksi tase aga suhteliselt sügavad roopad ei ole uutel teedel nii kiiresti veel arenenud.

Eraldi on vaadeldud Tallinna ringteed ehk riigimaanteed nr 11.

#11	lõik (km)	mõõdetud E (MPa)	max.roobas (mm)	BCI USA (µm) d600-d900	BCI EST (µm) d1200-d1500	BDI EST (µm) d300-d600	katte aasta	roopa areng (mm/a)	aluse eh.aasta
SUUND 1	0-0,8	316	12	58	25	85	2021	5,98	2021
	0,8-2,864	449	14	36	18	53	2018	2,80	-
	2,864-6,076	501	20	33	16	44	2017	3,33	-
	6,076-9,701	420	15	41	19	56	2018	3,00	-
	9,701-11,358	375	26	50	21	84	2016	3,78	2016
	11,358-14,949	457	15	34	16	50	2015	1,88	-
	14,949-15,879	456	16	36	15	53	2015	1,94	-
	15,879-17,533	407	17	31	19	20	2014	1,89	-
	17,533-19,971	309	18	44	19	29	2018	3,68	2012
	19,971-24,403	435	14	39	19	52	2020	4,67	2020
SUUND 2	0-0,864	308	12	57	27	75	2021	6,00	2021
	0,864-2,924	427	18	33	20	43	2018	3,60	-
	2,924-6,127	520	13	29	15	39	2017	2,23	-
	6,127-9,761	399	15	40	20	53	2018	2,92	-
	9,761-11,619	409	23	44	20	66	2016	3,29	2016
	11,619-15,164	439	17	36	15	50	2015	2,11	-
	15,164-16,806	467	15	41	20	56	2015	1,88	-
	16,806-17,739	387	18	37	19	49	2018	3,60	2014
	17,739-20,19	311	18	57	19	89	2018	3,56	2012
	20,19-24,62	432	14	39	20	53	2020	4,67	2020

Tabel 6: Riigimaantee nr.11 analüüs roobaste arengu ja FWD indeksite taseme vahel.

Nähtub selgelt, et lõigud kus on andmed aluse ehitusaasta kohta, on ühtlasi ka kehva kandevõimega ning roopa areng nendel lõikudel on olnud kiirem. Seejuures tuleb arvestada ka algroobast mis võib olla vahemikus 3-8mm [33]. **Tabel tõestab, et FWD poolt mõõdetud kandevõime, FWD indeksid ja roopa arengu kiirus on omavahel suures seoses. Samuti nähtub, et alused mille kohta on teada ehitusaasta, on oluliselt kehvema kandevõimega.** Miks just suhteliselt uuematel alustel probleem esineb ei ole lõpuni selge. Seda võib seostada liivade filtratsiooni määramise reglemendi muutusega, mis sundis ehitajaid kasutama ühtlaseteralist liiva (nimetades Cu 2…3 vahemikku mõõdukalt ühtlaseteraliseks). **Kui liival on hea veejuhtivus ehk tegemist on GOST järgi ühtlaseteralise liivaga (Cu <3) siis ei saa olla head kandevõimet ja vastupidi** (vt. joonis 2)**.** Lisaks tuleb mainida, et EVS-EN järgi loetakse materjal/pinnas ühtlaseks kui Cu<6. Teema vääriks rohkem süvenemist, kuid mitte käesoleva magistritöö raames.

2.5 Arvutuslik külmakerge

Külmakerke arvutuses kasutatakse üleriiklikult ühtset 125 cm külmumissügavuse taset. Selline külmumissügavuse väärtus tuleneb Nõukogude liidu aegsest juhisest VSN [6]. Reaalsuses on 125 cm kujundatud 100 ja 150 cm külmumissügavuste üleminekujoone alusel, mis paikneb ligilähedaselt Tallinna-Pärnu maantee joonel. Võime seega öelda, et suures pildis lääne-eesti teed üledimensioneeritakse külmakerke aspektist ning ida ja kesk-eesti teed aladimensioneeritakse. Mart Olman on oma bakalaureuse ja magistritöödes analüüsinud Eesti külmumissügavusi [34], kuid selle tulemusi ei ole tänases KAPis rakendatud. Liivpinnaste keskmised külmumissügavused varieeruvad 58…133 cm (vt tabel 4). Nende andmete põhjal saab kahtlemata järeldada, et KAPis ja Elastsete teekatendite projekteerimisjuhises antud külmumissügavust 125 cm ei saa üle-eestiliselt kasutada. Kuna Soome normistik arvutab külmakerget liivpinnasest lähtuvalt siis sobibki Mart Olmani koostatud tabel „Keskmine külmumissügavus liivpinnaste korral" kõige paremini uue rakendusega kasutamiseks.

Keskmine külmumissügavus liivpinnase korral

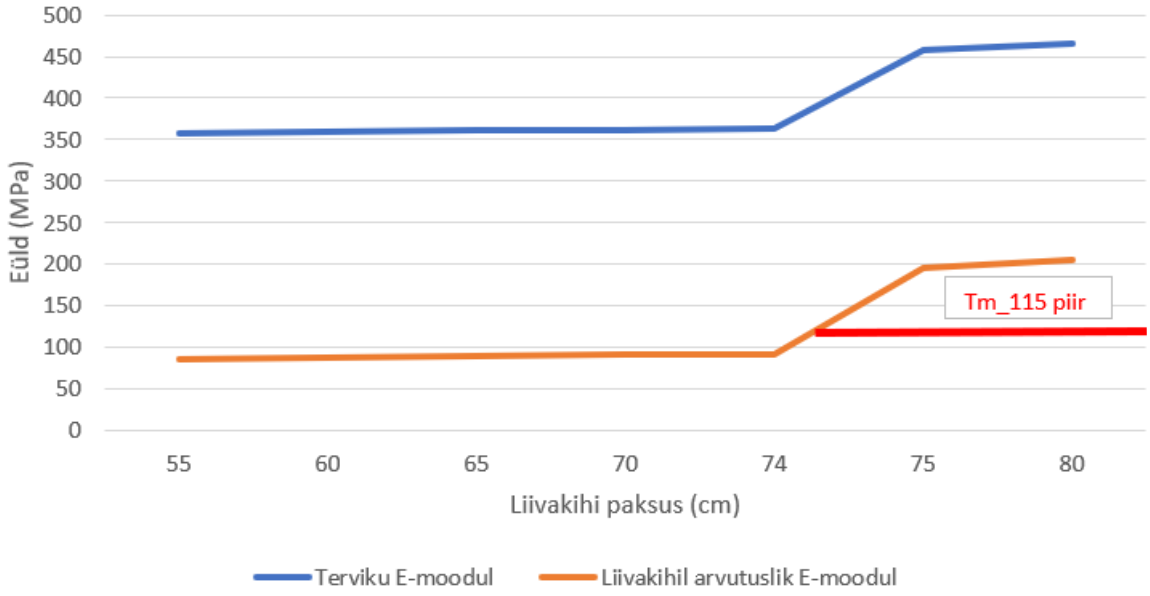
Meteoroloogiajaam	Külmumissügavus, m
Jõgeva	1,19
Jõhvi	1,23
Kihnu	0,79
Kuusiku	1,09
Lääne-Nigula	0,97
Ristna	0,58
Ruhnu	0,83
Pärnu-Sauga	1,03
Sõrve	0,58
Tallinn-Harku	0,92
Tartu-Tõravere	1,10
Türi	1,11
Valga	1,08
Vilsandi	0,56
Virtsu	0,85
Võru	1,13
Väike-Maarja	1,25
Massumõisa	0,99
Oandu	0,98
Räpina	1,33

Tabel 7: Mart Olmani koostatud tabel Eesti liivpinnaste keskmise külmumissügavuse kohta [34].

2.6 KAP projekteerimisel kaasnevad probleemid

2.6.1 Paksu kihi projekteerimisel tekkiv anomaalia

Aluspinnaseks loetakse materjal, mille kihi paksus on vähemalt 75 cm [5]. See tähendab, et kui kihi paksus läheneb piirini, peaks arvutatav kandevõime väärtus kihi peal lähenema sujuvalt kihi materjali elastsusmooduli väärtuseni. Kontrollarvutuses selgub, et arvutusliku kandevõime väärtus tõuseb eksponentsiaalselt. Samas ei ole KAPis võimalik kasutada kahte või enamat sama mooduliga kihti üksteise peal. Seega ei ole võimalik kuidagi vältida paksu konstruktsiooni projekteerimisel kandevõime eksponentsiaalset tõusu (vt joonis 10).



Joonis 10: KAPi liivakihi paksuse ja sama kihi peal arvutatud $E_{üld}$ omavaheline seos.

Praeguses olukorras kus võrreldakse kahte samasugust konstruktsiooni ainsa vahena, et ühel liivakihi paksus 74 cm ja teisel 75 cm. Konstruktsiooni kui terviku kandevõime erinevus tuleb vastavalt 363,09 ja 458,15 MPa, mis ei ole kuidagi loogiliselt selgitatav. Kandevõime liivakihil vastavalt 91,88 ja 195,16 MPa. Kui liiva enda elastsusmoodul on suurusjärgus 100 MPa siis ei saa olla võimalik olukord, kus 100 MPa elastsusmooduliga kihilt saavutatakse ca 200 MPa (vt tabelid 8 ja 9). Kui kihipaksus on üle 75 cm taseme, siis arvutusvalemis loetakse see kiht aluspinnaseks ning programm ei vaata mis jääb selle kihi alla. Kui projekteerijal on vaja sihtkandevõimet saavutada, lähtumata loogilisest mõtlemisest siis tänane KAP 2.0 annab selleks legaalsed võimalused. Insener peaks tulemust analüüsima ja välistama ebaloogiliste tulemuste kasutamise.

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus-moodul Mpa	Vajalik elastsus-moodul MPa
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %		
				t_{arv}	t_{lub}			
			Üldine elastusmoodul			30,5%	363,09	278,33
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC	10,0					363,09	
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	10,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			39,9%	231,85	
3	Paekillustik (LA≥35)	28,0					151,74	
4	Tm_115 [uCSa - ühtlaseterine jämelii	74,0	Nihkepinged	0,0081	0,0156	48,2%	91,88	
	A - kerge saviliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0,0043	0,0071	160,5%		
	Katendi kogupaksus	122,0					Parandustegur Δ	

Tabel 8: KAPis projekteeritud konstruktsioon, kus liivakihi paksus 74 cm.

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus-moodul Mpa	Vajalik elastsus-moodul MPa
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %		
				t_{arv}	t_{lub}			
			Üldine elastusmoodul			64,6%	458,15	278,33
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC	10,0					458,15	
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	10,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			48,3%	306,70	
3	Paekillustik (LA≥35)	28,0					213,94	
4	Tm_115 [uCSa - ühtlaseterine jämelii	75,0	Nihkepinged	0,0154	0,0156	0,8%	195,16	
	A - kerge saviliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0,0044	0,0071	161,9%		
	Katendi kogupaksus	123,0					Parandustegur Δ	

Tabel 9: KAPis projekteeritud konstruktsioon, kus liivakihi paksus 75 cm.

2.6.2 Nõrgem materjalikiht tugevamal aluspinnal

KAPis esineb küsitav olukord, kus väiksema deformatsioonimooduliga materjali paigaldus suurema tugevusega materjalile ei ole otseselt teostatav. Elastsete teekatendite projekteerimisjuhises on küll antud valem selle olukorra lahendamiseks, aga programmis on see jäänud realiseerimata [5]. Rakenduse programmeerimisel on seatud ette tingimus, et iga järgnev kiht peab olema tugevam eelmisest ning hüpikaknas viskab kasutajale teate „Nõrgad ja tugevad kihid on vaheldumisi. Ei saa katendit arvutada" [17]. Töö autori praktikas on ette tulnud olukordi, kus aluspinnas on tugevam kui sellele järgnevad kihid - teoreetiliselt on võimalik sellises olukorras loodusressursse säästa ning liiva- ja killustikukihi paksust vähendada. Praktikas kui paigaldatakse nõrgem materjal tugevamale kihile, siis konstruktsiooni kui terviku kandevõime väheneb [35].

2.7 KAP suuremate liiklussagedustega teedel

Peeter Talviste on Transpordiameti poolt tellitud katendi baasuuringus põhjalikult uurinud Eestis kasutatavat katendiarvutusmetoodikat ja leidnud, et ühe ja sama liikluskoormuse juures on Eesti ja Soome vajalikud kandevõimed kuni 33% erinevad [7]. Mõistagi sõltub vajalik kandevõime ka siirdeteguritest, kuid siirdetegurid ei suuda probleemi ära lahendada, sest logaritmvalem ei võimalda E_{vaj} tuua soovitud tasemeni (vt. tabel 10). Tõestuseks on analüüsitud E_{vaj} sõltuvust siirdeteguritest. Kui tõsta hetkel kehtivaid siirdetegureid ühe ühiku võrra siis vajaliku E-mooduli muutus on väga marginaalne - kõigest 8 MPa. Olukord viitab, et siirdeteguritega ei ole võimalik aladimensioneerimise probleemi lahendada.

Liiklussagedus	Liiklus tk/ööpäevas		Siirdetegurid		KAP E_{vaj} (MPa)	Erinevus (MPa)
	VAAB	AR	VAAB	AR		
Madal	150	200	2,67	3,76	266,2	8,0
			3,67	4,76	274,2	
Kõrge	800	1200	2,67	3,76	319,7	7,9
			3,67	4,76	327,6	

Tabel 10: E_{vaj} muutus sõltuvalt siirdetegurite väärtustest. AKÖL väärtused on võetud suvaliselt näitlikud ning SAPA liiklus jäetud konstandiks, kuna selle mõju on marginaalne.

Järelikult viga peitub 1983. aasta logaritmvalemis mis arvutab E_{vaj} sõltuvalt normtelgede arvust (vt valem 6) [36].

Valem 6: $E_{vaj}=a \cdot \log(Q)+b$ [6]

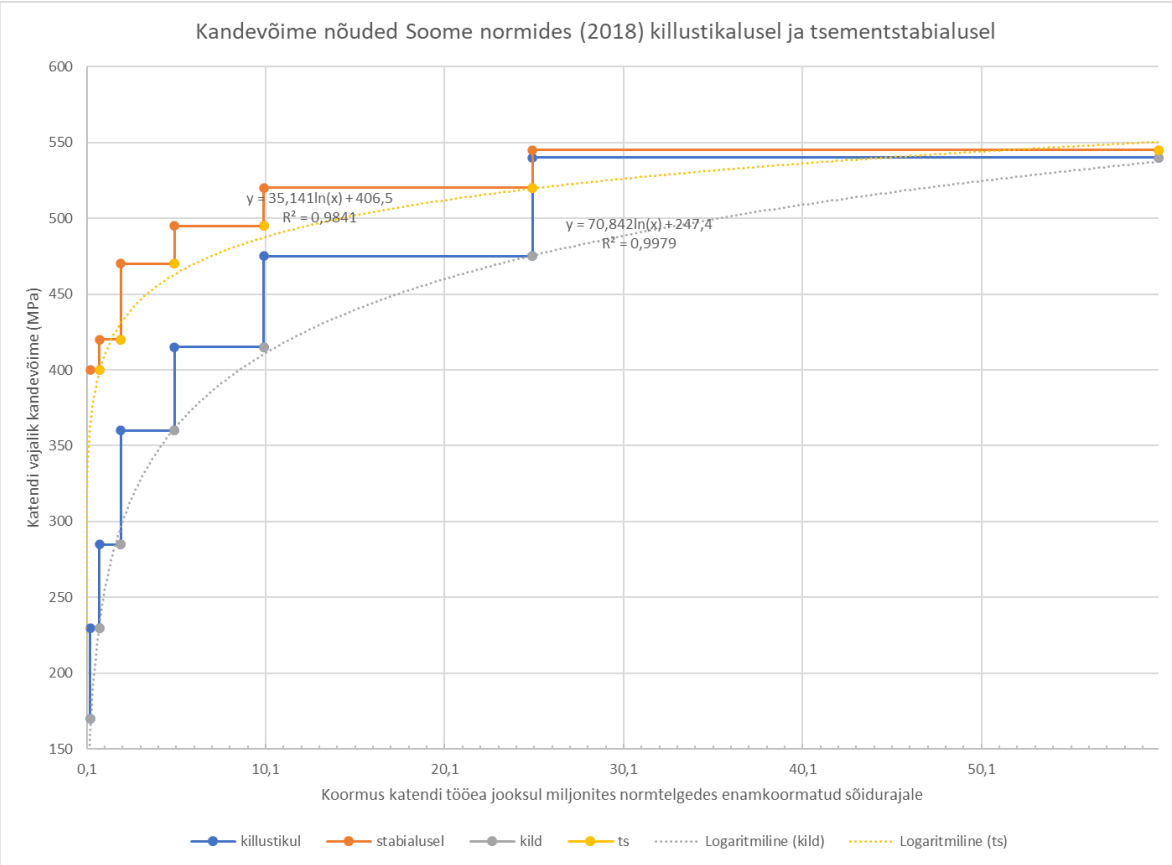
Kus

a=70

b=56

Q – koormussagedus ehk ekspluatatsiooniperioodi jooksul üle sõitvad normteljed jagatud 5000-ga (et taandada summaarne koormus 15-ndale aastale)

Kuna ei ole teada kuidas see valem Vene juhendis algselt koostati ja millised põhimõtteid rakendati, siis on kindlam tuletada uue süsteemi jaoks uus valem. Ühe võimaliku variandina saaks kasutada lähenemist, kus võtta aluseks Soome astmeline süsteem ja teisendada astmeline süsteem sujuvaks logaritmfunktsiooniks (vt joonis 11). Uus logaritmfunktsioon läbiks astmelise süsteemi punkte, aga teeks seda sujuva graafikuna ehk siis tegu on Soome loogika mugandatud versiooniga Eesti tingimustesse. See lähenemine aitab Soome süsteemile ülemineku teha rahaliselt soodsamaks võrreldes astmelise lähenemisega (kontrollarvutustes katendikonstruktsiooni kallinemine kuni 10% võrreldes astmelise 20%-ga).



Joonis 11: Soome teedeprojekteerimise reeglite järgi kujutatud astmeline funktsioon koos sellest tuletatud naturaallogaritmfunktsiooniga. [13]

Juhul kui võtta Eestis kasutusele Soome süsteem koos Odemarki valemiga siis oleks mõistlik kaaluda astmelise funktsiooni asemel naturaallogaritmfunktsiooni (vt valem 7).

Valem 7: E_{vaj}=70,842·ln(x)+247,4

Teisel kujul E_{vaj}= 163,15·logX+247,4

kus x - normtelgede arv projekteeritud tööea jooksul miljonites.

Funktsioon läbib täpselt astmelise loogika madalamaid punkte ehk siis ei ole ohtu üledimensioneerimiseks. Kui võrrelda seda tuletatud funktsiooni hetkel kasutusel oleva KAPi funktsiooniga, siis suurema liiklussagedusega teede puhul on E_{vaj} erinevus väga suur (vt tabel 11).

4 mlj. normtelge			2 mlj. normtelge		
FIN (log)	KAP	FIN (astmeline)	FIN (log)	KAP	FIN (astmeline)
345 MPa	259 MPa	360 MPa	296 MPa	238 MPa	285 MPa

Tabel 11: E_{vaj} väärtused sõltuvalt tööea jooksul ülesõitvatest normtelgedest.

Saab järeldada, et KAPis paiknev logaritmvalem dimensioneerib ca kolmandiku jagu nõrgema katendi võrreldes Soome astmelisest süsteemist tuletatud logaritmvalemi tulemiga.

Lisaks on uuritud Teeregistri andmeid põhimaanteede kohta. Täpsemalt on analüüsitud defektide ja FWD mõõdetud kandevõime seost. Mõõdetud kandevõimest on lahutatud maha minimaalne vajalik elastsusmooduli väärtus teekonstruktsiooni terviku kohta ning seega saadud igale teeregistri lõigule (tüüpiliselt 100m) kandevõime üle- või puudujääk. Üle- või puudujääk on erinevad sõltuvalt sellest, kas minimaalne vajalik tase on arvutatud Eesti või Soome projekteerimisnormi järgi. Seejuures Soome astmeline metoodika on kasutatud sujuva funktsioonina, mitte astmelisena. Tekib võimalus andmeid võrrelda ning tulemus on näha allolevas tabelis. Soome projekteerimisnormi järgi on 61% defektsetest teelõikudest ka ebapiisava kandevõimega. Defektidega lõikudeks on loetud kõik lõigud kus defsum2 on üle 3. Alati jääb püsima võimalus, et defektid on juhuslikku laadi ning seos kandevõimega ei ole tegelikkuses nii tugev kui tabelist välja paistab. Seevastu seose tugevust kinnitab asjaolu, et defektsete ja eesti tasemest lähtuvalt ebapiisava kandevõimega lõikude keskmine vanus on kõigest 13 a. Samas nii eesti kui soome järgi on ilma defektideta ja hea kandevõimega lõigud mõlema metoodika järgi keskmiselt 7a vanad. See näitab, et seni kuni katend on värske ei teki probleeme, aga kuna eesti taseme järgi on kehvade lõikude keskmine vanus 13 a ja soomel 11 a võib viidata, et katendi ressurss väheneb eksponentsiaalselt – vanusega tekivad probleemid üsna kiiresti ning on väga tõenäoline, et ettenähtud 20 a ekspluatatsiooni konstruktsioon vastu ei pea.

Eesti proj. norm	**Soome proj. norm**	
18	46	- Teepikkus kus on defektid ja vastava metoodika järgi suhteliselt halb kandevõime ühes samas piirkonnas
354	802	- Teepikkus kus on vastava metoodika alusel kehv kandevõime
1518	1070	- Teepikkus kus on vastava metoodika alusel hea kandevõime
75		- Teepikkus kus on defektid
58	29	- Teepikkus kus on defektid ja vastava metoodika järgi suhteliselt hea kandevõime ühes samas piirkonnas
23%	61%	- suhe: 61% teepikkusest millel on defektid on Soome normi järgi ka kehva kandevõime
13	11	- katendi keskmine vanus aastates (defektidega ja kehva kandevõimega)
7	7	- katendi keskmine vanus aastates (ilma defektideta ja hea kandevõimega)

Tabel 12: Põhimaanteede defektide ja kandevõime omavaheline seos.

2.8 Peatüki kokkuvõte

Arvestades järgmisi fakte on üheselt selge, et KAP oma praegusel kujul ei ole katendite projekteerimiseks sobilik.

- GOST materjalide liigitus ei ole kooskõlas Euroopa süsteemidega ning uus projekteerimisnorm suunab meid EVS-EN standardiseeriaid järgima. KAP põhineb aga GOSTil.

- KAPis kasutusel olev GOST materjalide liigitus hindab liivad suhteliselt tugevamateks kui nad tegelikult on. Soome projekteerimisnormi järgi võrreldes on erinevus ca kahekordne.

- Arvestades, et puudub ülemineku teisendus KAPi $E_{üld}$ väärtuselt E_{v2} väärtuseks ja kuigi nii KAPi kui ka Soome süsteemis kasutatakse konstruktsiooni kui terviku kandevõime ühikuna MPa ühikut, siis sisuliselt on tegemist erinevate suurustega ning seetõttu pole kvaliteedikontroll objektil adekvaatselt teostatav.

- Külmumissügavus varieerub suures ulatuses ja piirkonniti eristamine annaks võimaluse loodusressursse mõistlikumalt kasutada.

- KAPis puudub võimalus paigaldada tugevama kihi peale nõrgem kiht kuigi praktiliselt selline variant on võimalik. Ka nägi sellist varianti ette TPN eelmine versioon (dreenkiht on vajalik, kui alla jäävad seotud kihid või kaljupinnas on sügavusel kuni 50 cm katte pinnast).

- KAPi 1983.a logaritmvalem mis teisendab koormussagedusest vajaliku deformatsioonimooduli on põhjus miks KAP aladimensioneerib katendi konstruktsioone. Parim alternatiiv oleks Soome astmelise süsteemi rakendamine naturaallogaritmfunktsioonina.

- Täna kehtiva KAPi arvutusalustes on arvestatud maksimaalne autorongi mass 40 t. Transpordiamet kaalub kasutusele võtta 60 t täismassiga EMS1 autorongid ning siirdeteguritega seda erisust ei täida - seetõttu on eriti oluline, et teekonstruktsioonid oleksid projekteeritud piisavalt tugevad.

- Kõige kiirem ja lihtsam oleks kasutusele võtta Soome süsteem, aga väikeste mugandustega, et see oleks Eesti tingimustesse sobilikum.

3. VÕIMALIKUD ALTERNATIIVID VSN METOODIKA ASENDAMISEKS

Transpordiamet on tellinud uuringu „Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamise lähtekohtade alusuuring" mille vastutavaks teostajaks geoloogiadoktor Peeter Talviste (IPT Projektijuhtimine OÜ). Uuringus tehti järeldused ja ettepanek valmistuda Soome süsteemile üleminekuks sest põhjanaabrite katendiarvutusmetoodika on olemasolevatest valikutest parim lahendus. Teoreetiliselt oleks võimalik kasutada ka tänapäevast Vene Föderatsioonis kehtivat standardit kuid tekib probleem sest venelaste standardis kasutatakse GOST süsteemis pinnaseid ja materjale, mis ei haaku EVS-EN määratlusega [17]. Lisaks ei ole vene normi teaduslikud alused kättesaadavad. Venelaste arvutuse alused (algoritm, mootor) on aegade jooksul jäänud samaks, kuid on palju muudetud erinevaid tegureid ja keeratud tagavarateguritega dimensioneeritavad katendid oluliselt tugevamateks ning seejuures säilinud on 40/44 t täismassi piirang autorongidele. Samuti on Venemaal alates 2001 asendatud problemaatiliste teguritega logaritmfunktsioon (joonis 12).

VSN Nõukogude aegne norm millel põhineb KAP	**PNST Vene Föderatsiooni tänane norm**
AKÖL ↓ siirdetegurid	
2,67 3,76	↓ Samas suurusjärgus Eestis täna kehtestatud teguritega
Normteljed	
Siirdetegur * AKÖL	↓ (Siirdetegur * AKÖL)*1,5
$E_{üld}$	
E=70*log(normteljed*rajategur/5000)+56	↓ E=√(0,8/0,6)*98,65*log(∑normteljed-3,55)
E_{vaj}	
$E_{vaj}=E_{üld}$*0,63…1	↓ $E_{vaj}=E_{üld}$*1,15…1,5
Lubatud nihkepingete arvutus	
Tlub<=T/0,63…1	T_{lub}<=T/0,87…1,1
E_{vaj} arvutuse võrdlus. (aluseks 18 687 183 normtelge)	
306 MPa	**464 MPa**
PNST normi järgi dimensioneeritakse oluliselt tugevam katend kui VSN reeglite järgi	

Joonis 12: Nõukogudeaegse VSN normi võrdlus Vene Föderatsioonis hetkel kehtiva PNST normiga [16] [6].

Seega jääb üle järeldada, et Soome süsteemile üleminek oleks kõige kiirem ja sobilikum lahendus.

On mitmeid argumente miks Soome süsteemi ülevõtmine oleks mõistlik:

1. Transpordiamet soovib kasutusele võtta pikemad ja raskemad EMS veoautod, mille mõju katendile on ebaselge. Soomlastel on olnud EMS autorongid pikalt kasutuses ning see annab mõnevõrra kindlust, et katendid on piisavalt tugevad projekteeritud [13].
2. Arvutatud tulemus on ka mõõdetav tulemus. Ehk arvutatud kandevõime väärtus sidumata kihtidel peab olema saavutatav kvaliteedikontrolli seadmega (E_{v2}) [19].
3. Soome normistik kattub EVS-EN standarditega.

3.1 Soome süsteem

Soomes jaotatakse teed normtelgede alusel astmeliselt koormusklassidesse.

Koormusklass mlj. normtelge	0,3	0,8	2,0	5,0	10,0	25,0	60,0
Sihtkandevõime (MPa)	130…145	230	285	360	415…495	470…520	540..545

Tabel 13: Soome teedeprojekteerimisnorm 2018-38 [19].

Mõistagi oleks astmelise süsteemi kasutusele võtmine suhteliselt kulukas lahendus ning võimalik oleks astmelise loogika muutmine sujuvaks matemaatiliseks funktsiooniks. Selline lähenemine väldib ressursside raiskamist ehk et funktsiooni kasutamisel saaks katendeid täpsemalt dimensioneerida. Üldistatult, saab hinnata, et Soome süsteemi rakendamine astmelisena teeks teekonstruktsioonid 20% kallimaks, logaritmseose puhul jääb kallinemine 8% suurusjärku.

3.1.1 Odemarki valem

Soomlaste katendi arvutus põhineb lihtsal Odemarki valemil, mille on arendanud rootslane Sven Nils Odemark 1949. aastal. [19] Ta katsetas eri pinnaste kandevõimet plaatkoormuskatse seadmega ning leidis elastse poolruumi teooria abil seosed, mille abil on võimalik arvutada mitmekihilise konstruktsiooni E-moodulit. Algselt oli Odemarki valemit vaja ühe Rootsi lennujaama ehituse projekteerimiseks [23]. Hiljem võeti see kasutusele ka teede projekteerimises. Soomlased on kasutanud seda valemit juba 20 aastat ja kasutavad seda ka praegu.

Odemarki lähenemisel on mitmeid häid külgi:

1. Valem on lihtne ja kõigile arusaadav. Arvutused on põhimõtteliselt teostatavad ka lihtviisil kalkulaatoris või telefoni kalkulaatoris.

2. Odemarki valemi seosed on reaalsete katsetega tõestatud. Ehk tegemist on empiirilise seosega.

3. Odemarki valemi tulem on otseselt võrreldav plaatkoormuskatse E_{v2} väärtusega. See tähendab, et kvaliteedikontroll objektil on adekvaatselt teostatav.

4. Odemarki valemit saab kasutada ajakohaste Euroopas kehtivate materjalide määratlusega.

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

Valem 8: Odemarki valem konstruktsioonikihi peal kandevõime arvutamiseks [19].

Kus

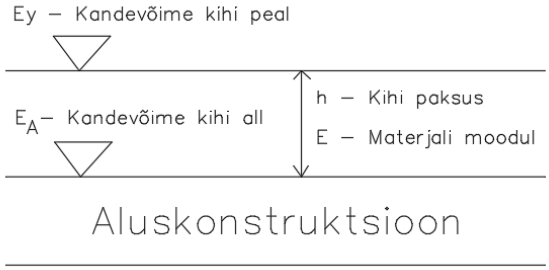
E_A – arvutatava kihi alapinna kandevõime (MPa)

E_y – arvutatava kihi ülapinna kandevõime (MPa)

E – arvutatava kihi materjali E-moodul (MPa)

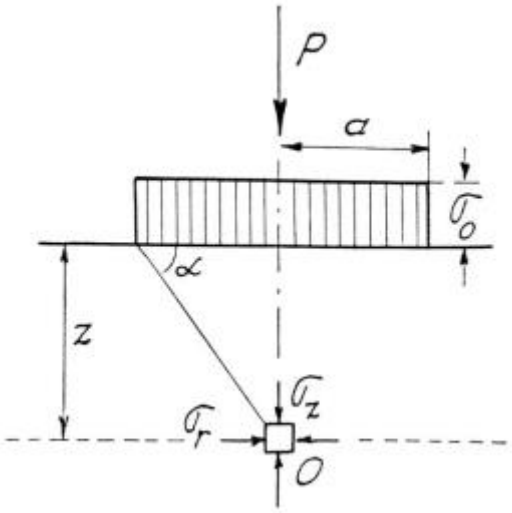
h – arvutatava kihi paksus (m)

0,15 – koormatava ratta puutepinna arvutuslik raadius (m)



Joonis 13: Odemarki valemi tähised seletaval skeemil.

Odemarki valemi aluseks on Boussinesq' teooria. Seda arvutusmudelit kasutatakse sageli vertikaalselt pinnale mõjuva pingete leidmiseks ning see vaatleb pinnast kui lineaarselt deformeeruvat isotroopset poolruumi. Boussinesq seost ei saa kasutada ainult teatud juhtudel – kui pinget on vaja määrata vahetult rakenduva jõupunkti kõrval. Katendi arvutuse seisukohast ei ole sellest probleemi sest Odemarki valemis kasutatakse veoauto rehvile sarnast pinda ehk ringikujulist koormust raadiusega 15 cm ja koormusega 5 tonni.



Joonis 14: Elastse poolruumi teooria. [23]

4. UUE RAKENDUSE KONTSEPTSIOON

Kasutuses olev KAP on programmeeritud tabelarvutustarkvara MS Excelit kasutades ning eesmärgiks oleks KAPile võimalikult ligilähedase välimuse ja loogika saavutamine. See tähendab, et uus versioon peaks olema igaljuhul programmeeritud samas tarkvaras. Lisaks on Excel kasutatav ka nutiseadmetes ehk ka telefoniga on võimalik objektil rehkendusi teostada. Uue süsteemi nimeks oleme valinud KRP (Katendi Rehkendamise Programm). Töö autor ei soovi kasutada KAPi nime, sest see seostub liiga palju olemasoleva programmiga ning tekitaks liigselt segadust, samuti võib tekkida autoriõiguslik konflikt. Samas ei välista autor näiteks rakenduse kasutamist KAP 3.0 nime all, kui Transpordiamet seda sooviks (ja viisil või teisel õigused omandaks). Kuna TPN ei kirjuta ette konkreetset arvutusmetoodikat, on ka ilma TrAm nõusolekuta võimalik KRP kasutus avalikel teedel, mis ei ole riigiteed.

Rakenduse sisu ja loogika baseerub Soome projekteerimisnormil 38/2018. Põhilised muudatused/täiendused on järgnevad:

1. Asfaldikihid diferentseeritud (Soome normis loetakse asfaldiks E-2500 kõik kuumad asfaltsegud, mis sisaldavad vähemalt 3,8% bituumenit, praegu oleme eeldanud KAP juhises määratletud moodulite edasist kasutust, kuid Soome skeemis leitakse kõigi asfaltkihtide kaalutud keskmine elastsusmoodul ja ka rakenduses tehakse see teisendus).

2. Astmeline katendite dimensioneerimisloogika on teisendatud naturaallogaritmiks, et leida liiklussagedusele vastav minimaalne vajalik elastsusmoodul.

3. Lisatud konstruktsiooni kestvuse prognoos. Toimib nn tagasiarvutuse põhimõttel – leitakse, mitmele normteljele vastab konstrueeritu kandevõime ja taandatakse see suhtes soovitud aega.

4. Lisatud CO_2 emissiooni arvutamiseks algne raamistik (emissioon käsitletavana tootmise, transpordi ja paigalduse tsüklites), loogika võimaldab lisada ka hilisemad faasid et katta kogu konstruktsiooni elukaare tsükkel.

5. Lisatud lõimiseteguri Cu arvutuseks kalkulaator. Vajalik näiteks juhul kui on teada, et vaja on saavutada teatava Cu tasemega segu olukorras kus kasutada saab mitut eri materjali ja vastavate materjalide osakaalu muutes saab leida täpselt õige teguriga segu ja vastavad osakaalud.

Rakendusel on hetkel kaks eri versiooni:

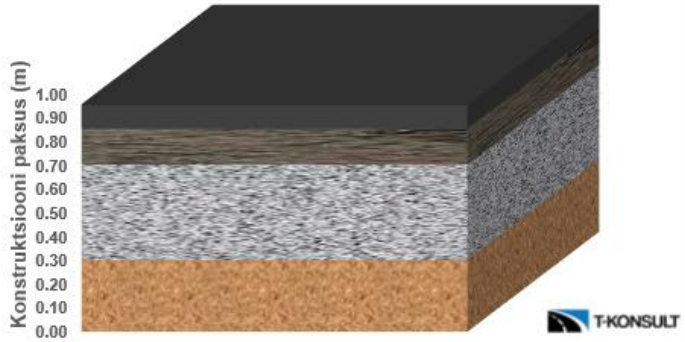
1. Vabakasutuses veebiversioon. Piiratud võimalustega sest HTML veebilehe sisse paigutatavas Exceli rakenduses puuduvad Exceli VBA macro võimalused ning seega on veebiversioon algeline kuid sellegipoolest toimiv ning lihtsamateks toiminguteks piisav. Veebiversioon on kättesaadav www.t-konsult.ee/rd/. Kavas on lisada veebiversioonile pinnaste/materjalide liigituse ning kergseadmetega mõõtmiste teisenduse rakendused.

2. Allalaetav täisversioon. Kõik võimalused avatud. Rakendust hetkel veel ei avaldata, kuid baasfunktsionaalsus toimib.

Arendus ja uurimised

Kandevõime rehkenduse programm (KRP) veebiversioon β_v1

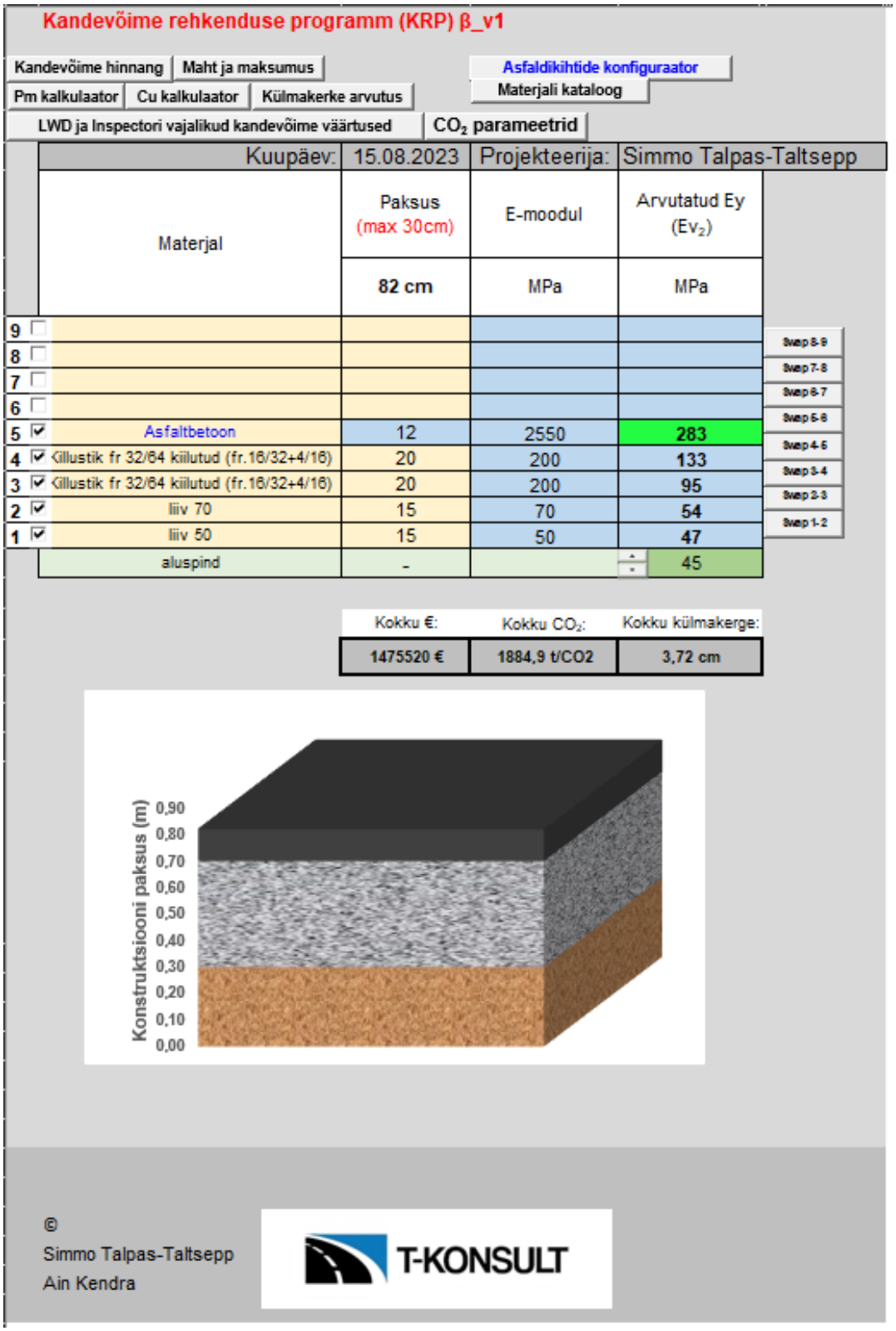
Kuupäev:	11.10.2023			
Materjal	Paksus (max 0,3m)	Hind €/m3	E-moodul	Arvutatud Ey (Ev2)
	0,95 m	48,1 €/m2	MPa	MPa
Asfaltbetoon	0.10	250.00	2500	407
KS (normaalne)	0.15	50.00	1250	256
Go 0/31,5	0.20	27.00	200	123
Go 0/31,5	0.20	27.00	200	84
liiv 100	0.15	16.00	100	45
liiv 70	0.15	16.00	70	30
aluspinnas	-	-	20	20



Hinnang, kui palju kandevõimet vaja?

VAAB	500	AKÖL (tk)
AR	500	AKÖL (tk)
Rajategur	0.55	-
Konstruktsiooni eeldatav tööiga	25	aastat
	6.859	mlj. normtelge
Mitu MPa vaja?	**383**	MPa
Rehkendatud konstruktsiooni kestvuse prognoos	**35.0**	aastat

Joonis 15: Lõputöö raames koostatud KRP veebiversioon.



Joonis 16: Lõputöö raames koostatud KRP täisversiooni pealeht.

4.1 Asfaldikihtide elastsusmoodulite diferentseerimine

Soome teeprojekteerimisnorm näeb ette, et kõik asfaltbetoonid on ühtse elastsusmooduliga – 2500 MPa. Asfaldikihi E-moodulit tuleks sellegipoolest eristada. Ainuüksi bituumenimargist tulenev erisus võib olla väga suur (vt tabel 14). Diferentseerimisel oleks positiivne mõju ka ehitusmaksumusele. Analüüsitud on Soome, Taani, Venemaa ja Eesti kehtivaid projekteerimisnorme ja võrreldud asfaltbetoonide elastsusmooduleid [37] [16] [19].

	10C°	20C°	30C°
Eesti (elastsete teekatendite projekteerimise juhend)			
SMA	3200	1800	-
Valuasfalt	2400	1200	-
Tihe kuum asfaltbetoon	2400	1200	-
Kuum poorne asfaltbetoon	1400	800	-
kuum dreenasfaltbetoon	1400	800	-
Kuum kergasfaltbetoon	1400	800	-
Tihe soe asfaltbetoon	1200	600	-
Soe kergasfaltbetoon	1200	600	-
Seguris/ teel segatud mustkate	950	500	-
Vana asfaltbetoon ja mustkate	1400	800	-
Taani (teekonstruktsioonide dimensioneerimise käsiraamat)			
AC 160/220	-	-	1000
AC 100/150	-	-	1500
AC 70/100	-	-	2000
AC 40/60	-	-	3000
SMA 160/220	-	-	1000
SMA 100/150	-	-	1500
SMA 70/100	-	-	2000
SMA 40/60	-	-	3000
KBL 250/330	-	-	500
KBL 160/220	-	-	1000
KBL 100/150	-	-	1500
KBL 70/100	-	-	2000
ABB 40/60 modifitseeritud	-	-	3000
GAB 70/100	-	-	2000
GAB 40/60	-	-	3000
Vene Föderatsioon (GOST 58406.1)			
AC 70/100	4150	2700	1450
AC 50/70	4800	3350	1850
AC 100/130	3000	1600	1000
AC 130/200	2150	1100	750
AC 100/130	2700	1450	900
SMA 70/100	3800	2450	1300
SMA 50/70	4400	3050	1700

Soome (Transordiameti juhend 2018/38)	
Asfaltbetoon	2500
Pehme asfaltbetoon PAB-V	1400
Pehme asfaltbetoon PAB-B	1650

Tabel 14: Eri riikides kasutusel olevate asfaldi elastsusmoodulite võrdlus.

Tabelist nähtub, et Taani projekteerimisnorm hindab oma asfaldid võrdlemisi tugevateks, arvestades asjaolu, et vastavad elastsusmooduli väärtused kehtivad 30 kraadi juures [37]. Soome juhendis puuduvad viited mis temperatuuri juures vastavad väärtused kehtivad, kuid arvestades, et Soome aasta keskmine temperatuur on üsna madal (lõuna-soomes 7,5°C), võib eeldada, et asfaldi elastsusmoodul on arvestatud Eestiga sarnaselt. Tervikpildist nähtub, et otsene seos eri riikide vahel puudub. Erinevus võib olla tingitud asjaolust, et kuna teekonstruktsiooni projekteerimiseks kasutatavad arvutusalused on erinevad, siis on sisuliselt erinevad ka elastsusmoodulid. Näiteks taanlased kasutavad tarkvara MMOPP mis arvestab asfaldi puhul pealmise pinnakihi suhteliselt soojemana kui allpool olevad asfaldikihid [37]. Sellest tulenevalt võib osutuda loogiliseks taanlaste lähenemine - asfaldi elastsusmoodulid 30°C juurde teisendada ning seejärel arvutusprogramm ise arvutab mis elastsusmooduliga on pinnakihist allpool olevad kihid. Tegemis on võimaliku arendusega, mida tulevikus realiseerida. Kuna kindlat tellijat ja soovi hetkel pole siis pole ka mõtet seda hetkel teostada.

Töö autor pakub välja, et üks võimalik lahendus oleks jätkata juba Eestis täna kehtivaid asfaldi elastsusmooduli E1 väärtuseid sest suurusjärk täna Soomes kehtivaga on ligilähedane. Näiteks Eestis tihe kuum asfaltbetoon 2400 MPa ja Soomes 2500 MPa. **Eestis täna kehtiv asfaldi määratlus on KAPi arvutusalustest täiesti eraldiseisev osa ning ei ole kuidagi seotud GOST 25100-82 määratlusega. See tähendab, et ei ole mingit takistust seda edasi kasutada ka algsel Odemarkil baseeruvas rakenduses** [6] [5].

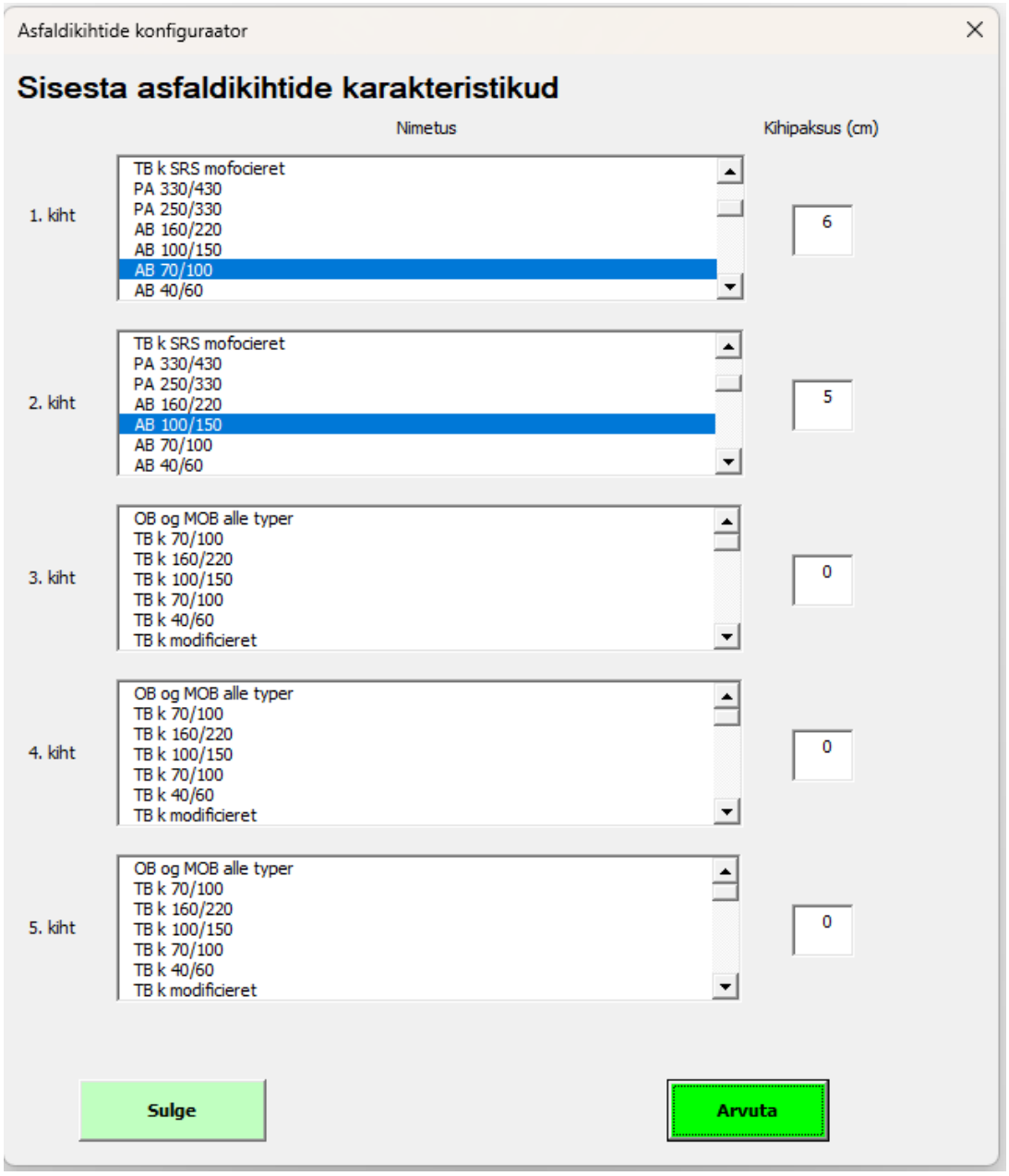
Teiseks variandiks võiks olla võiks olla Taani jaotus sest taanlased on Odemarki valemit varasemalt kasutanud ja nende MMOPP rakenduse sees on see valem tänaseni säilinud. [38]. Kuid elastsusmoodulid tuleks teisendada Eesti kliimale sobivamaks - vähemalt 20 kraadi tasemele. Teisendamiseks vajalik suhtarv saadakse täna kehtivast Vene normist, kus on näidatud igale margile elastsusmoodulite väärtused eri temperatuuridel. On võimalik leida teisenduseks vajalik suhe ja kasutada seda Taani asfaltkatete jaotuses.

	10C°	20C°	30C°	
Eesti (elastsete teekatendite projekteerimise juhend)				
SMA	3200	1800	-	
Valuasfalt	2400	1200	-	
Tihe kuum asfaltbetoon	2400	1200	-	
Kuum poorne asfaltbetoon	1400	800	-	
kuum dreenasfaltbetoon	1400	800	-	
Kuum kergasfaltbetoon	1400	800	-	
Tihe soe asfaltbetoon	1200	600	-	
Soe kergasfaltbetoon	1200	600	-	
Seguris/ teel segatud mustkate	950	500	-	
Vana asfaltbetoon ja mustkate	1400	800	-	
Taani (teekonstruktsioonide dimensioneerimise käsiraamat)				
AC 160/220	-	1700	1000	
AC 100/150	-	2550	1500	
AC 70/100	-	3400	2000	
AC 40/60	-	5100	3000	
SMA 160/220	-	1700	1000	
SMA 100/150	-	2550	1500	
SMA 70/100	-	3400	2000	
SMA 40/60	-	5100	3000	
KBL 250/330	-	850	500	
KBL 160/220	-	1700	1000	
KBL 100/150	-	2550	1500	
KBL 70/100	-	3400	2000	
ABB 40/60 modifitseeritud	-	5100	3000	
GAB 70/100	-	3400	2000	
GAB 40/60	-	5100	3000	
Vene Föderatsioon (GOST 58406.1)				suhe
AC 70/100	4150	2700	1450	1,86
AC 50/70	4800	3350	1850	1,81
AC 100/130	3000	1600	1000	1,60
AC 130/200	2150	1100	750	1,47
AC 100/130	2700	1450	900	1,61
SMA 70/100	3800	2450	1300	1,88
SMA 50/70	4400	3050	1700	1,79
			average:	1,7
Soome (Transordiameti juhend 2018/38)				
Asfaltbetoon		2500		
Pehme asfaltbetoon PAB-V		1400		
Pehme asfaltbetoon PAB-B		1650		

Tabel 15: Taanis kehtivad elastsusmooduli väärtused teisendatud 20°C tasemele.

4.1.1 Asfaldikihtide valik KRP täisrakenduses

Programmi kasutaja valib asfaldikihtide valiku makroaknas huvipakkuvad kihid ning sisestab iga kihi paksused ning seejärel arvutatakse asfaldikihtide kui terviku E-moodul.



Joonis 17: Asfaldikihtide konfiguraatori makroaken rakenduses KRP.

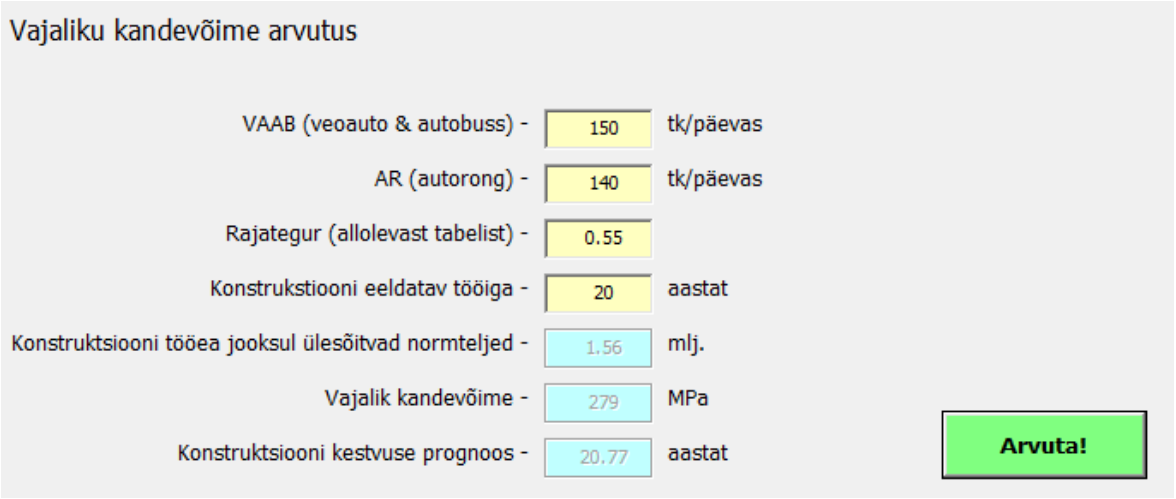
Seejärel valides põhitabelis materjaliks „asfaltbetoon", sisaldab see valik juba konfiguraatoris tehtud valikuid ja muudatusi. Soome metoodika iseärasustest tulenevalt peab algoritm arvutama mitmekihilise asfaltkonstruktsiooni puhul asfaldikihtide kui terviku E-mooduli sõltuvalt iga üksiku kihi paksusest.

Kui on kaks asfaldikihti. Üks kiht 10 cm ja E=2500 MPa ning teine 6 cm ja 3000 MPa siis sellist kahte kihti vaadeldakse tervikuna ning sellise terviku elastsusmooduliks on (2500*10+3000*6)/16=2687,5 MPa. Programm teeb selle arvutuse automaatselt, kui asfaldikihtide valikus on teostatud kihtide valikud ja sisestatud kihipaksused. Valitavate asfaldikihtide nomenklatuuris lepitakse kokku enne täisversiooni avaldamist.

4.2 Konstruktsiooni kestvuse prognoos

Juhul, kui pole eelnevalt teada minimaalne vajalik konstruktsiooni E-moodul, siis tuleks alustada E_{vaj} määramisega. Ava „kandevõime hinnang" aken ning sisesta kollastesse lahtritesse VAAB ja AR kohta mitu tk/päevas neid sõidab (tegemist on ekspluatatsiooni 10-nda aasta liiklussagedusega mõlemad suunad kokku). Seejärel sisesta rajategur ja katendi eeldatav tööiga. Pärast andmete sisestamist peab vajutama „Arvuta!". Programm arvutab ise välja vajaliku minimaalse E-mooduli ja kasutaja peab sellega järgmistes sammudes arvestama. Algoritm töötab lihtsal loogikal – kui põhitabelis dimensioneeritud katend on tugevam kui vaja, siis tagasiarvutuse teel on võimalik teada saada kui palju kauem konstruktsioon vastu peab. Sama kehtib ka juhul kui dimensioneerida liiga nõrk konstruktsioon. Algoritmi sisuna on kasutatud Soome astmelist lähenemist sujuva naturaallogaritmfunktsioonina.

Loogikat tuleb edasi arendada, võttes arvesse Soome juhise parandusteguri, mis suurendab koormussagedust kui sõiduraja ja peenra summaarne laius on alla 5 meetri või piire paikneb rajale lähemal kui 1,5 meetrit.



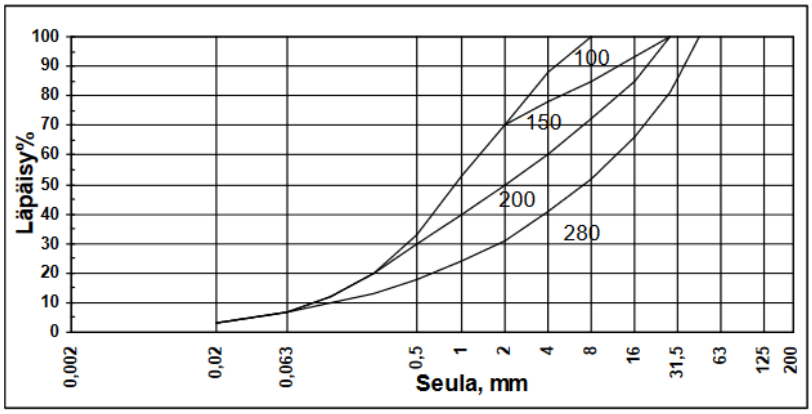
Joonis 18: Väljavõte KRP rakenduse „kandevõime hinnang" aknast.

Juhul kui kasutaja poolt dimensioneeritud konstruktsioon ei ole piisavalt tugev, siis näidatakse see arvutustabelis (joonis 14) punast värvi. Algoritm võrdleb arvutatud

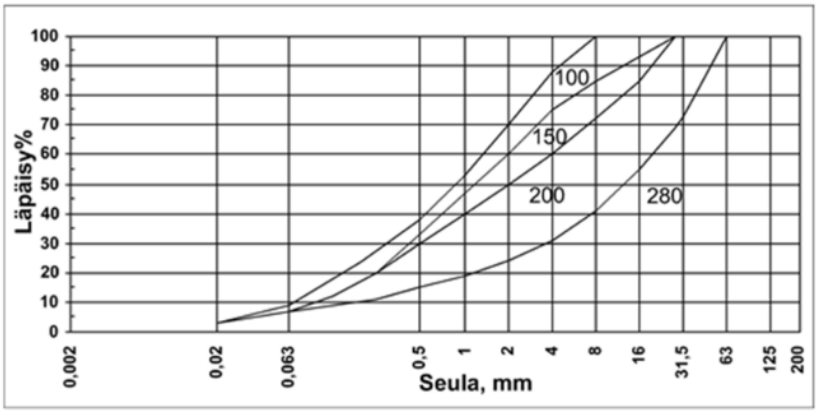
tulemust vajaliku kandevõimega (Joonis 16). 60t autorongide uuringus selgus, et võrreldes ühte ja sama konstruktsiooni KAPis ja KRP-s, näitab KRP tagurpidi naturaallogaritmvalem (hinnanguline kestvuse prognoos), et konstruktsioon kestab ettenähtud 20 aaasta asemel 15 aastat. [13]

4.2 Sidumata kihtide diferentseerimine

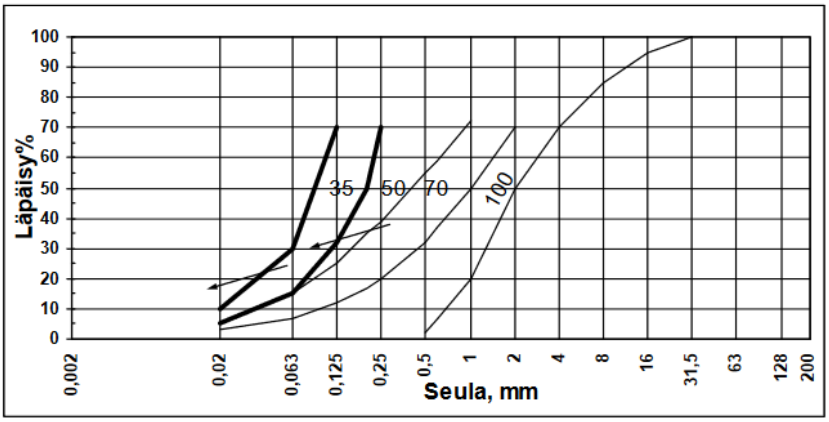
Uues süsteemis tuleks igal juhul materjali sõelkõvera alusel elastsusmooduli arvutamine realiseerida, sest sellisel juhul saab E-mooduli määramist uues rakenduses automatiseerida. Võimalik, et kuna Soomes kasutatakse peamiselt graniitkillustikku, siis purustatud kivimaterjali elastsusmooduli määramiseks mõeldud graafikut tuleks Eesti tingimustes kasutamiseks täpsustada, sest on üldteada, et paekillustik on nõrgem kui graniitkillustik. Lisaks on probleem ka see, et Soomes kasutatav tardkivikillustik on optimaalse terastikulise koostisega, kus peenosistesisaldus on piiratud, purustatud kivimite puhul 7% ja purukruusa puhul 9% tasemega. Oluline on seejuures märkida, et seda peenosiste sisaldust ei tohi ületada ka teelt tihendatud kihist võetud proovides.
Uue süsteemi loomisel on eesmärgiks Euroopa liidus kehtiva süsteemi EVS-EN ISO kasutusele võtmine. See tähendab, et tõenäoliselt on kõige kergem kasutusele võtta Soome teede projekteerimisjuhendis 38/2018 paiknevad graafikud, mille abil on võimalik sõelkõvera alusel materjale ja pinnaseid liigitada (vt Graafik 3, 4 ja 5) [19].



Joonis 19: Purustatud kivimaterjali elastsusmooduli määramiseks kasutatav sõelkõvera graafik. [19]



Joonis 20: Loodusliku kruusa elastsusmooduli määramiseks kasutatav sõelkõvera graafik. [19]



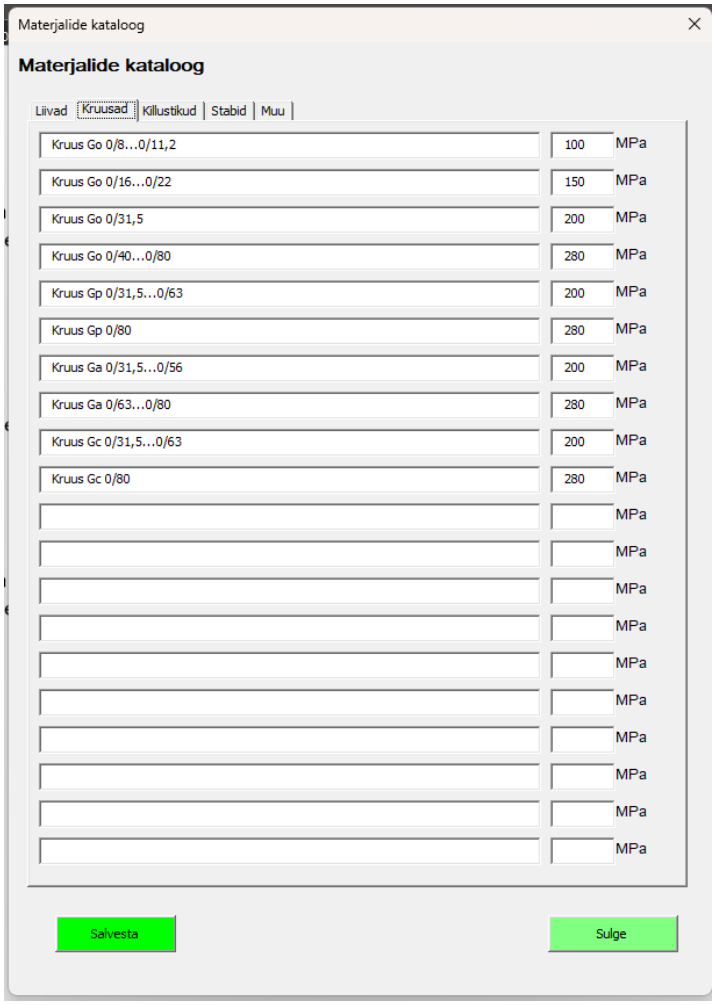
Joonis 21: Liiva elastsusmooduli määramiseks kasutatav sõelkõvera graafik. [19]

Graafikud 18 ja 19 toimivad loogikaga, et määravaks saab minimaalne elastsusmooduli väärtus, mida materjali sõelkõver läbib. Näiteks kui sõelkõver läheb läbi „150" ja „200" tähistatud aladelt siis määravaks osutub alati vähim väärtus ehk 150 MPa. Liiva graafikul (graafik 20) on määratud veel nooltega lisatingimused. Materjali sõelkõvera joon ei tohi ületada jämedat joont noolega näidatud suunas. Sellistel puhkudel ei ole tegemist enam liivaga, vaid pinnasega, mille parameetrid määratakse juhendi tabeli 6 alusel.

Lisades (lisa 12 kuni lisa 14) on näidatud lõputöö käigus Excelisse realiseeritud sõelkõvera alusel elastsusmooduli määramine.

4.3 Sidumata kihid KRP rakenduses

Soome teedeprojekteerimisnormi 2018-38 kohased sidumata materjalid on toodud sisse ka KRP rakendusse. Kasutaja saab materjale ka ise lisada kui kirjutab allolevasse aknasse materjali nimetuse ja sellele vastava E-mooduli. Perspektiivis on planeeritud materjalide loend lukustada ning muutmisõigused antakse ainult teatud kasutajatele.



Joonis 22: Materjalide kataloog KRP rakenduses.

4.3 Külmakerke arvutus

Uues rakenduses on realiseeritud Soome Transpordiameti 2018-38 juhendi kohaselt külmakerke ulatuse arvutusskeem. Exceli makroaknas avaneb kasutajale vaade, kuhu tuleb sisestada konkreetse piirkonna kohta külmumisügavus ning seejärel arvutab programm külmakerke ulatuse sentimeetrites.

Programmi kasutaja leiab tabelist lähimate ilmavaatluspunktide kohta külmumissügavused ning interpoleerib objekti asukoha kohta külmumissügavuse väärtuse. Allolev arvutusloogika on realiseeritud KRP rakenduses.

Soome arvutusskeem külmakerke arvutuseks on järgnev [19]:

Valem 9: $P=S-R_{red}$,

kus

P – külmuv aluskonstruktsiooni kihi paksus (mm)

S – külmumissügavus (mm)

R_{red} – redutseeritud konstruktsiooni paksus (mm)

Valem 10: $R_{red}=(a_1*R_1)+(a_2*R_2)+(a_3*R_3)+…+(a_i*R_i)$,

kus

$a…a_i$ – kihi isolatsiooni karakteristikud (Soome projekteerimisnormi tabelist 7)

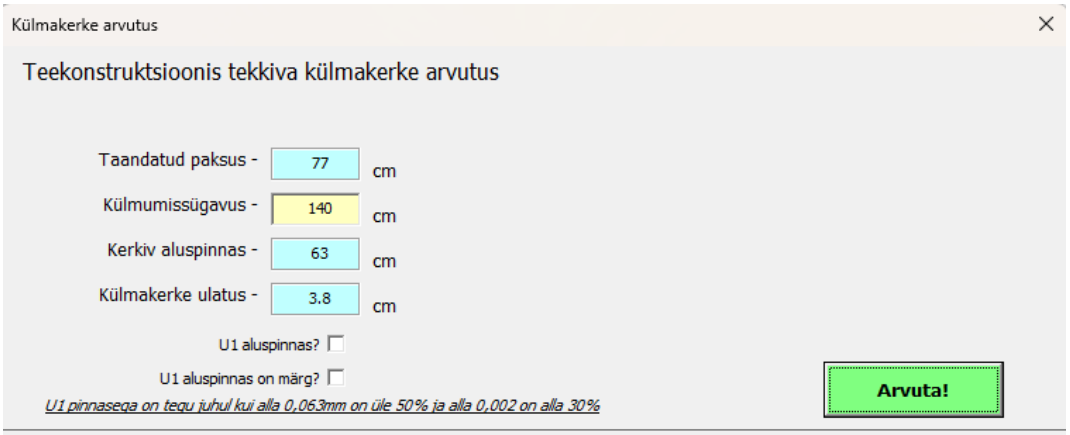
$R_1…R_i$ – konstruktsioonikihi paksus (mm)

Valem 11: $RN_{arv}=P*t/100$,

kus

P - külmuva aluskonstruktsioonikihi paksus (arvutatakse valemitega 1 ja 2)

t - aluskonstruktsiooni külmakerkelisuse % (Soome projekteerimisnormi tabelist 6)



Tee tüüp ja projektkiirus		Suurim lubatud arvutuslik külmakerge teekattel, mm			Sidumata kihi vähim siirdekiilu kalle tee konstruktsiooni muutmisel
		Ühtlaste omadustega aluspinnas		Ebaühtlaste omadustega aluspinnas	
Tee tüüp	Projektkiirus, km/h	Üldreegel	Hüdraulilise sideaine kasutamisel tee konstruktsioonis		
Asulaväline tee	100 ja 110	70	70	10	1:30
	80 ja 90	100	70	10	1:20
	60 ja 70	130	70	30	1:15
	40 ja 50	160	100	70	1:10
Asulasisene tee	> 70	70	70	10	1:30
	60 ja 70	130	70	30	1:15
	40 ja 50	160	100	70	1:10
Muud teed ja kergliiklusteed	-	160	100	70	1:7

Joonis 23: Külmakerke arvutuse makroaken rakenduses KRP.

NB! Mõiste „kerkiv aluspinnas" on siinkohal külmakerkeliste materjalikihtide paksus kokku.

Aluspinna külmakerkelisuse % leidmine on automatiseeritud. Kui kasutaja sisestab elastsusmooduli väärtuse aluspinna elastsusmooduli lahtrisse, siis algoritm leiab selle alusel milline on külmakerkelisuse %. Ainult U1 aluspinnase (<0,063 mm üle 50% ja 0,002 mm alla 30%) puhul ei saa automaatset lahendit kasutada ja siis peab kasutaja makroaknas panema U1 aluspinnase järele linnukese. U1 aluspinnas on märg ainult juhul, kui tee muldkeha kõrgus on väiksem kui arvutuslik külmumissügavus S ja/või siis kui veetase on ajuti kõrgemal kui arvutuslik külmumissügavus S.

4.4 Adekvaatne kvaliteedikontroll

Hetkel kasutuses oleva KAPi arvutuslikud deformatsioonimoodulid ei ole mõõdetavad. Teistest uuritud riikidest vaid Soome süsteemis (Soome transpordiameti juhend 2018/038) näidatakse plaatkoormuskatsega mõõdetavad E_{v2} kandevõime väärtused igal kihil. Nii killustike kui seotud kihtide materjalide arvutuslike elastsusmoodulite väärtused on lähedased, kuid liivadel on olulised erisused – Vene juhistes ja Elastsete teekatendite juhendis on liivad hinnatud umbes kolmandiku kuni kaks korda tugevamateks võrreldes Soome (ja uue Venemaa) süsteemiga.

Uues süsteemis lahendatakse kandevõime mõõtmise küsimused. Vaja on tekitada katendiarvutusprogrammis lisafunktsioon, milles olev algoritm suudab välja arvutada kui suur peaks olema deformatsioonimooduli väärtus igal sidumata konstruktsioonikihil. Seejuures tuleb eristada erinevaid mõõteseadmeid. On teada, et mõõdetud kandevõime väärtus sama konstruktsiooni puhul võib ligikaudu 30% erineda [12] sõltuvalt sellest millega mõõdetakse.

4.4.1 Erinevad kvaliteedikontrolli seadmed sidumata kihil

Laias laastus on 3 erinevat võimalust sidumata kihil kandevõime mõõtmiseks:

- Plaatkoormuskatse seade (staatilise koormamise seade)

Joonis 24: Plaatkoormuskatse seade objektil. [30]

Plaatkoormuskatse suurim eelis võrreldes teiste seadmetega on katse ajal võimaliku roome teke pinnases. Juhul kui aluspinnasesse jäi märga savi siis katse käigus võib juhtuda et vajumine ei jäägi pidama ning seega konstruktsioon ei ole sobilik. Kuna PKK

võtab üsna kaua aega (ca 30 min) ühe katsepunkti kohta, siis on võimalik, et mõõtmisi ei tehta nii tihedalt kui võrrelda kiiremate dünaamiliste seadmetega ning seetõttu üldpilt ehitusobjektist ei ole nii selge.

Teede Tehnokeskuse uuringust on selgunud, et ligi pooltel mõõdetud killustikukihtidel ei ole plaatkoormuskatsega mõõtes vajalik kandevõime tagatud [3]. On võimalik, et aladimensioneeritakse teekonstruktsioone kui kasutatakse KAP rakendust või on kehtestatud minimaalne vajalik kandevõime (mis ei ole arvutatu vaid fikseeritud nõudena 150 MPa) liiga kõrge.

Soome katendiarvutussüsteemi arvutustulemusena saadakse otse plaatkoormuskatse poolt mõõdetav E_{v2} väärtus, ehk siis oleks täpselt võimalik hinnata iga konstruktsiooni kihi peal vajalik minimaalne kandevõime väärtus. Alternatiivina saaks kaaluda ka KAPiga konstrueeritud konstruktsiooni läbi arvutamist KRPga et seejärel täpselt öelda, milline peab olema igal kihil kandevõime.

- Kergdeflektomeeter ehk LWD (Light Weight Deflectometer) seade. Tegemist on dünaamilise koormamise seadmega.

Joonis 25: Dynatest LWD seade objektil. [30]

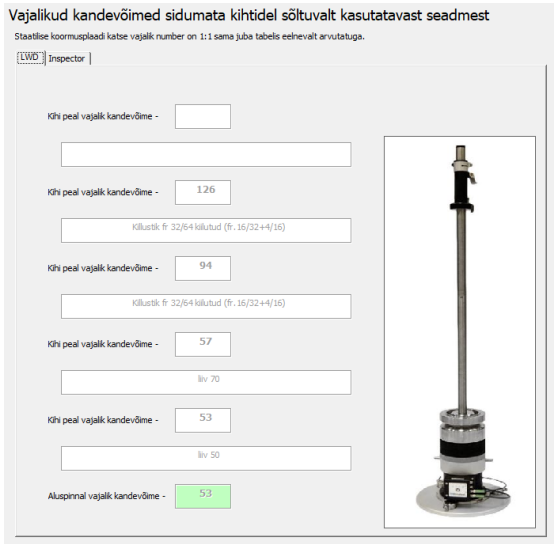
- Inspector/Loadman seade (dünaamilise koormamise seade)

Joonis 26: Inspector seadmed. [39]

Uus programm peaks arvutama E_{v2} väärtuse ehk plaatkoormuskatse vajaliku tulemuse. PKK tulemusest on võimalik teisendada vajalik kandevõime väärtus teiste (dünaamiliste) seadmete jaoks vastavalt Tallinna Linnavalitsuse 18. septembri 2019 määruse nr 27 LISA 1-le (Tallinna tüüpkatendid, mis funktsionaalselt on siiski katendikataloog).

4.4.2 KRP kvaliteedikontrolli funktsioon

Projekteeritud katendikihtidele arvutab KRP rakendus ka vajalikud kandevõime numbrid alternatiivsete kandevõime mõõtmise seadmete jaoks. Kui plaatkoormuskatse vajalik deformatsioonimoodul on üks-ühele sama töölehel arvutatud E_{v2} tulemus siis Dynatest LWD ülemineku jaoks on eraldi makroaken „LWD vajalikud kandevõime väärtused".



Joonis 27: Dynatest LWD seadme mõõdetavad E väärtused rakenduses KRP.

4.4.2.1 LWD seos plaatkoormuskatsega

Seosed Odemarki arvutusvalemi tulemusel saadud terviku E väärtuse (ehk teoreetilise Ev2 väärtuse) ja Dynatest LWD poolt mõõdetava väärtuse leidmiseks on saadud R.Eichfussi lõputööst. On uuritud seost LWD ja plaatkoormuskatse vahel ning saadud üleminekutabel. Algsele mis sisaldub ka Tallinna kataloogis, on lisatud võrdlus ka 300 kPa reziimile.

PLT	180	150	120	100	80	70	60	50	45
Dyna@100kPa avg	132	115	99	82	66	58	50	45	41
Dyna@300kPa avg	156	136	117	97	78	68	59	53	48
Dyna@100kPa min	106	92	79	66	53	46	40	36	33
Dyna@300kPa min	125	109	93	78	63	54	47	42	39

Tabel 16: Dynatest LWD ja plaatkoormuskatse tulemuse omavaheline seos.

Oluline on selgitada, et tegemist on kahe piirväärtusega, **avg** all mõistame viie järjestikuse mõõtepunkti kandevõime väärtuste libisevat keskmist, kusjuures ükski mõõtetulemus ei tohi olla madalam kui **min**-väärtus. See põhimõte tuleneb Ühendkuningriigi aluste juhendist [40] ning lahendab sageli objektil esineva probleemi.

4.4.3 Tehnoloogiliste kihtide mõju

4.4.3.1 Geotekstiil

Töö autori isiklik kogemus ning eelnevalt tehtud uuringud [41] tõestavad, et geosünteedil on mõju teekonstruktsiooni kihi peal mõõdetavale kandevõimele. Rait Kopti on oma magistritöös geosünteedi mõju uurinud ning leidnud, et Dynatest LWD seadmega mõõtes killustikukihilt väheneb tulemus kuni 30%. See korreleerub suhteliselt hästi töö autori poolt plaatkoormuskatse käigus mõõdetud tulemustega. Kuigi plaatkoormuskatsega kipub erinevus olema pigem 40%.

Kvaliteedikontrollis tuleks arvestada, et kui on geosünteete teekonstruktsioonis kasutatud siis reaalselt mõõdetud kandevõime jääb madalamaks kui arvutatud tulem. Kui suur ja millistel tingimustel see erisus tekib, pole selle töö raames uuritud ning teema vajaks põhjalikumat uurimist ning katsetamist.

Töö autor on oma töös puutunud kokku olukordadega, kus geotekstiil katendi kihis (killustiku ja liivakihi vahel) mõjutab plaatkoormuskatse puhul mõlema koormustsükli kandevõime tulemusi. Analüüsitud on avaldamata plaatkoormuskatse mõõtmisprotokolle, mille mõõtmised on teostatud autori poolt 2021 aastal Teede Tehnokeskuses (lisa 4 kuni 11).

Geosünteediga konstruktsioon	
geosünteediga konstruktsioon (E_{v1}, MPa)	**geosünteediga konstruktsioon (E_{v2}, MPa)**
42	128
58	102
65	111
Geosünteedita konstruktsioon	
geosünteedita konstruktsioon (E_{v1}, MPa)	**geosünteedita konstruktsioon (E_{v2}, MPa)**
111	229
91	192
110	204
90	152
112	213

Tabel 17: Ühe objekti piires killustikukihilt mõõdetud tulemused plaatkoormuskatse seadmega ning võrdlus geosünteediga ja ilma. [42]

Kuna on kindlalt teada, et geosünteet parandab kandevõimet [43], siis on vastuoluline, et mõõdetav väärtus tuleb väiksem. Seetõttu tuleks teemat mõnes järgmises uurimistöös edasi uurida. Tõenäoline selgitus võib olla materjali eelpingestamises ehk vinnastamises, mis toimub nii järgnevate kihtide paigaldamise/tihendamisega kui ka reaalse koormuse all esimesel tööaastal.

Täna on välja selgitamata järgmised küsimused:

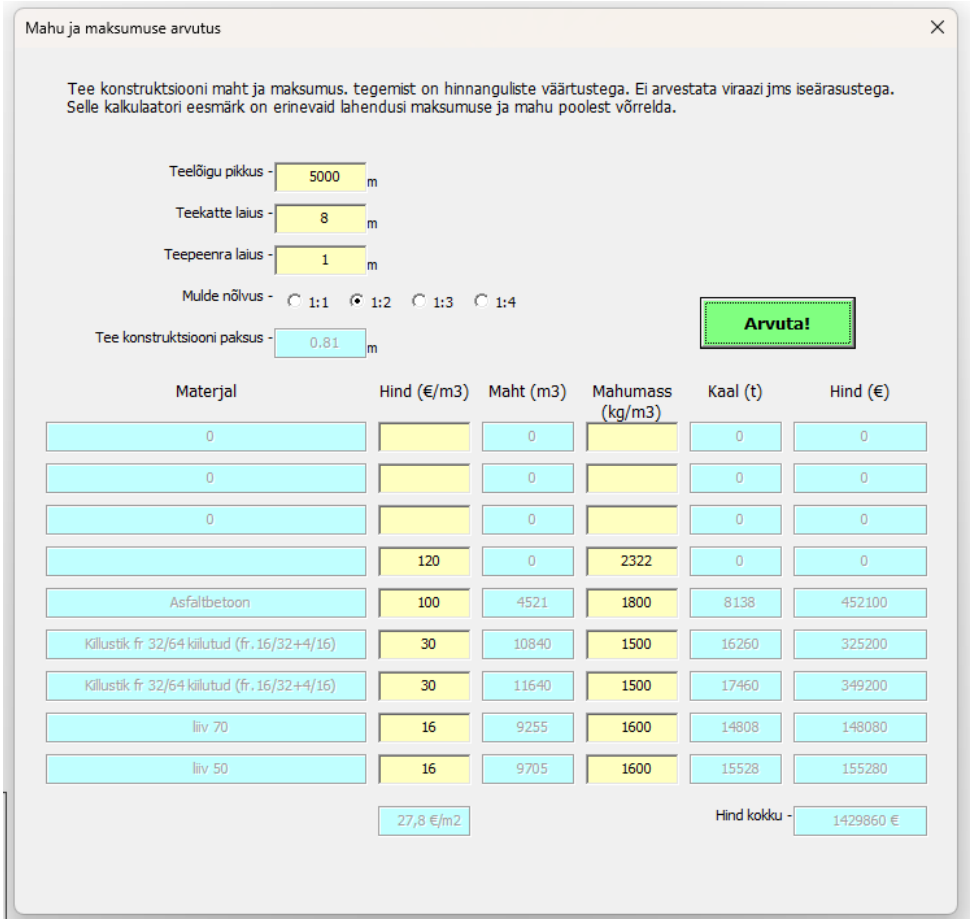
- Kas ja kui suurel määral geosünteedi mõju oleneb konkreetse tekstiili füüsikalistest omadustest (paksusest, tihedusest, materjalist vms)?
- Millisel paigaldussügavusel lõpeb negatiivne mõju kandevõime mõõdetavusele?
- Kas mõõdetava kandevõime ja geotekstiili vahel on omakorda seosed mis sõltuvad konkreetsest mõõteseadmest? Hüpoteesiks saaks väita, et dünaamilise kvaliteedikontrolliseadmega ei teki erisus nii suur kui staatilise (plaatkoormuskatse) poolt mõõdetud seadme tulemusega.

4.5 Mahud ja maksumused

KRP rakenduses on realiseeritud mahu ja maksumuse arvutus. Mahu arvutuses on lähtutud järgnevatest muutujatest:

- Teelõigu pikkus (m)
- Teekatte laius (m)
- Teepeenra laius (m)
- Mulde nõlvus (variantideks on 1:1, 1:2, 1:3 ja 1:4)

Rakendus arvutab sõltuvalt kasutaja sisestatud andmetele iga kihi kohta materjali kogu massi tonnides ja mahu kuupmeetrites. Maksumuse arvutuses on lisaks eelnevale arvestatud ka materjali tihedust. Vastava lünga peab kasutaja ise täitma. Rakendus arvutab lisaks tee terviku ühe ruutmeetri hinna.



Joonis 28: Mahu ja maksumuse arvutuse parameetrid rakenduses KRP.

Tabelis nähtuv maksumus on indikatiivne ja mõeldud kasutamiseks eri teekonstruktsiooni variantide võrdlemiseks.

4.5 KRP lisafunktsioonid

4.5.1 Lõimisetegur Cu arvutamine

Lisafunktsioonina on ka veebirakenduses olemas „Cu kalkulaator", mis suudab arvutada:

- Sõelkõvera alusel materjali lõimiseteguri.
- Eri materjalidest (kuni 3 eri materjali) koosneva materjalide segu lõimiseteguri. Reguleerides iga üksiku materjali osakaalusi, on võimalik leida täpselt vajaliku lõimiseteguriga materjal ning seega saada teada kui palju on igat komponenti vaja kasutada.

Joonis 29: Cu kalkulaatori makroaken rakenduses KRP.

4.5.2 CO_2 arvestamine ehitusprotsessis

Hetkel on töö käigus tekitatud algne raamistik ehitusprotsessi käigus tekkiva CO_2 arvutamiseks. Tulevikus tuleb kliimamõjude hindamine lahendada vastavalt keskkonna deklaratsioonide standardile EN 15804[4]. Transpordiameti eesmärk on 2027. aastaks arvestada kõikides riigiteede korrashoiu hangetes keskkonnahoiu kriteeriumitega. Igal kasutataval materjalil on tulevikus oma EPD (Environmental Product Declaration) [11], seejärel tekib võimalus iga materjali EPD võrdlusnäitajad rakendusse sisestada ja saab võrrelda erinevaid konstruktsiooni lahendusi keskkonna jalajäljest lähtuvalt. Rakenduses on hetkel täpsemalt lahendatud transpordi käigus tekkiv CO_2 heide. Kasutaja sisestab andmed sõltuvalt kasutatavatest veoautodest. Tehniliselt oleks elektriveoauto kasutamisel võimalik sisenditesse kirjutada väärtuseks 0. Sama kehtib

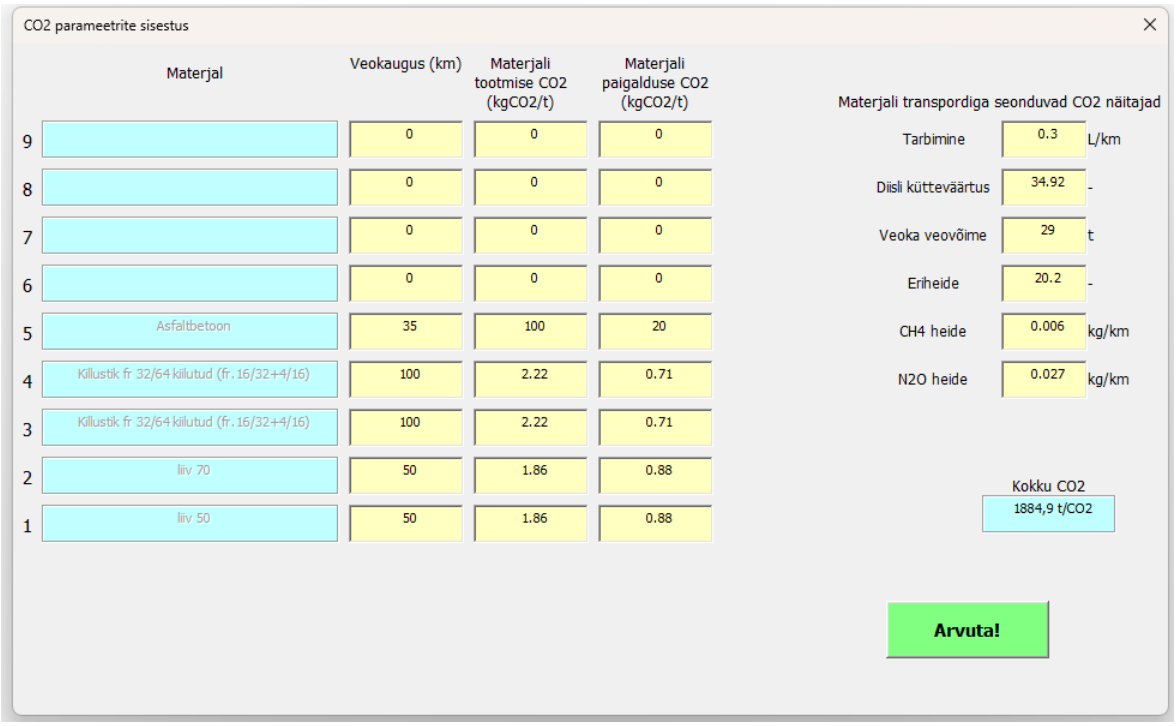
tõenäoliselt ka biodiisli puhul, sest biodiislit tehakse taimedest (rapsist, valgest sinepist, tudrast või õlikanepist) mis oma kasvuga seovad süsinikku ning põlemisel jälle vabaneb süsinik seega summaarselt on tulemus nullilähedane.

Hetkel on kogu arvutus on jagatud kolme suuremasse alakategooriasse.

- Materjali tootmisest tekkiv heide
- Materjali transpordist tekkiv heide. Karjäärist ehitusobjektile.
- Materjali paigaldamisel tekkiv heide

Töö autor on seisukohal, et materjali tootmises tekkiv CO_2 peaks olema kokkuleppeline s.t igale materjalile on omistatud kindel näit. Transpordiamet on tänastes hangetes soovitanud kasutada parema puudumisel Soome analoogseid näitajaid, kuid ka need on esialgsed ja indikatiivsed. Teine variant oleks aretada raamistik kuidas arvutada materjali tootmisest tulenev CO_2 ning seejärel number sisestada allolevasse makroaknasse või arendada olemasolevat samalaadselt nagu hetkel on lahendatud transpordi CO_2 arvutus. Põhimõtteliselt aga peaks tootmisest tulenev heide olema deklareeritud tootja poolt.

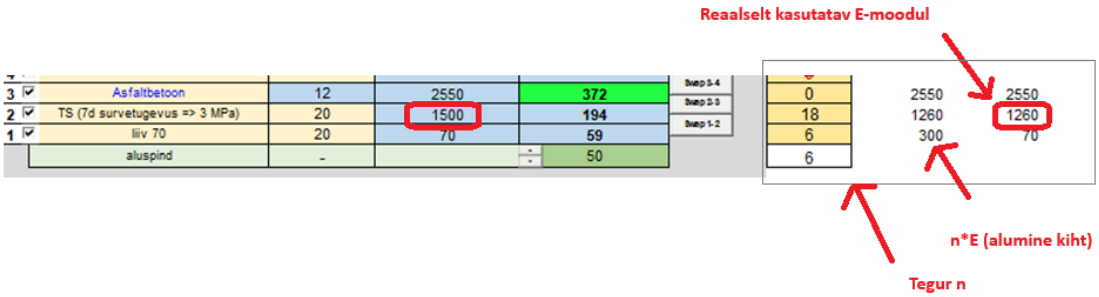
Paigalduse käigus tekkiv CO_2 sõltub suuresti tööjõu kvaliteedist, masinatest mida kasutatakse ja võimalik, et ka siin peaks olema (projekteerija jaoks) igale materjali m^3 kindlaks määratud näit.



Joonis 30: CO_2 parameetrite makroaken rakenduses KRP.

4.5.3 Materjal oluliselt tugevam, kui alapinna kandevõime

KAP 2.0 puudub loogika mille alusel saaks konstruktsiooni terviku elastsusmoodulit vähendada kui nõrgale kihile on paigaldatud palju tugevam kiht (algses juhises ja ka 2001-52 juhendis on piiratud kahe järjestikuse materjali elastsusmoodulite suhte väärtus). Soome juhendis on loogika lahendatud läbi teguri n, millega piiratakse tugeva materjali elastsusmoodulit seoses kihi all arvutatud kandevõimega. Loogika on üle toodud KRP rakendusse sedasi, et algoritm kontrollib ja vajadusel korrigeerib arvutatud elastsusmooduli väärtust vähemaks. All on toodud KRP-st näide olukorra ilmestamiseks. Rakenduse tavaolekus ei ole hallis kastis olevat sisu näha. Tegur n saadakse Soome juhendist 38/2018 tabelist 19 ning vastavad tegurid materjalidele on juba KRP rakendusse integreeritud.



Joonis 31: Arvutusnäide KRP rakendusest.

Arvutuse iva võiks olla selles, et mitte raisata väärt materjali, tuleb stabiliseeritud kihi alla panna mingisugune lisakiht mis ei oleks väga nõrk ning sel juhul tegur n-i mõju enam ei rakendu ja stabiliseeritud kihi täit potentsiaali saab ära kasutada. Teine variant kus tegur n rakendub, on kõrge elastsusmooduliga killustiku kasutamine väga nõrgal alusel. Sel juhul võiks loogika olla selles, et kuna alus on nõrk siis killustikukiht hakkab segunema pehme alusega ning on täiesti loogiline vähendada killustikukihi peal konstruktsiooni kui terviku E-moodulit. Kõigil sidumata kihtidel on teguri n väärtuseks 6.

5. KAVANDATUD ARENDUSED JA ETTEPANEKUD

Lõputöö käigus arendatud KRP rakendust on plaanis täiendada järgnevate komponentidega:

1. Võimalus katendi dimensioneerimiseks mitmel eri lehel ja seejärel saaks vaadata kokkuvõtte tabelit kus eri variandid on välja toodud ning siis tekib projekteerijal ka võimalus võrrelda ning valida. Võrrelda saab omavahel ehitusmaksumust, protsessi käigus tekkivat CO_2, kogu elukaare kulusi, ehitatava kihi omapärast tulenevat ehitusaega jms olulisi näitajaid. Analoogselt, kui on teostatud üksikute lõikude konstruktsioonide valik, saame ka hinnata kogu objekti katendi tervikmaksumust kirjeldades lõikude valitud variandid koos teepikkustega.

2. Siduda KRP rakenduse sisse lisaks kaardiaken, kus on näha kõik tegevusloaga karjäärid koos saadaolevate materjalidega, et projekteerijal oleks lihtsam planeerida võimalikke vedusi.

3. Tekitada raamistik tee elukaare jooksul tekkiva CO_2 arvutamiseks (LCA). Hetkel on rakenduses realiseeritud saaste arvutus kuni ekspluatatsiooni andmiseni.

4. Arendada edasi keskkonna jalajälje arvutust vastavalt EN 15804. Raamistik kohandada EPD-le omaste võrdlusnäitajate järgi.

5. Tekitada raamistik tee elukaare jooksul tekkivate kulutuste arvutamiseks.

6. Lisada KRP täisversiooni automaatne AKÖL sisestus, kui projekteerija sisestab tee numbri ja lõigu asukoha (siinjuures tuleks kasutada üldistatud arengutegureid 10-aastase prognoosi piires).

7. Lisada koormusarvutusele peenralaiusest või piirde lähedusest tulenev parandustegur.

8. Lisada geosünteedi arvestamise võimalus. Praktikas on esinenud olukordi, kus geotekstiili kasutuse tõttu on mõõdetav kandevõime tulemus vähenenud kuni 40%. Teema nõuab eraldi uurimist.

9. Lisada kvaliteedikontrolli seos FWD mõõdetud tulemuse ja arvutatud sihtkandevõime vahel. Teema nõuab eraldi uurimist.

KOKKUVÕTE

Autotee kõige tähtsamaks näitajaks on selle piisav kandevõime kogu ekspluatatsiooni jooksul. Uurimise käigus analüüsiti erinevaid teeregistri andmeid ning võrreldi ka omavahel Eestis kasutusel olevat elastsete katendite juhendit (MA 2017-003) Soomes kehtivaga (2018/038). Samuti uuriti hiljutisi uuringuid katendite vallas ning tulemusel saab väita, et teekonstruktsioonid dimensioneeritakse liiga nõrgad. Probleem muutub veelgi suuremaks kui Transpordiamet lubab teedele 25,25m pikkused 60t täismassiga autorongid. Lõputöös tehti kindlaks ka asjaolu, et siirdetegurite muutmisest siinkohal ei piisa. Senini on Soome metoodika suurimaks puuduseks toodud astmelist minimaalse vajaliku kandevõime määrangut mis toob kaasa üledimensioneerimise koormusklassi alaosas koos vastava kallinemisega. Selle probleemi lahenduseks on töös toodud Exceli graafik, kus astmelisus on teisendatud naturaallogaritmfunktsiooniks. Teeregistri andmete analüüsist selgus, et FWD-ga mõõdetud riigiteedest ainult 80% on piisava tasemega. Siinkohal on oluline rõhutada, et FWD mõõtmisi teostatakse reeglina uuelt vastvalminud katendilt või vähemalt iga 15 aasta tagant. Töös avastati, et GOST süsteem hindab liivad kaks korda tugevamateks kui Soome EN-ISO põhine süsteem. Kui võtta arvesse, et elastsete teekatete projekteerimise juhendi kohane minimaalne vajalik kandevõime on oluliselt väiksem kui Soome metoodika järgi ning lisaks arvestada et liivakiht on ülehinnatud siis kahe halva aspekti koos realiseerumisel on tõsine oht, et teekonstruktsioon ei pea vastu ettenähtud ekspluatatsiooniperioodi – värskest 60 t EMS autorongide uuringust järeldus, et 20 aastaks KAPiga dimensioneeritud konstruktsiooni eeldatav tööiga KRP rakenduses on 15 aastat. Lõputöö käigus arendati Exceli keskkonnas uus katendi rehkendamise programm, mis põhineb suurel määral Soome Transpordiameti juhendil 38/2018. Veebiversioon toimib ja sellel on juba rida kasutajaid (KOV objektide ja eratellimuste projektides). Rakenduse sisus on hetkel veel lahtisi otsi, mis vajaks ametkondlikku kokkulepet rakenduse riigiteedel kasutuseks. Näiteks CO_2 näidud eri materjalidel, materjalide täpsem määratlus, geosünteetide mõju mõõdetavale kandevõimele ja külmumissügavuse diferentseerimine.

SUMMARY

The most important indicator of a highway is its sufficient bearing capacity during the entire life-cycle. In the course of the investigation, various data from the Estonian road register were analyzed, and the guide for flexible pavements in use in Estonia was also compared with the one in Finland. Also, recent research in the field of pavements was studied, and as a result, it can be stated that Estonian road structures are dimensioned too weak. The problem becomes even bigger when the government allows 25.25 m long 60 ton articulated vehicles on the roads. The thesis also established the fact that changing the transition factors (ESAL conversion) is not enough here. Until now, the biggest drawback of the Finnish methodology has been the stepwise determination of the minimum required bearing capacity, which means overdimensioning on the lower part of load group KKL and causing higher cost. As a solution to this problem, the work presents an Excel graph where the gradient has been converted into a natural logarithmic function. The analysis of the road registry data revealed that only 80% of the Estonian state roads, measured with FWD are of sufficient quality. At this point, it is important to emphasize that FWD measurements are usually performed on newly constructed pavement or at least every 15 years. In the work, it was discovered that the GOST system evaluates sands twice as strong as the Finnish EN-ISO based system. If you take into account that the minimum required load capacity according to the design guide for elastic pavements is significantly lower than according to the Finnish methodology, and also take into account that the sand layer is overestimated when two bad aspects are realized together, there is a serious risk that the road structure will not withstand the intended duration. Comparative analysis revealed that pavement, designed for 20 years according to KAP, will last 15 according to KRP. In the course of the final thesis, a new pavement design program was developed using MS Excel. New design program is largely based on the instructions of the Finnish Transport Agency 38/2018. There are still loose ends in the content of the application which would require an official agreement. For example, CO_2 readings on different materials, elastic modulus of materials, the effect of geosynthetics on the measured bearing capacity and the differentiation of the freezing depth.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] A. Kendra, H. Rõuk, A. Aavik, K. Jürgenson, S. Sillamäe, O. Ojapõld, R. Renter, A. Pozarski, Elastsete teekatendite arvutusmetoodika arendamine, Tallinn, 2016.

[2] T. Kaal, A. Aavik, S. Sillamäe, J. Viljas, L. Kaal, Teekonstruktsiooni kandevõime mõõtmis- ja arvutusmetoodika täiendamise uuring, Tallinn, 2020.

[3] M. Truu, Teede Tehnokeskus AS, Riigimaanteedel 2017 teostatud plaatkoormus-katsetuste praktika analüüs ja teiste riikide kogemused plaatkoormuskatse rakendamisel.

[4] European Commission. EU Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance;European Commission: Brussels, Belgium, 2016.

[5] Elastsete teekatendite projekteerimisjuhend, Transpordiamet, Tallinn, 2023.

[6] VSN 46-83, Инструкция для проектирования дорог с покрытием, Moskva, 1983.

[7] P. Talviste, IPT Projektijuhtimine OÜ, Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamine lähtekohtade alusuuring III etapp lõpparuanne, Tallinn, 2022.

[8] A. Aavik, Elastsete teekatendite projekteerimise juhendi pinnaste klassifikatsiooni kohandamine EVS-EN ISO 14688-1 ja 2 klassifikatsioonile, Tallinn, 2014.

[9] Teede projekteerimisnorm määrus nr. 71, Tallinn, 2023.

[10] Riigi Teataja, Tee ehitamise kvaliteedi nõuded, määrus 101. Loetud 21.12.2023.

[11] https://www.transpordiamet.ee/uudised/transpordiamet-ja-taristuehitajad-hakkavad-koos-teehoiu-keskkonnajalajalge-vahendama. Loetud 21.12.2023.

[12] R. Eichfuss, Tee konstruktsiooni kihtide kandevõime ja selle mõõtmine seadmega Dynatest LWD, Tallinn, 2018.

[13] A. Kendra, J. Idnurm, A. Küüt, J. Laanes, S. Talpas-Taltsepp, 60t uuring, Tallinn, 2023.

[14] L. Rothenburg, University of Waterloo, Russia Highway Rehabilitation and Maintenance Project: Review of Design Standards, Kanada, 1993.

[15] GOST 25100-82, Moskva, 1982.

[16] Vene Föderatsiooni standard PNST 542-2020.

[17] KAP 2.0, Transpordiamet, Tallinn.

[18] H. Liimatainen, M. Pöllänen, L. Nykänen, Impacts of increasing maximum truck weight – case Finland, 2020.

[19] Soome transpordiameti juhend 38/2018. Loetud 10. august 2023.
[20] Dundulis, K. I. The Lithuanian unified soil classification system. Geological Society of Lithuania, 1997.
[21] AIP Conf. Proc, M. K. A. Ismail, Z. Mohamed, M. Razali, Contact stiffness parameters of soil particles model for discrete element modeling using static packing pressure test, Malaysia, 2018.
[22] Norwegian Public Road Administration, Vegbygging Handbok 018, 2005.
[23] N. Odemark, Undersökning av elasicitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin, 1949.
[24] https://www.teed.ee/teenused/katsetamine-ja mootmine/mootmine/kandevoime/fwd-mootmine/.
[25] A. Aavik, Methodical Basis for the Evaluation of Pavement Structural Strength in Estonian Pavement Management System (EPMS), Tallinn, 2003.
[26] X. Jiang, J. Gabrielson, B. Huang, Y. Bai, P. Polaczyk, M. Zhang, W. Hu, R. Xiao, Evaluation of inverted pavement by structural condition indicators from falling weight deflectometer, 2021.
[27] Katurakenteiden staattinen ja dynaaminen kantavuus, Teemu Siika 2006.
[28] A. Kendra, E. Rohelsaar, P. Škepast, A. Brakmann, R. Sõrmus, Riigimaanteede ja sildade tugevdamise maksumuse hindamine tulenevalt 52 t veoste aastaringse liikumise võimalustest, Ramboll Eesti AS, Tallinn, 2011.
[29] Talvik, Ott. 2009. FWD mőőtmistulemuste alusel arvutatud parameetrite SCI, BDI ja BCI kasutamine teekatendi seisukorra hindamisel.
[30] Autori isiklik fotode erakogu.
[31] US. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Using Falling Weight Deflectometer Data With Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation Chapter 2. Deflection testing guidelines, 2017.
[32] ASTM D 4694.
[33] M. Truu, J. Tükk, E. Puusaag, M. Jentson, Taastusremondi objektide ja liigi valikumetoodika analüüs ja täiendamine lõpparuanne, 2016.
[34] M. Olman, Eesti teede külmumissügavuse kaart, Tallinna Tehikakõrgkool, Tallinn, 2012.
[35] R. Kumar Dutta, V. Khatri, P. Paramita Das, Bearing Capacity of ring footing on weak sand layer overlying a dense sand deposit, 2021.
[36] P. Talviste, IPT Projektijuhtimine OÜ, Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamine lähtekohtade alusuuring II etapp vahearuanne, Tallinn, 2022.
[37] Dimensjonering-Befaestelser og forstaerkningsbelaegninger, 2020.

[38] MMOPP design program for road pavements, 2017.

[39] https://et.englo.eu/products-estonian/INSPECTOR-5.

[40] P.R. Fleming. LWD best practice guide. Loughborough University. Inglismaa. 2013.

[41] R. Kopti, Geosünteetide mõju katendikihtide kandevõimele ja ettepanekud kvaliteedikontrolli nõuete korrigeerimiseks, 2019.

[42] S. Talpas-Taltsepp, R. Raun, Teede Tehnokeskus AS, plaatkoormuskatse mõõteprotokollid, 2020.

[43] P. Sedman, P. Talviste, IPT Projektijuhtimine OÜ, Geosünteetide kasutamine teekonstruktsioonis, töö nr 19-05-1490/3, Tallinn, 2021.

LISAD

Lisa 1: Soome projekteerimisjuhend 38/2018 Tabel 6*:* Pinnase kasutuskõlblikkuse ja aluskonstruktsiooni klasside ning aluskonstruktsiooni mooduli E ja külmakerke t väärtuste määramine [19].

Sõela läbimise % pesusõelumisel			Kasutuskõlblikkuse klass	Moodul E (MPa) Aluskonstruktsiooni klass Külmakerge t (%)		Informatiivne teave	
	0,063 mm	2 mm		Kuiv	Märg	Sobivus 1)	Kirjeldus
				E = 280 **A** t = 0		Lõhatud struktuur	Lahtilõhatud kalju või lõhatud pinnas
				E = 200 **B** t = 0		Kandev pinnas Jaotav pinnas	Killustiku või kruusaga täidetav ala
	< 7	< 70	S1	E = 100 **C** t = 0		Jaotav pinnas	Kr, krLvk (KrMr, krLvMr)
2)	7–15	< 70	S2	E = 70 **D** **t = 0**	E = 50 **E** t = 3	Muldke ha kuivana	KrMr, krLvMr
	16–30	< 70	S3	E = 50 **E** t = 3	E = 35 **F** t = 6	Muldke ha kuivana	KrMr, krLvMr
	31–50	< 70	S4	E = 35 **F** t = 6	E = 20 **H** t = 12	Muldke ha kuivana	möKrMr, mökrLvMr
	< 7	> 70	H1	E = 70 **D** t = 0		Filter	Lv, (LvMr)
	7–15	> 70	H2	E = 50 **E** t = 3		Filter Muldkeha kuivana	Lv, LvMr
	16–30	> 70	H3	E = 35 **F** t = 6	E = 20 **H** t = 12	Muldke ha kuivana	Lv, LvMr
	31–50	> 70	H4	E = 35 **F** t = 6	E = 20 **H** t = 12	Muldke ha kuivana	möLv, möLvMr
0,002 mm	**0,063 mm**	**Pinnase-lõike tugevus**					
< 30	≥ 50		U1	E = 20 **H** t = 12	E = 20 **J** t = 16		Mö, MöMr, 3) ühekordne Sa/Mö
≥ 30	≥ 50	≥ 40 kPa	U2		E = 35 **F** t = 6		Jäik Sa
≥ 30	≥ 50	< 40 kPa	U3		E = 10 **G** t = 6		Pehme Sa
			U4		E = 10 **G** t = 6		Lj

Lisa 2: Soome projekteerimisjuhend 38/2018 Tabel 7: Materjali vastavus isolatsioonivõime seisukohast (a)

Kihi materjal	**Materjali vastavus isolatsioonivõime seisukohast, a_i**
Filtreeriv liivakiht	1,0
Bituumeniga seotud kattekihid	1,0
Kattekonstruktsiooni stabiliseeritud kihid	1,0
Kruus, jaotuskihiga kokkusobiv kruusane liiv (krLv), purustatud kivimaterjal, suureteraline purustatud kivimaterjal, purustatud betoon	0,9
Lõhatud kivimaterjal (Ø = 300 mm või suurem)	0,8
Purustatud räbu, tükiline räbu	1,6
Räbuliiv, kõrgahju-räbuliiv	1,7
Kergkruus (KK) 0,7 m sügavusel, kuivpuistetihedus konstruktsioonis maksimaalselt 400 kg/m³ ja KK all on 0,15 m drenaažikiht	4
Purustatud vahtplast (VpM) 0,7 m sügavusel, kuivpuistetihedus konstruktsioonis maksimaalselt 400 kg/m³ ja VpM-i all on 0,15 m drenaažikiht	4
Ekstruuderiga pressitud polüstüreen (XPS) 0,7 m sügavusel, kui XPS-i all on 0,15 m drenaažikiht	20
Vahtpolüstüreen (EPS) 0,7 m sügavusel, kui EPS-i all on 0,15 m drenaažikiht	15

Lisa 3: Põhimaanteedel teostatud FWD mõõdetud kandevõime tulemuste analüüs 5km lõikude kaupa.

Tabel 50. Põhimaanteede kandevõimejaotus (5 km sammuga)

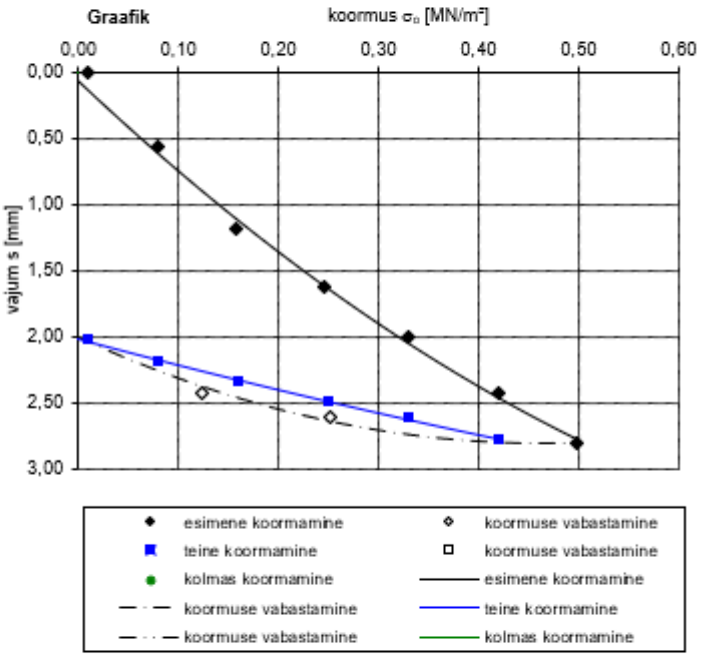
Lisa 4: Plaatkoormuskatse katsearuande väljavõte.

Plaatkoormuskatse (EVS 934:2016-300)

loe andmed

Katsesügavus: Seadme toetuspunkti tasapinnas (h=0)
Kiht: Freespuru
Märkused: -
Ilmastik/temp: Temp +16°C, tuul kuni 8 m/s, märg
Mõõtmised teostas: Simmo Talpas-Taltsepp/Romet Raun
Mõõteseade: Anix GmbH, LVDT vajumi sensor 15mm, jõu sensor 100kN

Nr	Koormus σ_0 [MN/m²]	Vajum s [mm]
esimene koormamine		
1	0,0106	0,00
2	0,0790	0,56
3	0,1574	1,19
4	0,2465	1,63
5	0,3310	2,00
6	0,4211	2,43
7	0,4992	2,80
koormuse vabastamine		
8	0,2519	2,60
9	0,1231	2,42
teine koormamine		
10	0,0099	2,02
11	0,0797	2,19
12	0,1597	2,33
13	0,2509	2,48
14	0,3295	2,61
15	0,4207	2,78
koormuse vabastamine		
kolmas koormamine		



Tulemused			
	Tegelik	Norm	Hinnang
σ_{1max} [MN/m²]	0,4992		
E_{v1} [MN/m²]	**41,66**		
E_{v2} [MN/m²]	**127,96**	puudub	pole arvutatav
E_{v2}/E_{v1}:	**3,071**	puudub	pole arvutatav
E_{v3} [MN/m²]			
E_{v3}/E_{v1}:			
Westergaard'i moodul:	70	MN/m³	
Märkused:			

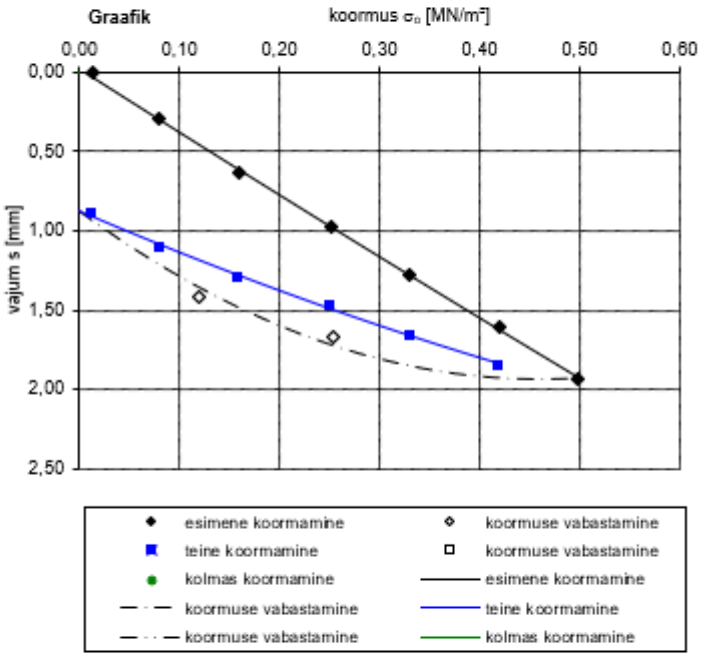
Lisa 5: Plaatkoormuskatse katsearuande väljavõte.

Plaatkoormuskatse (EVS 934:2016-300)

loe andmed

Katsesügavus: Seadme toetuspunkti tasapinnas (h=0)
Kiht: Freespuru
Märkused: -
Ilmastik/temp: Temp +16°C, tuul kuni 8 m/s, märg
Mõõtmised teostas: Simmo Talpas-Taltsepp/Romet Raun
Mõõteseade: Anix GmbH, LVDT vajumi sensor 15mm, jõu sensor 100kN

Nr	Koormus σ_0 [MN/m²]	Vajum s [mm]
esimene koormamine		
1	0,0142	0,00
2	0,0794	0,29
3	0,1605	0,64
4	0,2512	0,97
5	0,3303	1,28
6	0,4205	1,61
7	0,4991	1,93
koormuse vabastamine		
8	0,2548	1,67
9	0,1205	1,42
teine koormamine		
10	0,0110	0,89
11	0,0802	1,10
12	0,1588	1,29
13	0,2501	1,47
14	0,3304	1,65
15	0,4190	1,84
koormuse vabastamine		
kolmas koormamine		



Tulemused			
	Tegelik	Norm	Hinnang
σ_{1max} [MN/m²]	0,4991		
E_{v1} [MN/m²]	**58,00**		
E_{v2} [MN/m²]	**101,88**	puudub	pole arvutatav
E_{v2}/E_{v1}:	**1,757**	puudub	pole arvutatav
E_{v3} [MN/m²]			
E_{v3}/E_{v1}:			
Westergaard'i moodul:	115	MN/m²	
Märkused:			

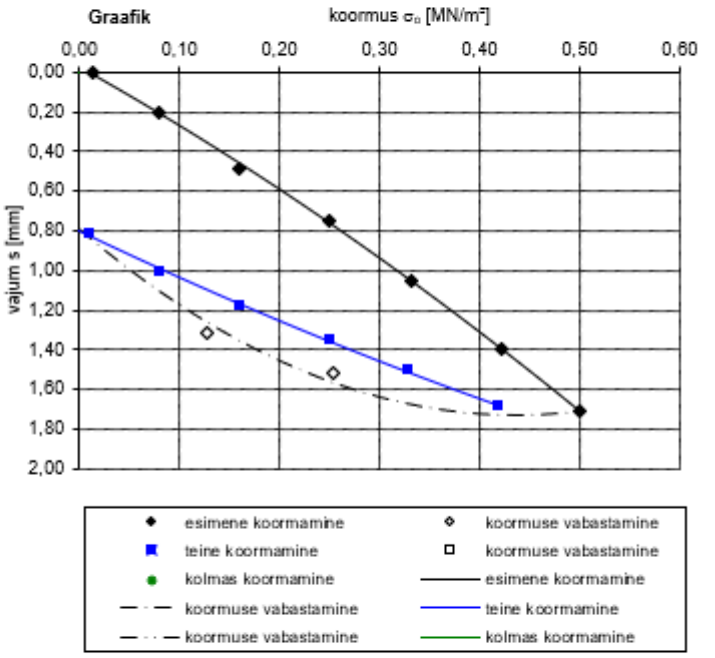
Lisa 6: Plaatkoormuskatse katsearuande väljavõte.

Plaatkoormuskatse (EVS 934:2016-300)

loe andmed

Katsesügavus: Seadme toetuspunkti tasapinnas (h=0)
Kiht: Freespuru
Märkused: -
Ilmastik/temp: Temp +16°C, tuul kuni 8 m/s, märg
Mõõtmised teostas: Simmo Talpas-Taltsepp/Romet Raun
Mõõteseade: Anix GmbH, LVDT vajumi sensor 15mm, jõu sensor 100kN

Nr	Koormus σ_0 [MN/m²]	Vajum s [mm]
esimene koormamine		
1	0,0143	0,00
2	0,0803	0,20
3	0,1605	0,49
4	0,2499	0,75
5	0,3327	1,05
6	0,4213	1,40
7	0,4999	1,71
koormuse vabastamine		
8	0,2534	1,52
9	0,1279	1,31
teine koormamine		
10	0,0101	0,81
11	0,0796	1,00
12	0,1609	1,17
13	0,2491	1,34
14	0,3290	1,50
15	0,4190	1,68
koormuse vabastamine		
kolmas koormamine		



Tulemused			
	Tegelik	Norm	Hinnang
σ_{1max} [MN/m²]	0,4999		
E_{v1} [MN/m²]	**64,93**		
E_{v2} [MN/m²]	**110,75**	puudub	pole arvutatav
E_{v2}/E_{v1}:	**1,706**	puudub	pole arvutatav
E_{v3} [MN/m²]			
E_{v3}/E_{v1}:			
Westergaard'i moodul:	136	MN/m²	
Märkused:			

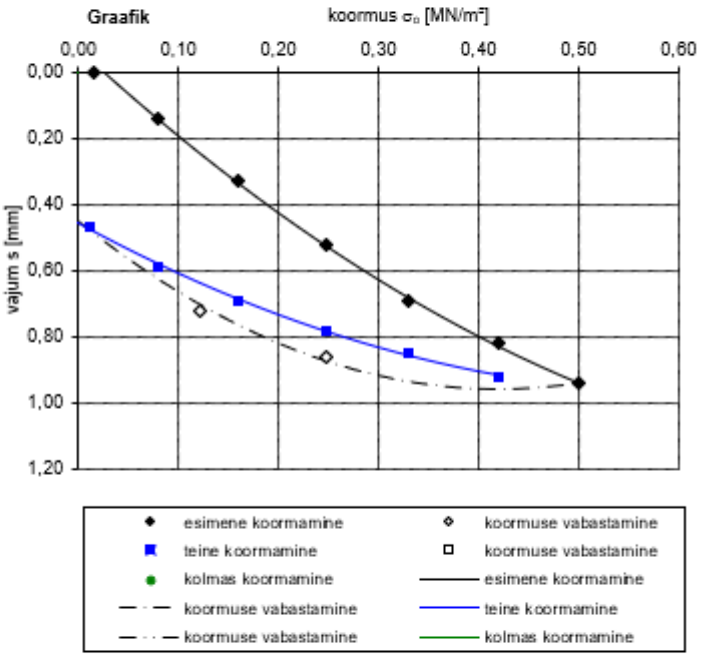
Lisa 7: Plaatkoormuskatse katsearuande väljavõte.

Plaatkoormuskatse (EVS 934:2016-300)

loe andmed

Katsesügavus: Seadme toetuspunkti tasapinnas (h=0)
Kiht: Freespuru
Märkused: -
Ilmastik/temp: Temp +16°C, tuul kuni 8 m/s, märg
Mõõtmised teostas: Simmo Talpas-Taltsepp/Romet Raun
Mõõteseade: Anix GmbH, LVDT vajumi sensor 15mm, jõu sensor 100kN

Nr	Koormus σ_0 [MN/m²]	Vajum s [mm]
esimene koormamine		
1	0,0150	0,00
2	0,0796	0,14
3	0,1596	0,33
4	0,2484	0,52
5	0,3311	0,69
6	0,4193	0,82
7	0,5013	0,94
koormuse vabastamine		
8	0,2489	0,86
9	0,1226	0,72
teine koormamine		
10	0,0119	0,47
11	0,0796	0,59
12	0,1597	0,69
13	0,2487	0,78
14	0,3299	0,85
15	0,4202	0,92
koormuse vabastamine		
kolmas koormamine		



Tulemused			
	Tegelik	Norm	Hinnang
σ_{1max} [MN/m²]	0,5013		
E_{v1} [MN/m²]	111,43		
E_{v2} [MN/m²]	229,03	puudub	pole arvutatav
E_{v2}/E_{v1}:	2,055	puudub	pole arvutatav
E_{v3} [MN/m²]			
E_{v3}/E_{v1}:			
Westergaard'i moodul:	287	MN/m³	
Märkused:			

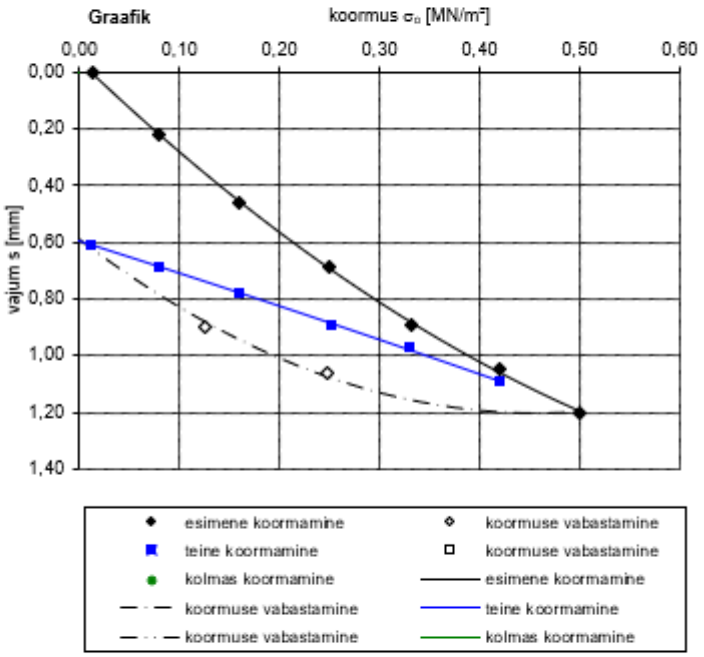
Lisa 8: Plaatkoormuskatse katsearuande väljavõte.

Plaatkoormuskatse (EVS 934:2016-300)

loe andmed

Katsesügavus: Seadme toetuspunkti tasapinnas (h=0)
Kiht: Freespuru
Märkused: -
Ilmastik/temp: Temp +16°C, tuul kuni 8 m/s, märg
Mõõtmised teostas: Simmo Talpas-Taltsepp/Romet Raun
Mõõteseade: Anix GmbH, LVDT vajumi sensor 15mm, jõu sensor 100kN

Nr	Koormus σ_0 [MN/m²]	Vajum s [mm]
esimene koormamine		
1	0,0145	0,00
2	0,0804	0,22
3	0,1606	0,46
4	0,2494	0,69
5	0,3314	0,89
6	0,4197	1,05
7	0,4995	1,20
koormuse vabastamine		
8	0,2489	1,06
9	0,1253	0,90
teine koormamine		
10	0,0121	0,61
11	0,0799	0,69
12	0,1595	0,78
13	0,2529	0,89
14	0,3294	0,97
15	0,4196	1,09
koormuse vabastamine		
kolmas koormamine		



Tulemused			
	Tegelik	Norm	Hinnang
σ_{1max} [MN/m²]	0,4995		
E_{v1} [MN/m²]	**90,98**		
E_{v2} [MN/m²]	**191,72**	puudub	pole arvutatav
E_{v2}/E_{v1}:	**2,107**	puudub	pole arvutatav
E_{v3} [MN/m²]			
E_{v3}/E_{v1}:			
Westergaard'i moodul:	183	MN/m²	
Märkused:			

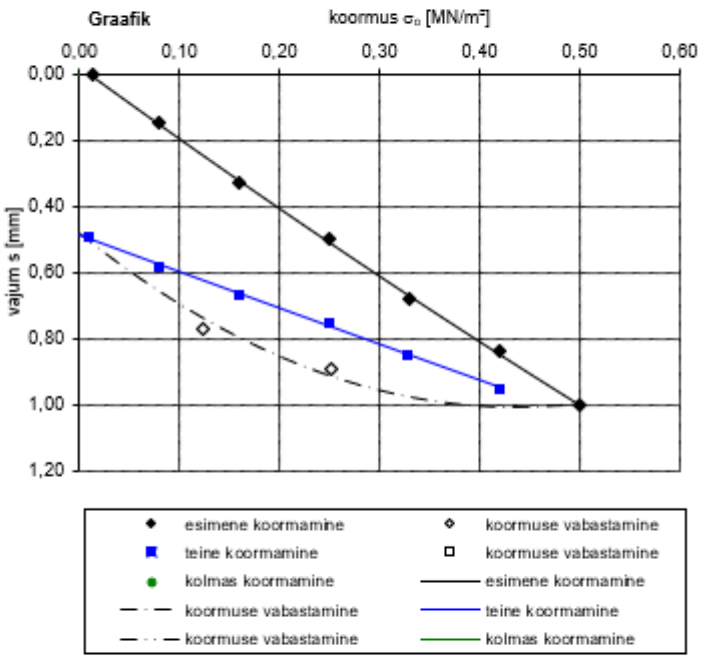
Lisa 9: Plaatkoormuskatse katsearuande väljavõte.

Plaatkoormuskatse (EVS 934:2016-300)

Ioe andmed

Katsesügavus: Seadme toetuspunkti tasapinnas (h=0)
Kiht: Freespuru
Märkused: -
Ilmastik/temp: Temp +16°C, tuul kuni 8 m/s, märg
Mõõtmised teostas: Simmo Talpas-Taltsepp/Romet Raun
Mõõteseade: Anix GmbH, LVDT vajumi sensor 15mm, jõu sensor 100kN

Nr	Koormus σ_0 [MN/m²]	Vajum s [mm]
esimene koormamine		
1	0,0139	0,00
2	0,0793	0,15
3	0,1595	0,33
4	0,2510	0,50
5	0,3296	0,68
6	0,4198	0,84
7	0,4998	1,00
koormuse vabastamine		
8	0,2511	0,89
9	0,1244	0,77
teine koormamine		
10	0,0104	0,49
11	0,0797	0,58
12	0,1597	0,67
13	0,2501	0,75
14	0,3289	0,85
15	0,4195	0,95
koormuse vabastamine		
kolmas koormamine		



Tulemused			
	Tegelik	Norm	Hinnang
σ_{1max} [MN/m²]	0,4998		
E_{v1} [MN/m²]	**110,47**		
E_{v2} [MN/m²]	**204,14**	puudub	pole arvutatav
E_{v2}/E_{v1}:	**1,848**	puudub	pole arvutatav
E_{v3} [MN/m²]			
E_{v3}/E_{v1}:			
Westergaard'i moodul:	226	MN/m³	
Märkused:			

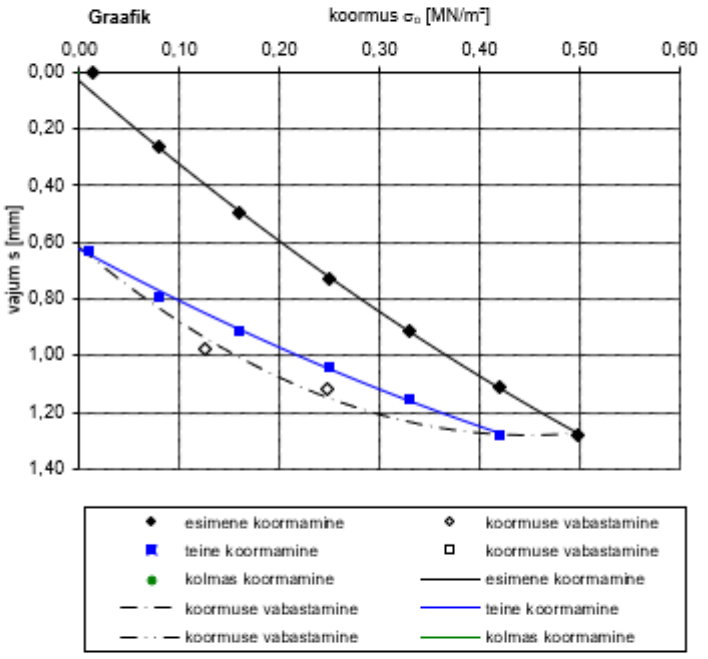
Lisa 10: Plaatkoormuskatse katsearuande väljavõte.

Plaatkoormuskatse (EVS 934:2016-300)

loe andmed

Katsesügavus: Seadme toetuspunkti tasapinnas (h=0)
Kiht: Freespuru
Märkused: -
Ilmastik/temp: Temp +16°C, tuul kuni 8 m/s, märg
Mõõtmised teostas: Simmo Talpas-Taltsepp/Romet Raun
Mõõteseade: Anix GmbH, LVDT vajumi sensor 15mm, jõu sensor 100kN

Nr	Koormus σ_0 [MN/m²]	Vajum s [mm]
esimene koormamine		
1	0,0137	0,00
2	0,0792	0,26
3	0,1608	0,50
4	0,2494	0,73
5	0,3304	0,91
6	0,4212	1,11
7	0,4978	1,28
koormuse vabastamine		
8	0,2485	1,12
9	0,1252	0,98
teine koormamine		
10	0,0098	0,63
11	0,0795	0,79
12	0,1602	0,91
13	0,2507	1,04
14	0,3298	1,15
15	0,4201	1,28
koormuse vabastamine		
kolmas koormamine		



Tulemused			
	Tegelik	Norm	Hinnang
σ_{1max} [MN/m²]	0,4978		
E_{v1} [MN/m²]	**90,18**		
E_{v2} [MN/m²]	**152,33**	puudub	pole arvutatav
E_{v2}/E_{v1}:	**1,689**	puudub	pole arvutatav
E_{v3} [MN/m²]			
E_{v3}/E_{v1}:			
Westergaard'i moodul:	181	MN/m³	
Märkused:			

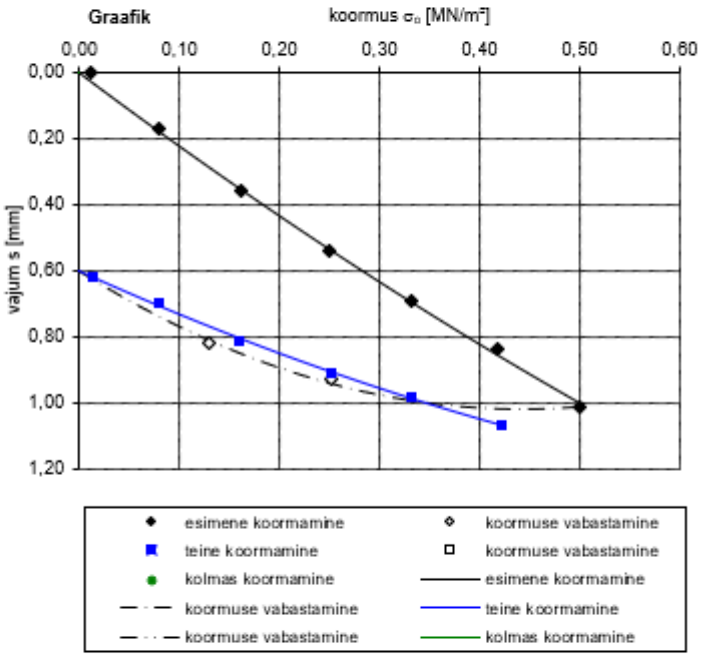
Lisa 11: Plaatkoormuskatse katsearuande väljavõte.

Plaatkoormuskatse (EVS 934:2016-300)

loe andmed

Katsesügavus: Seadme toetuspunkti tasapinnas (h=0)
Kiht: Freespuru
Märkused: -
Ilmastik/temp: Temp +16°C, tuul kuni 8 m/s, märg
Mõõtmised teostas: Simmo Talpas-Taltsepp/Romet Raun
Mõõteseade: Anix GmbH, LVDT vajumi sensor 15mm, jõu sensor 100kN

Nr	Koormus σ_0 [MN/m²]	Vajum s [mm]
esimene koormamine		
1	0,0122	0,00
2	0,0798	0,17
3	0,1611	0,36
4	0,2496	0,54
5	0,3316	0,69
6	0,4181	0,84
7	0,5009	1,01
koormuse vabastamine		
8	0,2519	0,93
9	0,1292	0,82
teine koormamine		
10	0,0130	0,62
11	0,0794	0,70
12	0,1609	0,81
13	0,2519	0,91
14	0,3314	0,98
15	0,4214	1,07
koormuse vabastamine		
kolmas koormamine		

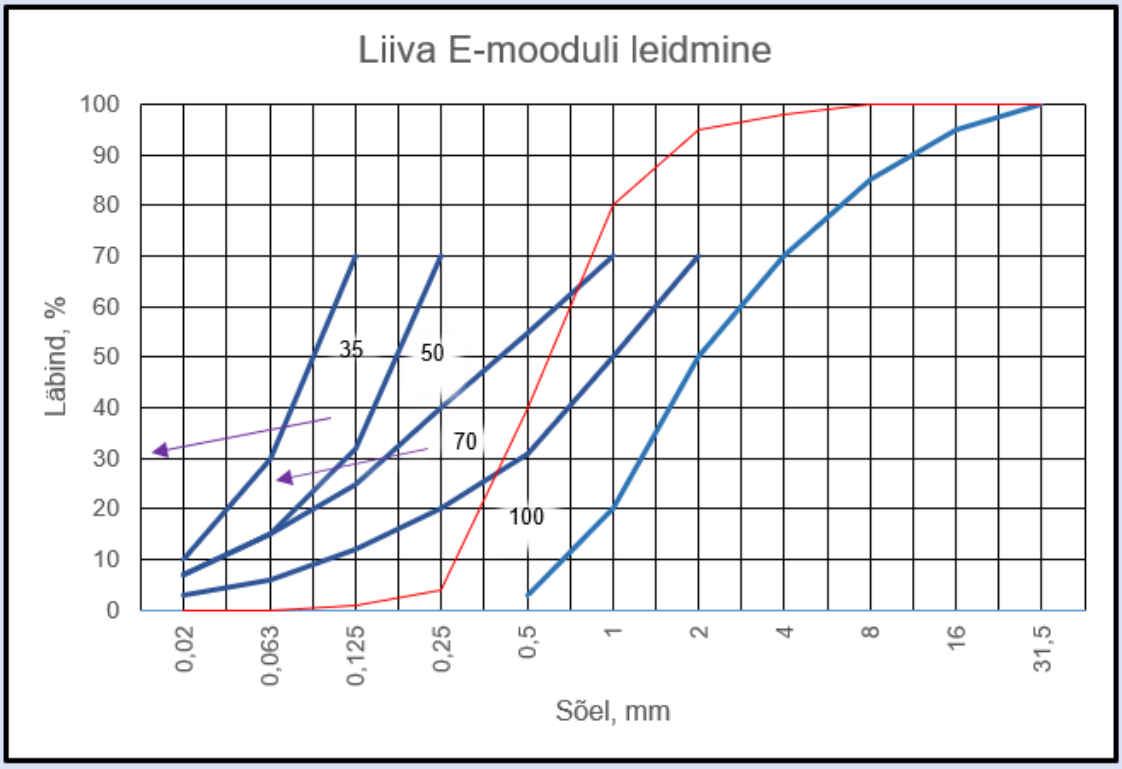


Tulemused			
	Tegelik	Norm	Hinnang
σ_{1max} [MN/m²]	0,5009		
E_{v1} [MN/m²]	**112,47**		
E_{v2} [MN/m²]	**212,61**	puudub	pole arvutatav
E_{v2}/E_{v1}:	**1,890**	puudub	pole arvutatav
E_{v3} [MN/m²]			
E_{v3}/E_{v1}:			
Westergaard'i moodul:	235	MN/m²	
Märkused:			

Lisa 12: Soome transpordiameti juhendi 2018/38 alusel koostatud Excel abivahend sõelkõvera alusel elastsusmooduli määramiseks.

Liiva E-mooduli leidmine

sõel (mm)	läbind %
0,02	0
0,063	0
0,125	1
0,25	4
0,5	40
1	80
2	95
4	98
8	100
16	100
31,5	100

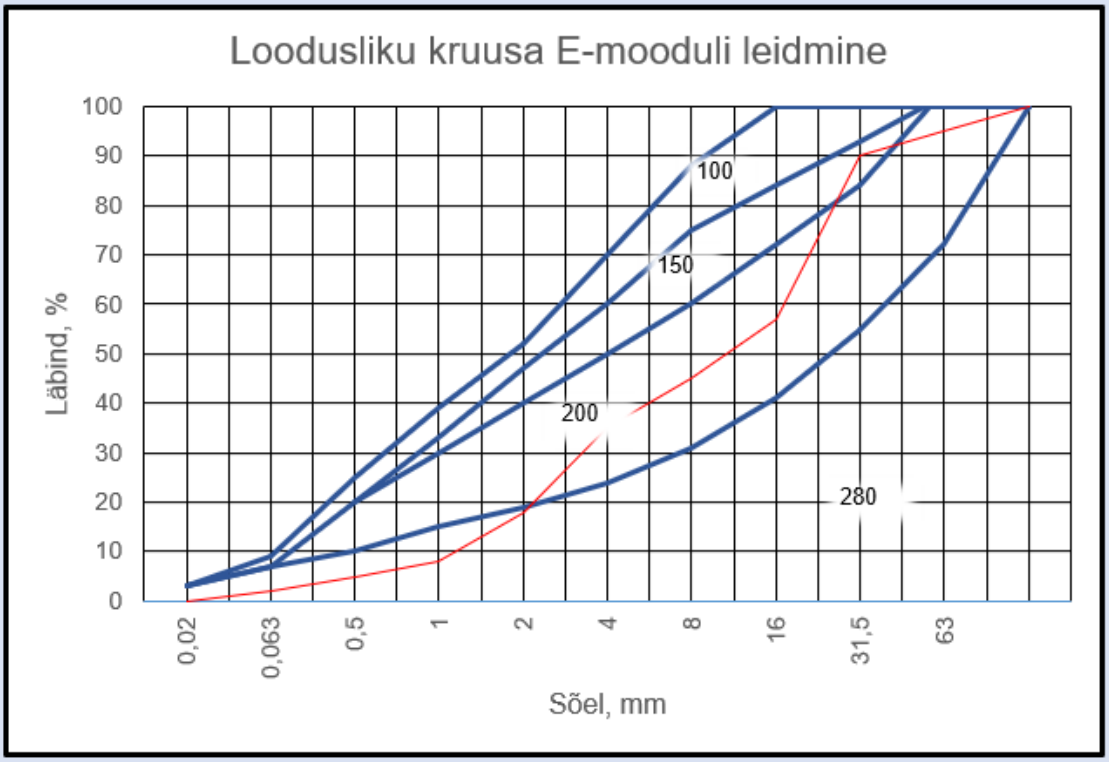


Lisa 13: Soome transpordiameti juhend 2018/38 alusel koostatud Excel programm sõelkõvera alusel elastsusmooduli määramiseks.

Loodusliku kruusa E-mooduli leidmine

sõel (mm)	läbind %
0,02	0
0,063	2
0,5	8
1	18
2	35
4	45
8	57
16	90
31,5	95
63	100

E-moodul: **150**

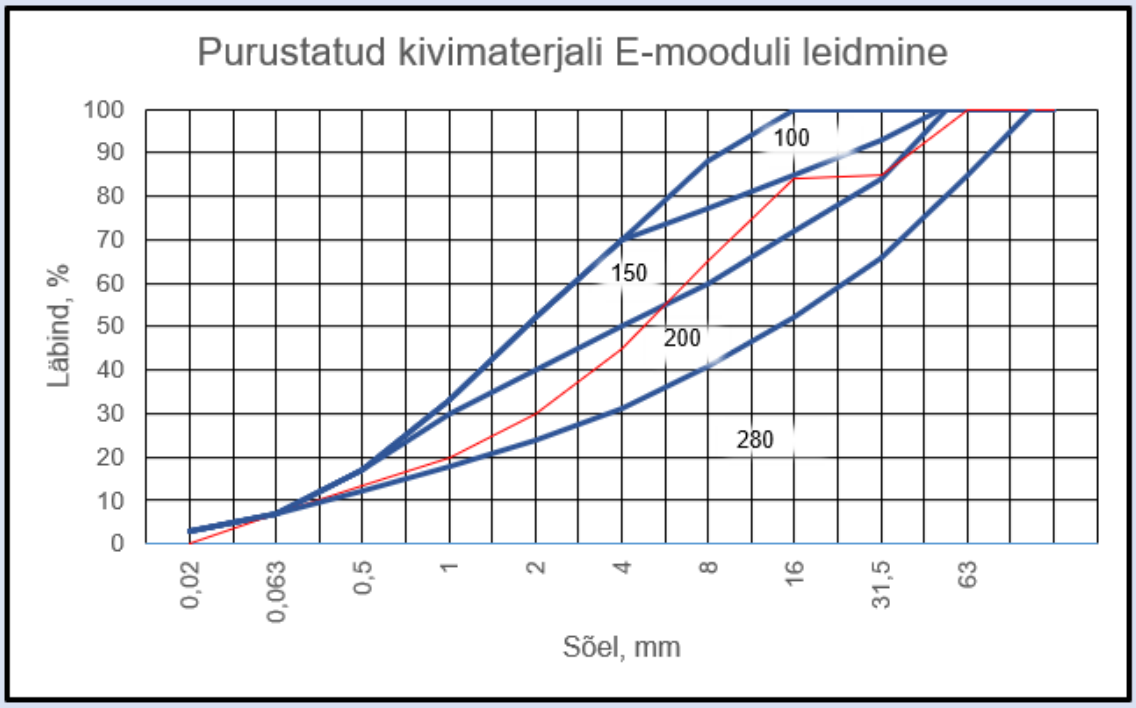


Lisa 14: Soome transpordiameti juhend 2018/38 alusel koostatud Excel programm sõelkõvera alusel killustiku elastsusmooduli määramiseks.

Purustatud kivimaterjali E-mooduli leidmine

sõel (mm)	läbind %
0,02	0
0,063	7
0,5	20
1	30
2	45
4	65
8	84
16	85
31,5	95
63	100

E-moodul: **150**



Lisa 15: Tm_105 uMSa ühtlaseteralise keskliiv.

1. Terastikuline koostis ja peenosiste sisaldus / EVS-EN 933-1

Sõel, mm	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6,3
Läbind, %	0,7	6	38	81	94	98	99	100