

**Teekatendite erinevate dimensioneerimismetoodikate võrdlus.
Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks
katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.**

LÕPPARUANNE

Juhatuse esimees

Hillar Varik

Arendusdirektor:

Marek Truu

Maaradari ja geoloogia projektijuht:

Taavi Tõnts

Spetsialist:

Mattias Olep

Tallinn 2002

1 Sissejuhatus

Maanteeametis ja projekteerimisfirmades on päevakorda kerkinud Eestis elastsete katendite dimensioneerimiseks sobiva arvutusmetoodika valiku küsimus. Praegu kasutatakse katendite dimensioneerimiseks valdavalt VSN 46-83 "Elastsete teekatendite projekteerimise juhendil" põhinevat arvutusmetoodikat. Praktika on näidanud, et see metoodika on väga hea rekonstruktsiooni või uusehituste katendite projekteerimisel. Katete taastusremondi korral olemasolevate maantee katendikihid kulgevad reeglina ebaühtlaselt ning ka kihtide omadused muutuvad suurtes piirides, mistõttu on vaja olemasoleva katendi kandevõimet hinnata paljudes kohtades. Selleks on Eestis kaasaegsed teekatendite seisukorra hindamise vahendid, nagu dünaamiline koormusseade – FWD Dynatest 8000 ja maaradar – GPR, mille abil mõõdetavaid andmeid ei kasutata täiel määral ega osata täpselt võrrelda saadud tulemusi VSN 46-83 metoodikaga arvutatuga. Euroopa riikides ja USA-s on kasutusel erinevad teekatendite projekteerimise metoodikad, mis arvestavad erinevalt liikluskoormust, katendi materjalide ja pinnase tugevusomadusi ning ka liiklussagedust. Käesoleval ajal puudub Maanteeametil piisav ülevaade eri riikides kasutatavatest katendite dimensioneerimise meetoditest.

Uurimistöö sisu ja eesmärk

- Võrrelda erinevaid teekatendite dimensioneerimise metoodikaid, teostada võrdlevad arvutused samade lähteandmetega, erinevate tulemuste puhul selgitada erinevuste põhjused.
- Leida sobiv metoodika FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja projekteeritava katendi dimensioneerimiseks. Leida arvutusmetoodika FWD mõõtmistulemuste alusel katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks nii, et saadud tulemused oleksid võrreldavad VSN 46-83 metoodikaga arvutatuga.
- Hinnata Eestis kasutatavate teedehitusmaterjalide tugevuskarakteristikute (määratud VSN 46-83 metoodikaga) sobivust kasutamiseks teiste riikide dimensioneerimismetoodikates, mittesobivuse korral leida põhjused.
- Hinnata VSN 46-83-e sobivust võrreldes teiste riikide arvutusmetoodikatega.
- Teha konkreetsed ettepanekud täiendavate uuringute teostamiseks, mis on vajalikud teekatendite sobiva dimensioneerimismetoodika kasutusele võtmiseks Eestis ning selleks vajaliku andmebaasi (liikluskoormus ja materjalide ja pinnaste omadused) loomiseks.

2 Sisukord

1	Sissejuhatus	2
2	Sisukord.....	3
3	Kasutatud lühendid.....	4
4	Ülevaade teekatendite dimensioneerimismetoodikatest.....	5
4.1	Kulude optimeerimise põhimõte	5
4.2	Ülevaade teistes riikides kasutatavatest metoodikatest.....	7
5	Dimensioneerimisprogrammide võrdlus	14
5.1	Tagasiarvutusprogrammide võrdlus	14
5.2	FWD-d kasutatavad dimensioneerimisprogrammid - ELMOD	15
6	Arvutusnäited	17
6.1	Arvutuste lähteandmed.....	17
6.2	Arvutusnäide 1	18
6.3	Arvutusnäide 2	22
6.4	Arvutusnäide 3	24
6.5	Arvutusnäide 4	25
6.6	Arvutusnäited VSN ja DELSAN'ga	27
7	FWD	30
7.1	FWD-põhiste e-moodulite kasutatavus VSN metoodikas.....	30
7.2	Üldist FWD kasutamisest.....	34
7.3	Tagasiarvutusmeetod.....	34
8	Elastsetes katendites kasutatavate materjalide omadused.....	39
8.1	Elastsetes katendites kasutatavate materjalide omadused (COST336).....	39
8.2	Eesti ja Euroopa tugevuskarakteristikute võrdlus	42
8.3	FWD ja VSN-põhiste e-moodulite erinevuste põhjused	44
8.4	VSN 46-83 võrdlus teiste riikide dimensioneerimismetoodikatega.....	45
8.5	FWD-ELMOD meetodi "hüved ja puudused"	54
9	Kokkuvõte	56
10	Järeldused ja ettepanekud täiendavate uuringute teostamiseks.....	57
11	Kasutatud allikad.....	59
	LISAD	60
	LISA 1. Kihtide Poissoni teguri, kontaktsurve ja koormusraadiuse erinevustest põhjustatud e-mooduli üleminekutegurite leidmine.....	61
	LISA 2. DELSAN valemid	63
	LISA 3. Väljavõte Saksa Teede dimensioneerimise kataloogist.....	64
	LISA 4. ELMOD tarkvara parameetrid.....	70
	LISA 5. Odemarki ja VSN paigutiste üleminekukordajad.....	73
	LISA 6. Tagasiarvutusprogrammide nimekiri	74
	LISA 7. DELSAN - konstruktsioonide andmed ja tõmbepinged.....	75
	LISA 8. Arvutusnäited – VSN + ELMOD.....	78
	Konstruktsioon I.....	78
	Konstruktsioon II.....	80
	LISA 9. VSN ja DELSAN valemid	82
	Tõmbepingete valemid.....	82
	Paigutiste valemid	83
	LISA 10. Läti SEGA tarkvara.	84
	LISA 11. Summary	85

3 Kasutatud lühendid

Käesolevas töös on kasutatud järgmisi lühendeid:

VSN	"Instruktsija po proektirovaniju doroznõh odezd nestestkovo tipa" ehk endises Nõukogude Liidus ja praeguses Eestis kehtiv arvutusmetoodika.
COST	European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research - EL valitsuste vaheline koostööprogramm, mille uurimustulemused on soovituslikud.
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials - riiklik organisatsioon, mis on ühtlasi välja töötanud oma teede dimensioneerimise metoodika.
HDM	Highway Development and Management Model - Maailmapanga väljatöötatud teedehoiu korraldamise mudel.
FWD	Falling Weight Deflectometer - ehk langeva raskusega koormamiseade/vajumimõõtja, millega mõõdetakse langeva raskuse poolt tekitatud katte läbipainet.
ELMOD	Akronüüm sõnadest Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design, Taanis väljatöötatud tee tarindikihtide e-moodulite ja ülekatte arvutamise tarkvara.
DELSAN	Taanis väljatöötatud Odemarki meetodil töötav tarkvara
GPR	Ground Penetrating Radar- ehk maaradar- mõõdab (radariga analoogselt) tee katendi kihte.
PSI	Pavement Serviceability Indeks ehk katendi kasutamiskõlblikkuse indeks.
SV	SV- on Slope Variance ehk tasasus mõõdetud üle ühe jala (1 jalg= 30,48 cm)
SNP	Structural Number (SNP- antud juhul logaritmiline funktsioon FWD katsel otse langeva raskuse all olevast läbipaindest
CBR	Sidumata kihtide test, kus surutakse 3 ruuttolli ehk 1935mm ² pindalaga silinder testitavasse materjali kiirusega 0,05 tolli ehk 1,3mm minutis. Vajalik jõud mõõdetakse iga 2 minuti järel ja kasutatakse saadud arvudest suurimat. Saadud tulemust võrreldakse killustiku tulemusega ja saadud suhet nimetatakse CBR'iks.
NOWOD	VSN 46-83'el baseeruv Lätis väljatöötatud katendite dimensioneerimistarkvara.
VSN-Excel versioon 0.9	Teede Tehnokeskuses VSN-baasil väljatöötatud katendite dimensioneerimistarkvara.

4 Ülevaade teekatendite dimensioneerimismetoodikatest

4.1 Kulude optimeerimise põhimõte

Teehoiu korraldamise üldised eesmärgid on teede ehitamisel ja kasutamisel madalaim summaarsete kulude tase ühiskonnale. Peamiste kuludena ühiskonnale käsitletakse nii tee kasutaja kui tee haldaja otsekulusid aga ka kaudseid mõjusid ühiskonnale või teatud regioonile (nt. mõjud keskkonnale, majanduse elavdamine...), mis sõltuvad paljudest teguritest, nt. liikluse hulgast ja koosseisust, sõitjatest (teekasutajad), samuti valitud projektlahendusest, sh. projekteeritud katte vastupidavusest (ekspluatatsioonieast) jne. Just projekteerimise ülesanne on leida optimaalne e. ökonoomseim tehniline lahendus saavutamaks teatud ajaperioodiks teatud nõuetele vastav tee seisund. Üheks kulude optimeerimise mudeliks on HDM.

HDM ei ole oma olemuselt küll dimensioneerimismetoodika kuid alustuseks annab väga hea ülevaate teede projekteerimise, ehitamise, haldamise, remondi, taastamise ja kasutamisega seotud aspektide kompleksse käsitlemise tõttu – püüdes leida muuhulgas otsest seost dimensioneeritava konstruktsiooni ja tee vastupidavuse vahel. See omakorda tähendab seost tee seisukorraga ja sealt edasi teekasutajakuludega ning tee renoveerimiskuludega. Ühesõnaga – kogu süsteem on viidud võrreldavatele alustele, kusjuures lõplik võrdlus on võimalik teha juba ühtsete parameetrite – diskonteeritud tulude-kulude alusel.

Kui tala või samm on loodud kandma kindlat koormust, mille mitteületamisel ta kunagi ei lagune, siis tee mõte on pakkuda teatud tüüpi “kasutuskõlblikkust” nii teekasutajatele kui keskkonnale minimaalsete ehitus-, kasutus- ja taastuskuludega.

Maailmapanga HDM III [2] defineeris kasutamismugavuse majanduslikes terminites. Pankureid huvitas, kas uute teede ehitamine või vanade renoveerimine tasub ennast samal määral ära, et see kataks tehtud kulutused. Tasuvuse arvutamiseks pidi loodama seos kasutaja kulude ja katendi seisukorra vahel. Kõige olulisimaks karakteristikuks osutus tasasus, mida mõõdetakse rahvusvaheliste standardite kohaselt IRI (International Roughness Index - tasasusindeks) järgi. Lähtudes tasasusest saab arvutada VOC'i (Vehicle Operation Costs - sõidukite kasutuskulud) erinevate sõidukite tarvis. Maailmapank on tee tulevase seisukorra arvestamiseks tuletanud hulga erinevaid valemeid, mis kasutavad erinevaid tee seisukorra näitajaid nagu pragude hulk, võrkpragude pindala, murenemise määr, aukude ja roobaste hulk ning mõõtmised.

Uuem arvutusmudel - HDM 4 on välja töötatud ISOHDM (International Study of Highway Development and Management Tools) poolt, rahvusvahelist uurimisprogrammi toetasid mitmed mõjukad teede- ja finantsasutused. Olles oma ülesehituselt väga laialivalgus ja detailidesselaskuv on selle kasutuselevõtt olnud komplitseeritud ja esialgu arvestataval määral rahvusvahelist kasutust leidnud ei ole. Siiski, tegu on väga tõsise katsega tõsta strateegiliste tehnilismajanduslike ja teedevõrgu mudeluuringute taset võimaldades edaspidi vajalike arendus- ja juurutusprotsesside teostatuse järel kasutada mudeleid ühiskonnakulude optimeerimiseks kogu vaadeldaval teedevõrgul. Tänu

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

suhteliselt edukalt arenenud Maanteeregistrile ja PMS-ile Eestis on meil loodud esimesed eeldused niisuguse süsteemi reaalseks kasutuselevõtuks lähitulevikus.

Paljudele teedeinseneridele ei ole uue tee projekteerimine või vana renoveerimine mitte kulude optimeerimisülesanne vaid puhtalt vastupidavuse küsimus. Projekteerimise aluseks on katendi "töötamisiga". Näiteks pärast 20 aastat ei tohi ületada pragunemine 10% ja roobaste teke peaks olema alla 10mm.

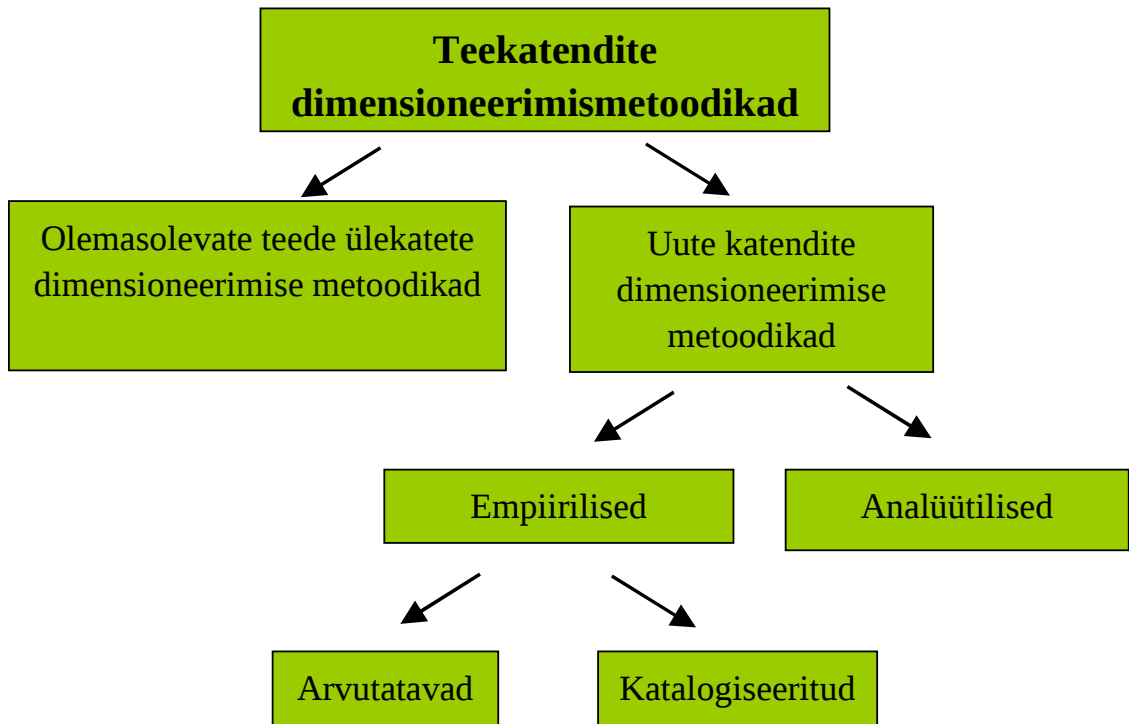
Enamus Lääne metoodikatest lähtuvadki lihtsustatud lähenemise viisist, kus tee seisukord on tinglikult konstantne suurus ja arvutatav mehaanilis-füüsikaliste parameetrite kaudu. Niisuguste arvutused tuginevad valdavalt Odemark-Boussinesq võrranditel. Samas pole ühtegi puhtalt matemaatilist või puhtalt analüütilist meetodit, vaid tegu on kõikidel juhtudel mingi kombinatsiooniga neist.

Teekatendite dimensioneerimisest rääkides mõistame selle all siiski mitte ainult katet, vaid kogu teekonstruktsiooni, seda eriti juhul kui käsitleme olemasolevate konstruktsioonidega seonduvaid dimensioneerimisülesandeid, kus tegelikud katendi ja mulde omadused sageli erinevad oluliselt sellest kuidas me neid idealistlikkusele kalduvates arvutustes käsitleme.

Maailmas on välja arendatud suur hulk erinevaid teekatendite dimensioneerimise metoodikaid. Oma eesmärgi järgi jagunevad need:

- Uute katendite dimensioneerimise metoodikateks
- Olevate teede ülekatete dimensioneerimise metoodikateks

Käesolevas töös on põhitähelepanu osutatud just empiirilistele, Odemark-Boussinesq võrranditel baseeruvatele meetoditele, mis omakorda võiks jagada vahetult arvutavateks ja katalogiseeritud meetoditeks. Viimastes on tee tüüpkonstruktsioonid jaotatud eri tunnuste (tee klass, liikluskoormus, kliimapiirkond jne) järgi ning konstruktori ülesanne on valida sobivaim. Arvutavad meetodid annavad konstruktsiooni valikul vabamad käed ning võimaldavad paremini ära kasutada tüüpilistest erinevate kohalike materjalide omadusi, andes teoreetilise võimaluse täpsemaks konstrueerimiseks. Siiski, ka siin tuleb arvestada, et arvutustes algparameetritena käsitletavat andmed on üldjuhul kokkuleppelised. Teekatendite dimensioneerimismetoodikate klassifikatsioon on toodud joonisel 1.



Joonis 1. Teekatendite dimensioneerimismetoodikate klassifitseerimine

Ka olemasolevate teede uurimismeetodid võiks tinglikult jagada nii analüütilistest kui empiirilistest seostest lähtuvateks ja enamikel juhtudel võib neid pidada pigem uurimiskui dimensioneerimismeetoditeks. Levinuim sellistest meetoditest on Odemark Boussinesq võrranditel põhinev tagasiarvutusmeetod, mida kasutab valdav enamus olemasolevate teede uurimismeetoditest.

Edasistes peatükkides on erinevaid uurimis- ja dimensioneerimismetoodikaid vaadeldud riikide, vastavate arvutusprogrammide ja nendega tehtud arvutusnäidete kaudu. Samuti on põhjalikumalt selgitatud tagasiarvutusmeetodi olemust toomaks, välja erinevate meetodite täiesti erinev otstarve ja suunitlus ning selgitada, miks mõned meetodid ei ole omavahel isegi mitte konkureerivad.

4.2 Ülevaade teistes riikides kasutatavatest metoodikatest

Käesoleva ülevaate tegemisel on vaadeldud Taani, Läti, Holland, Soome, Saksamaa, Rootsi, Prantsusmaa ja USA kasutatavat metoodikat. Enamus mainitud riikidest kasutavad kohalikke nn. kombineeritud e. segametoodikaid.

4.2.1 Taani

Kõige selgem ülevaade on Taani teede dimensioneerimismetoodikatest, kuna just Taani juhtivate teedeuurijatega oli käesoleva töö tegemisel kõige tihedam koostöö. Üldiselt on Taani ka kogu tagasiarvutusmeetodil baseeruva uurimuse osas maailmas üks juhtivaid riike – ka kaasajal enimkasutatav langeva raskuse aparaat töötati välja just Taanis ning

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

enamus äratoodud kommentaare ongi pärit kohtumisest FWD meililisti juhi Ole Fog'iga (Taani Teede Direktoraat ja Taani Teedeinstituut). Samuti on selles uurimustöös käsitletavatest tarkvaradest kaks väljatöötatud Taanis. Kuna nendest kahest programmist on rahvusvahelist tunnustust pälvinud vaid ELMOD, mida kasutatakse Hiinast USA'ni, on pööratud enamus tähelepanu just sellele programmile. Programmi algse looja Per Ullidtz'iga, jäi kontakt tema hõivatusse tõttu küll napiks, kuid selle eest sai kasutada õige mitut tema kirjutatud raamatut ja uurimustööd [9] lisaks tema teiste kaastöötajate kommentaaridele.

Taani elastsete teekatendite dimensioneerimismetoodika vaatab katendit kui lineaarset paljukihiulist süsteemi, milles materjale iseloomustavad Young'i e-moodul ja Poissoni tegur v. Kihtide vahel toimivad hõõrdejõud. Kõik asfaldikihid võetakse arvesse ühe ekvivalentse kihina. Kõikide kihtide Poissoni tegur on 0,35. Asfaldikihtide elastsusmoodulid vastavad temperatuurile +25°C ja nende suurus varieerub vastavalt kihi otstarbele ning (selles kasutatud) bituumeni viskoossusele.

Olgu toodud läbisegi mõned Roskildest kogutud mõtted Taanis kasutatava kohta. Teekatendite projekteerimine on Taanis seni riiklikult korraldatud. Taani riik määrab võistupakkumisel algtingimusena konstruktsiooni ja lahtiseks jääb vaid materjalide valik. Riiklik uute katendite projekteerimine toimub Taani Teedeinstituudis väljatöötatud ning võrdlemisi kaasaegne (Windowsi keskkonnas) MS Excelil baseeruva programmiga DELSAN. Lähiaastatel ilmselt minnakse üldisele enampakkumisele, kus kogu projekteerimine jääb erakätesse (nagu meil). Taanis külmakerkeid reeglina ei esine, kuid kui avastatakse, et on kasutatud külmaohtlikke materjale – ehk mis võivad öökülma ajal jääda, siis üldjuhul seda teed ei remondita, vaid rekonstrueeritakse korralike materjalidega. Samuti on sagedane olnud töö kehva kvaliteet, mistõttu kihid ei vasta projektile – näiteks on muldes leitud kasvupinnase kihte - ka sellisel juhul ehitatakse kogu konstruktsioon uuesti. Mullete miinimumkõrguseks Taanis on 70cm. Tsementstabiliseerimist ei ole suurt kasutatud, kuid 70ndatel, mil see oli populaarsem, esines hulganisti probleeme stabiliseeritud kihi liiga suure jäikusega - tekkisid temperatuuripraod, mis peegeldusid ka katte pinnale. Puuraugud tehakse reeglina ainult läbi (asfaldist) kattekihi ja seda 300m intervalliga – sügavamaid puurauke tehakse märksa harvem, kuna need on kallimad. Nii FWD, puuraukude kui maaradari testide tiheduses ei ole siiski täielikku üksmeelt ega ka loogikat - erinevad koolkonnad tahavad erinevaid asju.

4.2.2 Läti

Naaberriigi kohta saadud informatsiooni vahendajaks oli Läti Maanteeameti spetsialist Janis Barbars, kellega oli käesoleva töö tegemisel samuti väga hea kontakt ja kellega kohtuti Riias.

Lätis kasutatakse AASHTO protseduuri (mis kasutab subjektiivset näitajat: PSI – Present Servicability Index) mis kohandati Läti Tehnikaülikooli professor Deternis Dzenis'e poolt. Läti teedeehitajad vahel siiski kasutavad veel vana nõukogude VSN 46-83 metoodikat kohapeal väljatöötatud NOWOD tarkvara põhjal. 1999 a. tehti Lätis uurimustöö erinevate katendite dimensioneerimise metoodikate kohta. Viimaste hulka

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmis-
tulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

kuulus Shelli, NOAH ja Läti AASHTO versioon. Kohalikud projekteerijad kolmest erinevast firmast pidid andma hinnangu igale pakatile.

FWD mõõtmiste kohta on Läti teedespetsialistide seisukoht, et info arvuti andmebaasides on mõttetu, kuna puudub võimalus saada adekvaatset informatsiooni kihtide paksuste kohta igas FWD-mõõtepunktis. Olukord oleks parem, kui saaks kasutada maaradari infot. Seetõttu peeti parimaks lahenduseks Lätis traditsiooniliselt kasutuses olnud sügavate puuraukude kasutamist, saamaks detailset informatsiooni kihtide paksuste ja niiskuse sisalduste kohta. Lisaks oli FWD puhul vajalik arvestada aastaegade erinevust. Nõrgim kandevõime on katendil kevadsula ajal, mil mulle on veest üleujutatud.

Riia Tehnikaülikool on arendanud tarkvara spetsiaalselt Läti teede tarvis (SEGA). Fakti, et SEGAt saab kasutada muutmata kujul kohe Läti teedeprojekteerimises, loeti selle tarkvara põhiliseks eeliseks. Põhiliseks puuduseks loeti seda, et programm töötab DOSi baasil ja peab olema veel üle viidud Windowsi keskkonda. Samuti on programmis kasutamata jäänud mitmed konstruktiivsed andmed.

Shell Pavement Design Method - SPDM programm on väga sobilik olemasolevate teede ülekatete arvutamiseks kui ka taastusremondiks. Üks põhilisi eeliseid on selle kasutatavus roobaste tekkimise või asfaldikihi kandevõime kao korral. SPDM võimaldab arvutada jäävaid deformatsioone ja vajalikul määral arvutada roopaid. Vaatamata sellele ei ole võimalik määrata kihtide paksusi, need on programmis eelduseks.

NYNÄS - NOAH: NOAH tarkvara võib kasutada väga laias ulatuses erinevates projekteerimise etappides. Programmi põhieeliseks on see, et seda saab kasutada lisatarkvarana teiste programmide juures. Näiteks saab seda kasutada katendi tugevdamise arvutustes.

Läti uuringu tulemusena võib tuua välja hulk järeldusi ja soovitusi. Need on kokku võetud allpool:

Kuna Läti teede konstruktsiooni tüübid erinevad Läänes kasutatavatest konstruktsioonidest, siis ei ole võimalik kasutada Shelli ja NYNÄSi tarkvara otseselt kohalikes tingimustes. Selle võimaldamiseks oleks vajalik ja vältimatu luua uus laiapõhjaline andmebaas. Olles põhiline tööandja, sõltuks valik Läti Maanteeametist ja standardiseerimine mõjutaks kõiki teedehituse osapooli.

Erinevate programmide kasutamine sama katendi arvutusel võimaldab võrrelda ja valida kõige sobivama ja ökonoomsema konstruktsiooni. Seetõttu peaks olema võimalus sisestada kõikidesse programmidesse samad materjalide parameetrid ja standardsed tingimused. Praegune NOWOD ja SEGA aga annavad erinevaid tulemusi, kuna programmid baseeruvad erinevatel standarditel (NOWOD- VSN 46-83 ja SEGA – AASHTO DPS-93). Isegi juhendis "Elastsete katendite projekteerimine" (Riia Tehnikaülikool 1997) on äratoodud mitmeid katendite arvutuse meetodeid. On hädavajalik luua ja ette valmistada ühised Läti standardid bituumeni, AB, asfaldisegude jne omaduste kohta.

Shelli ja NYNÄS'e programmid on esmapilgul väga keerukad ja nad vajavad palju taustainfot ja parameetreid.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

Arvestades suurt vajalikku kogemust teede projekteerimisel ja vajalikku infohulka, mida on vaja aja kulgedes, oleks kõige optimaalsemaks alternatiiviks kasutada Saksamaa rahvusliku teede taastamise ümarlaua poolt loodud teede-konstruktsiooni katalooge. Seejärel see informatsioon sisestada SEGA tarkvarasse.

Ainukesed Saksamaal kasutuses olevad kataloogid arvestavad nii uue konstruktsiooni arvutust kui vana taastamist. Fundamentaalseks reegliks on, et aluspinnase moodul ei oleks väiksem kui 45 MPa.

Kõikide programmide omadusi arvestades jõuti järeldusele:

- Praktikas SPDM võib olla kasutatud roobaste ja jäävate deformatsioonide arvutamiseks, sellegipoolest võib see programm osutada Lätis väga kasutatavaks.
- NYANÄS võib olla kasutatud teiste programmide ülevaatamiseks.
- SEGA võib kasutada pärast täiendusi teede projekteerimisel.

4.2.3 Leedu ja Saksamaa

Leedut ja Saksamaad on käsitletud siin ühiselt, kuna Leedus on üle võetud otseselt Saksa standardid. Lääne-sakslased ehitasid nimelt enne ühinemist kõik teed, mille projekteerimisega oli ületatud, muldest alates täiesti uuesti, kuid nüüd, viimase kümne aasta jooksul, on töötatud välja ka vanade teede renoveerimise metoodika.

Raskeliikluseks loetakse kõiki üle 2,8T raskusi liiklusvahendeid, mis teeb liiklusloenduse väga lihtsaks. Ennustuslikku koormussagedust arvutatakse valemiga:

$$VB=DTV*f_{sv}*f_p*f_1*f_2*f_3,$$

kus DTV- on loendusaegne koormussagedus,

f_{sv} – tegur 1,5 – mis on EU eeskirjade harmoniseeringu konstant.

$f_p=(1+0,01*N)$, kus komaga arv näitab liikluskasvu aastast (1%) ja N- aastaid.

f_1 - rajategur,

f_2 - raja laiuse tegur,

f_3 – tõusutegur (arvestab tee pikikallet).

Arvutatud koormuse järgi määratakse ehitusklassid, mis jagunevad SV – kiirtee ja I- VI klassi teedeks. Vastavalt ehitusklassidele valitakse kataloogist sobilik tüüpkonstruktsioon ning arvutamist ei toimu. Samas on eeskirjad üli-süsteemiseeritud. Fundamentaalseks reegliks on, et aluspinnase moodul ei oleks väiksem kui 45 MPa.

4.2.4 Holland

Hollandis analüüsitakse uue tee ehitamisel tehtud ennustuslikke katte seisukorra hinnanguid võrdluses tegeliku hetkeseisuga. Kui ennustuslik ja tegelik klapiavad, projekteeritakse olemasolevate andmete põhjal ilma lisauuringuteta, ja vastupidisel juhul tehakse lisauuringuid (FWD, puuraugud jne) kuni on selgitatud välja erinevuse põhjused. Seejärel dimensioneeritakse ülekate Odemarki meetodil lähtuvalt uutest andmetest.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

4.2.5 Rootsi

Rootsis on kasutusel SHELL'i dimensioneerimismudel 3 iseärasusega:

- sügavusel >3m teekattepinnast loetakse materjal pooljäigaks ($E = 100\,000$ MPa);
- Poissoni tegur on igal kihil, materjalist sõltumata 0,35;
- Asfaldikihtide E väärtused varieeruvad sesooniti, s.o. sõltuvad arvutuslikust temperatuurist $E=f(T)$ ja mõõdetud e-moodulite väärtused taandatakse arvutuslikule temperatuurile.

4.2.6 Soome

Soome Maanteeametis praegu kehtivad projekteerimismid anti välja 1985. Hetkel on töös normide ülevaatamine, et liikuda analüütilisemate meetodite poole. Momendil baseeruvad Soome projekteerimismid järgnevatel kriteeriumitel:

- 1) Minimaalne külmaohutute kihtide paksus – kontrollimaks külmakindlust (kui mulle on külmaohtlik).
- 2) Maksimaalne konstruktsiooni paigutis (millest tuletatakse kevadsula aegse konstruktsiooni kandevõimet ennustatavale liiklusköormusele). Paigutist mõõdetakse olemasolevate teede puhul FWD katsete käigus, et ennustada liiklusköormuse mõju tee olukorrale, mille põhjal leitakse vajalik tee konstruktsioon.

Mõlemad nõuded peavad olema täidetud. Soome normides mõjutab kõige enam dimensioneerimist tee klass, katendi jäikus ja külmumissügavus, mis sõltub külmumisindeksist (kümne aasta keskmine külmumistundide summa) ja materjali soojusjuhtivus külmumisstaadiumis (kerge-keskmise-raske). Külmumistingimused on kerged - kui pinnasevee horisont on 1 m allapoole lubatavat külmumissügavust, keskmised - kui horisont on kõrgem kui lubatav külmumissügavus ja muldealune pinnas on homogeenne ning rasked - kui pinnasevee horisont on üle lubatava külmumissügavuse ja pinnas on mittehomogeenne. Viimase variandi puhul on tavaline lahendus suurte rändrahnude ja munakivide väljakaevamine - muutmaks pinnast homogeensemaks.

Kandevõimet arvutatakse kahekihilise süsteemina. Kõige esimene arvutus on tehtud kõige alumise kihiga Odemarki meetodil (kasutades pinnase e-moodulit ja kõige alumise kihi e-moodulit ja paksust). Seejärel arvutatakse kandevõime järgmise kihi peal kuni kõige pealmise kihini. Kasutatav Odemarki vörrand on järgmine:

$$E_y = E_A / (((1 - 1 / ((1 + 0,81 * (h/0,15)^2)^{0,5})) * (E_A/E) + 1 / ((1 + 0,81 * (h/0,15)^2 * (E/E_A)^{(2/3)})^{0,5}))),$$

kus E_y = arvutuslik kandevõime kihi "y" peal, MPa
 h = kihi paksus, m
 E_A = kandevõime kihi all, MPa
 E = kihi e-moodul, MPa

Selle valemi kasutamisel on olemas mõned piirangud: maksimaalne sideainega töötlemata kihtide moodul on $6 * E_A$ ning sellisel juhul on kihtide orienteeruvad paksused vahemikus 150...200 mm (juhul, kui kihi paksus on suurem, siis jaotatakse see eraldi

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

kihtidesse). Muudel juhtudel sideainega töötlemata kihtide paksus on vahemikus 200...300 mm. Bituumensideainega töödeldud kihid arvutatakse ühe kihina. Selle valemi E_y arvutuslik kandevõime ja VSN e-üldine on arvutustulemuselt võrreldavad. Keskmiselt on Soomlaste E_y VSNi E- üldisest 5-10% suurem. Kuna see meetod eeldab sisestatavaid elastsusmooduleid, ei saa seda kasutada FWD andmete töötlemisel.

Tagasiarvutuseks kasutatakse Soomes osaliselt veel väljatöötamisel olevat APAS tarkvara. Programmi omapäraks võrreldes teiste tagasiarvutusprogrammidega on selle suur kasutaja poolse sekkumise vajadus, kuna programmi peab sisestama kihtide arvu, paksused, elastsusmoodulid ja Poissoni tegurid. Tarkvara arvutab selliste andmete põhjal teoreetilise katendi läbivajumise ning seejärel võrdleb seda läbivajumit tegelikult FWD'ga mõõdetuga. Seejärel muudetakse kasutaja poolt arvutusandmeid, kuni teoreetiline läbivajum võrdub FWD mõõdetud vajumiga ning mille põhjal saab oletada, et sisestatud kihtide e-moodulid, paksused jne olidki õiged tulemused (mõneti sarnaneb ennustamisega).

Tee kasutusea kulude arvutusi esialgu veel ei tehta, kuid järgmises projekteerimismisnormis rõhutakse ka sellele teemale.

4.2.7 Norra

Norras kasutatakse elastsete teekatendite dimensioneerimisel AASHTO printsiipi, kus igal katendikihil on oma koormusjaotuse koefitsient. Koormusjaotuse koefitsient d arvutatakse nii :

$$d=0,21(E_A)^{0,33},$$

kus

E_A on kihi elastsusmooduli väärtus MPa temperatuuril +25°C ja koormussagedusel 10 Hz.

4.2.8 Prantsusmaa

Kasutusel on kombineeritud meetod [11], mille põhilisteks piirjoonteks oleks:

- mehaanilised meetodid, mille põhjal määratakse konstruktsiooni tüüp ja kasutatavad materjalid (puuraugud).
- laboris teostatud kulumiskatsetuste tulemused, mida rakendatakse Mineri kumulatiivsete kahjustuste hüpoteesi raames.
- ja viimasena informatsioon, mis on saadud tegelike teede vaatlusel.

Igas maakonnas on eraldi standardkonstruktsioonide kataloogid, kus on määratud nii konstruktsioonide tüübid, kui kihtide miinimum - ja maksimumpaksused. Olevate katendite hindamisel kasutatakse FWD ja muid otseselt teelt saadud tulemusi, mille jaoks on olemas kohapeal spetsiaalselt väljatöötatud multifunktsionaalsed masinad nagu CALAO ja SIRANO.

4.2.9 USA

Ameerikas kasutatakse teekatendite dimensioneerimisel struktuuri numbrit (SN-Structural Number). Kõigepealt arvutatakse liiklusohutuse tegur (Safety Level, reeglina 0,95 või 0,90), rajateguri, liikluskoormuse, liikluskoormuse kasvu ja arvutusperioodi kaudu vajalik SN. Seejärel võrreldakse seda tegeliku SN'iga, mis on funktsioon kihtide paksusest, kihi tegurist (mis sõltub materjalist, selle vanusest ja sideainega töötlemata kihtide puhul ka niiskusest) ja drenimistegurist (sideainega töödeldud kihtidel 1,1 ja muidu 1). Vajaliku ja tegeliku struktuuri numbri võrdluseks lahutatakse tegelikust vajalik ning negatiivse tulemuse puhul ei ole kandevõime piisav. Sellisel juhul muudetakse konstruktsiooni kuni vajalik on võrdne või väiksem tegelikust SN'ist. Identset arvutusloogikat esindab ka Lätis väljatöötatud SEGA Exeli põhine tarkvara (Lisa 10).

Ülekatte arvutusel kasutatakse FWD andmeid näiteks ELMOD programmi kaudu. Tarkvara on laialdaselt kasutusel USA's kus on ELMOD'it tootva firma Dynatest International seni suurimad lepingupartnerid.

4.2.10 Venemaa

Venemaal kasutatavate meetodite (nt. VSN) uurimise puuduseks tuleb lugeda tänasel päeval väheseid kontakte Venemaaga ja vähenevat vene keele oskust, mis tingib vene päritolu oskusteabe importi Eestisse. Samal põhjusel ei ole ka päris adekvaatset ülevaadet teistes SRÜ-riikides katendiarvutuste alal toimuvast ning piiratud on meilgi kasutuseloleva VSN 46-83 vaatlemise ja võrdlemisega.

5 Dimensioneerimisprogrammide võrdlus

Eri riikides on välja töötatud sarnastel alustel töötavad, kuid erineva lähenemisega metoodikad ning see ja ka muud põhjused on mõjutanud ka vastavate arvutiseeritud programmide ülesehitust ja loogikat. Käesolevas peatükis on kirjanduse põhjal üldisemalt võrreldud tagasiarvutusprogramme, aga ka toodud näide konkreetse, maailmas enim kasutatud leidnud tagasiarvutusprogrammi – ELMOD kohta. Reeglina ei saa tagasiarvutusprogramme siiski dimensioneerimisprogrammideks nimetada – parimal juhul suudavad nad välja pakkuda ülekatte. Samas on see ka arusaadav, sest olemasolevate katetega seonduv on liiga nüanssiderikas, et sellele üheainsa arvutusmudeliga läheneda. Lisaks, uute katendite projekteerimise poole pealt on vaadeldud teist Taani päritolu arvutusprogrammi – DELSAN ning VSN-põhiseid VSN-Excelit ja CREDO't.

5.1 Tagasiarvutusprogrammide võrdlus

Erinevate tagasiarvutusprogrammide võrdlus on käesolevas töös tehtud kokkuvõttena analoogilisi võrdlusi kajastavate tööde põhjal. Seetõttu ei ole andmed toodud programmide kaupa, vaid on antud ülevaade globaalsest tagasiarvutustarkvarade turust üldiselt. Eestis kasutada olevat tagasiarvutusprogrammi (ELMOD) on eraldi käsitletud edaspidistes peatükkides. Kirjanduse andmetel on siinkohal võrreldud 17 tagasiarvutusprogrammi erinevaid parameetreid ja omadusi üldistavalt. Nendeks on: UEC-SLAB/PAVERS, BAP (LEAD), EVERCALC 5.0, CARE, CANUV, BACKLAY, BOUSDEF, MODCOMP 4, UPED/PEDD, MICHBACK/MFPDS, DAPS, EFROMD2, ELMOD, MODULUS 5.1, SIDMOD, WESDEF ja CLEVERCALC. Programmide koondtabel on toodud lisas 6, kus on näha autorid ja nende kontaktandmed.

Tabel 1. Tagasiarvutusprogrammide võrdlus

Parameeter	Väärtus ja selle jaotus/vahemik
Tarkvara päritolu	USA 7, Euroopa 4, USA+Euroopa 1, Hiina 1 Austraalia 1
Arvutuskeskond	DOS või Windows
Nõutav võimsus	286 – Pentium III
Keel	Inglise 17, Hispaania (alternatiivina 12 juhul), slovakkia ja taani keel (alternatiivina 1 juhul)
Mõõtühikute süsteem	SI 15, Briti 2, SI või Briti 13
Hinnavahemik	Tasuta - \$2.500
Kursused	9 juhul
Suunitlus	Tavakasutaja 14, uurimistöödeks 3, tavakasutuseks ja uurimistöödeks 11 Elastsete ja jäikade katendite arvutamiseks (8), jäikade katendite arvutamiseks (1), staatiline analüüsimeetod (17), maksimaalne andurite hulk (kõikidel juhtudel üle 7), maksimaalne kihtide arv üle (3), küsib oletatavat moodulit (13), mooduli väärtust saab nn. lukustada (13), saab määrata kaljupinnase sügavust (13), tulemuse täpsuse määramine (11 tarkvaral protsentuaalne kokkulangevus, 2 keskmine ruutjuur ja 1 minimaalne absoluutne erinevus)

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

Arvutustulemused	Elastsusmoodul 12 tarkvaral
Väljundi formaat	enamikul ASCII
Seotud kihi temperatuuri standardsele temperatuurile sobitamine	9 tarkvara
Temperatuur	jäigalt määratud 20 C 3 tarkvara, Temperatuur jäigalt määratud 11 C - 1 tarkvara, kasutaja määrata - 13 tarkvara
Tõmbed ja surved leitud tarkvara poolt määratud kohtades	5 tarkvara
Arvutab ülekatet	8 tarkvara
Võimalus teostada FWD arvutusi rohkema kui ühe failiga korraga	9 tarkvara

5.2 FWD-d kasutatavad dimensioneerimisprogrammid - ELMOD

Eeltoodust on näha, et ligi pooled vaadeldud arvutusprogrammid võimaldavad dimensioneerida ka lihtsat ülekatet. Samas pole seegi lihtsalt üldistatav ja dimensioneerimise osa on neil üsna tagasihoidlik. Siinkohal on piiratud vaid ühe sellise vaatlemisega – ELMOD.

ELMOD on taanlase Per Ullidtz (Taani firma Dynatest) poolt välja töötatud maailmas üsna laialt levinud e-moodulite hindamiseks ja vähesel määral lihtsate ülekatete dimensioneerimisel kasutatav arvutusprogramm. Et katendite projekteerimine on Taanis riiklikult korraldatud, on ELMOD'il vaid üks kasutaja – Taani Teede Instituut (DRI-Danish Road Institute). USA's on ELMOD laialdasemalt levinud. ELMOD võimaldab teekonstruktsiooni jagada 3-kihiliseks ning määrata igale kihile vastava paksuse. Seejuures ei ole vajalik iga materjalikihti täpselt eristada, piisav on konstruktsioon jaotada konstruktiivselt erinevateks kihtideks, kus sarnased kihid (nt sideainega töödeldud kihid) on vaadeldavad ühe kihina.

Tsemendi puhul ei ole ELMOD'i väljundifail täiuslik, parem on Excelis e-mooduli graafikud välja joonistada, kontrollides "input linearity't" ehk kas iga punkti e-moodul muutub Hooke seadusega kooskõlas.

FWD kasutamisenormid (COST) alles valmivad. ELMOD võimaldab dimensioneerida ka ülekatte paksuse eeldusel, et olemasoleva konstruktsiooni nõrk kandevõime on tingitud katte ebapiisavast tugevusest.

Üldiselt on ELMOD väga paindlik. Samas tähendab see, et on hõlbus teha midagi valesti ehk programmi poolt mitteäratuntavalt, seetõttu võivad tekkida ootamatud programmi kokkujooksmised. Seepärast on selle programmi kasutamisel väga oluline eelnev kooolitus ning arusaam lähteandmete päritolust ja taustast.

5.2.1 Credo

Credo on 80-ndatel loodud DOS-põhine venekeelne arvutusprogramm, mis baseerub otseselt VSN 46-83'l. Credo on hetkel matemaatiliselt paremini VSN metoodikat järgiv arvutusprogramm, kuid selle kasutamise on seotud teatud komplikatsioonidega (vene keel, DOS-keskkond, tarkvara ühilduvusraskused tuntud operatsioonisüsteemidega), mistõttu selle kasutamisest käesolevas töös loobuti. Selle asemel kasutati võrdlustes VSN'i veidi mugandatud kujul järgiv Teede Tehnokeskuses välja töötatud MS Exceli põhjale ehitatud arvutusprogramm VSN-Excel.

5.2.2 VSN-Excel

VSN-Excel on MS Exceli baasil loodud eestikeelse kasutajaliidesega katendite dimensioneerimise programm. VSN-Exceli arvutusmetoodika on VSN 46-83 põhine kuid VSN-i "originaalsed" nomogrammid on interpreteeritud ja lihtsustatult arvutustes käsitletud kahe valemina, mistõttu on oht programmi oskamatu kasutamise korral saada ebareaalsed "nomogrammi" väärtused ja sealt edasi ekslikult dimensioneeritud kate. Programmi heade omaduste hulka tuleb lugeda kasutamismugavus – andmete salvestamise, arhiveerimise, kopeerimise ja printimise võimalus.

5.2.3 DELSAN

Taanis kasutatakse uute teede projekteerimisel DELSAN programmi, mille arvutusnäide on toodud ka käesolevas uurimistöös. Programm kasutab analoogselt VSN-i põhiste arvutusprogrammidega sisendina e-mooduleid ja paksusi. Tarkvara jätab kasutamata enamus materjalide parameetreid, millega on Eestis seni teekatendeid arvutatud. Lisaks on see tehtud Taani olude põhjal ja taani- ning ingliskeelsena.

Eesti jaoks tuleb programmi puudusteks lugeda:

- kasutamiskogemuse puudumine
- kasutab lihtsustatud, ainult e-moodulitel baseeruvat lähenemist
- ei arvesta kohalike oludega
- on võõrkeelne

DELSAN on Taani Teedeinstituudi väljatöötatud katendite dimensioneerimise programm, mis sarnaselt VSN-Exceliga on välja töötatud Exceli baasil ja on mugav kasutada: lihtne erinevaid andmeid võrrelda, salvestada, arhiveerida ja printida, samuti on tulemused hetkeliselt visuaalselt näha – puudub vajadus menüüdes "ringi joosta".

DELSAN'iga puuduvad siiski suuremad kogemused ja ka nihkele arvutus ei ole selgelt välja toodud.

6 Arvutusnäited

6.1 Arvutuste lähteandmed

6.1.1. Peamised algandmed.

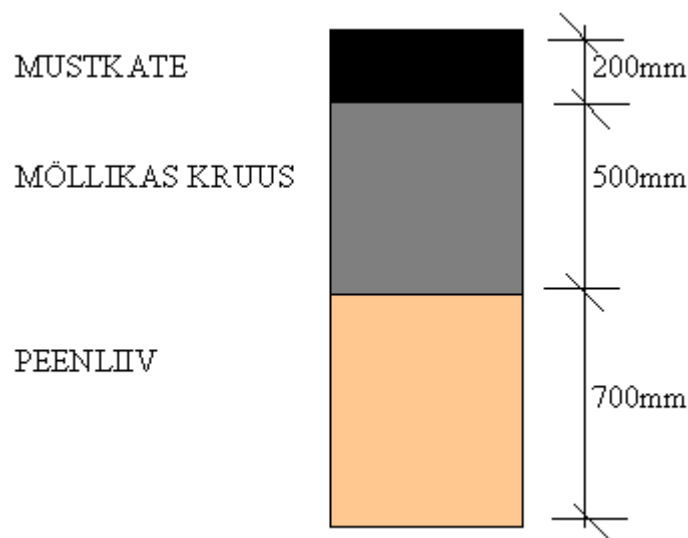
Väga raskeks osutus erinevate tarkvarade põhjal teostatavate katendite dimensioneerimistulemuste võrdluseks sobiva reaalse teelõigu valik, kuna eelduseks olid järgmised tingimused (järgnevad eeldused kehtivad ka võimalikul hilisemal (ELMOD'i) kasutamisel – reaalsetes projekteerimistingimustes).

- vähemalt 300m meetrit pikk,
- ühtlase katendikonstruktsiooniga kogu lõigu ulatuses,
- kihtide moodulid väheneksid sügavuse suurenedes (näitest puuduks tsementstabiliseeritud kiht),
- tee ei oleks hiljuti renoveeritud.

Leiti, et sellistel tingimustele vastas järgmine lõik:

Tallinn- Pärnu –Ikla maantee km134,8-142,0 (PK 35+50 – PK 62+00)

Selle Pärnu linnast välja 650m pikkuse teelõigu ulatuses tehti 4 puurauku, kus ilmnes, et mustkate paksus kõikus 20mm ulatuses, kruusakihi paksus kõikus 50mm ulatuses ning peenliiva kiht kõikus 300mm ulatuses. Kõige “keskmisemaks” osutus puurauk piketil 44 + 50. Selle piketi geoloogiline tulp on toodud ära järgmisel joonisel:



Joonis 2. Arvutusnäite baasiks olev geoloogiline tulp PK 44+50

Tabel 2. Geotulba materjalide sõelkõverad (sõela ava läbiv, massi %)

Sõela ava (mm)	63	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Mustkate		100	96	70	52	42	34	26	17	12	9,4
Möllikas kruus	100	99	80	64	52	46	41	34	15	8	6,1
Peenliiv							100	96	80	3	0,4

Muud andmed:

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

Mustkate – bituumenisisaldus 6,6%

Bituumen - pehmenemistäpp 49,2°C

6.1.2. Muud algandmed.

Tagasiarvutusel põhineva tarkvarana on kasutatud ELMOD 4.5 ja alt üles arvutusel põhinevad VSN-Excel v0.9 ja DELSAN. ELMOD'i puhul saab kasutaja ise määrata normtelje parameetrid. Kandevõimet iseloomustavad FWD-mõõtmisandmed pärinevad Tallinn - Pärnu - Ikla maantee lõigult km 134,8-142,0 (PK 35+50 – PK 62+00) kus liiklusloenduse andmetel (2000.a.) jaguneb liiklus (4920 autot päevas) järgmiselt:

- SA 82%
- VA/AB 9% (sh. 3% VA ja 6% AB)
- AR 9%

Np (koormusintensiivsus) leidmisel kasutati T. Metsvahi väljapakutud tegureid , mille järgi

$$N_p = 295,2 * 0,8 + 147,6 * 0,75 + 442,8 * 2,00 = 1232 \text{ normtelge}$$

mis VSN'is kasutatava rajateguriga (0,55) korrutamisel võrdub

$$N_p = 1232 * 0,55 = 678 \text{ normtelge rajal}$$

Kuna tegemist on arvutusnäitega, ei üritatud konkreetset teed dimensioneerida vastavalt 2000 a. liikluskooormusele, vaid eesmärgiks oli realistliku liikluskooormuse kasutamine. Selle tõttu võeti saadud normatiivne liikluskooormus orientiiriks. Kuna Eestis pole leitud ametlikku ESAL'i ja Np vahelist seost, on ESALi interpretatsioon tuletatud seosest, mille kohaselt DELSAN'is kasutatav ühik "ESAL per day" (ESALd) on ööpäevane liikluskooormus suurema liiklusega sõidusuunal. Arvutusteks ELMOD'iga sisestati liikluskooormuseks 678*365 päeva $\approx$ 250 000 - 10 tonnist normtelge aastas. VSN-Excel ja DELSAN eeldavad et liikluskooormus oleks antud päeva kohta ehk vastavalt $N_p = ESAL = 678$ normtelge.

Alustuseks leiti FWD andmete põhjal ELMOD'i tarkvara kasutades arvutuslikud kihtide e-moodulid. Kuna DELSAN'isse saab sisestada sideainega töödeldud kihtide puhul moodulite vahemikke (1000-2000, 2000-3000, 1000-3000...5000) ning sideainega töötlemata kihtide puhul väärtusi 50 MPa sammudega, ümardati ELMOD'i arvutatud moodulid sajasele täpsusele.

VSN-Excel programmi sisestati nii VSN normatiivsed materjalide e-moodulid kui ka ELMOD'i arvutatud moodulid. Kuna ELMOD pakub ülekatte arvutamise võimalust siis arvutati ülejäänud 2 tarkvaraga läbi ka vajalik ülekate.

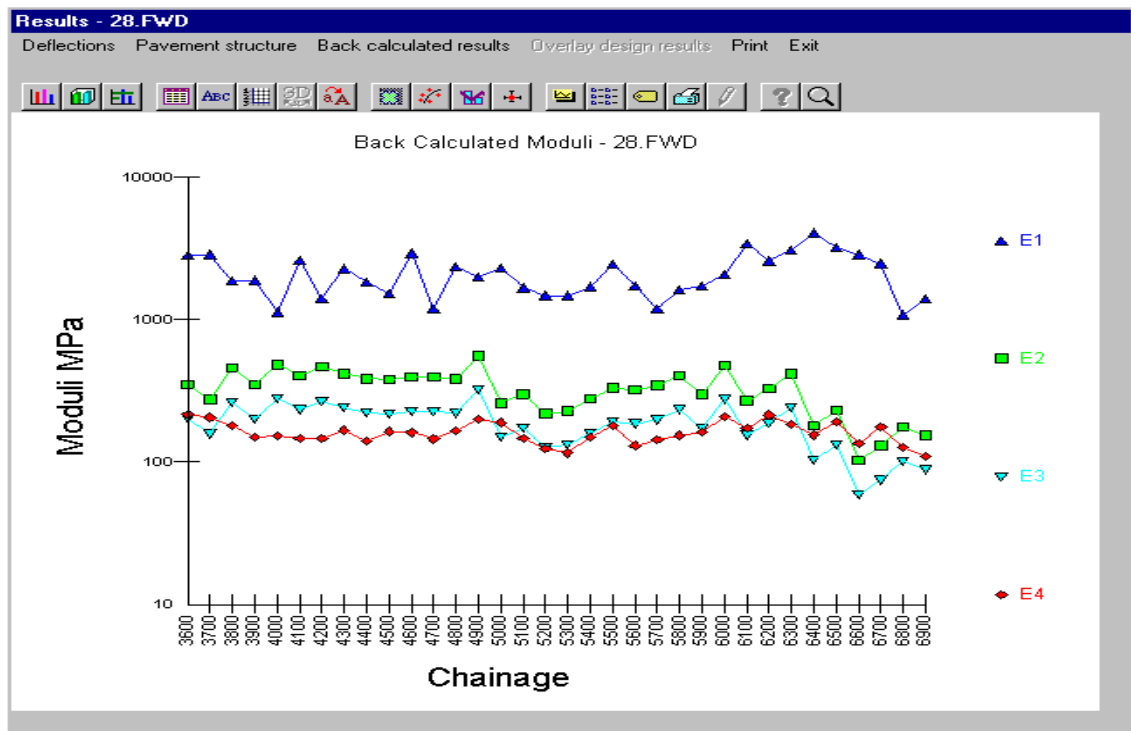
6.2 Arvutusnäide 1

Arvutusnäite eesmärgiks on ELMOD tarkvara abil selgitada välja vajaliku ülekatte suurus eeldusel, et ülekate on ainuõige lahendus vaadeldava tee taastusremondiks, kuna programm muid alternatiive ei paku.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

See Taanis välja töötatud ning USA's, LAV'is ja Taanis katsetatud tarkvara ELMOD küsib kasutajalt kõigepealt langeva raskusega deflektomeetri ehk FWD faili ning kihtide arvu ja paksusi ning arvutab Odemark - Boussinesq valemite kaudu välja vastavad kihtide elastsusmoodulid, milliste korral oleks tekkinud selline vajumiskõver nagu antud juhul tekkis. Programm on väga paindlik ja pea kõiki arvutusparameetreid saab muuta.

FWD-toorikandmete töötlemise tulemuseks on arvutuslikud e-moodulid igale etteantud kihile. Vastav ELMOD'i graafik on lisatud allpool.



Joonis 3. ELMOD programmi arvutatud kihtide elastsusmoodulid logaritmilisel skaalal.

Graafikul on näha ELMOD'i poolt arvutatud erinevate etteantud paksustega konstruktiivsete kihtide e-moodulid:

- E1- mustkatte moodul (vahemikus 1000-3000 MPa)
- E2- kruusakihi moodul (vahemikus 300 –400 MPa)
- E4- pinnase (peenliiv) moodul (vahemikus 100- 150 MPa)

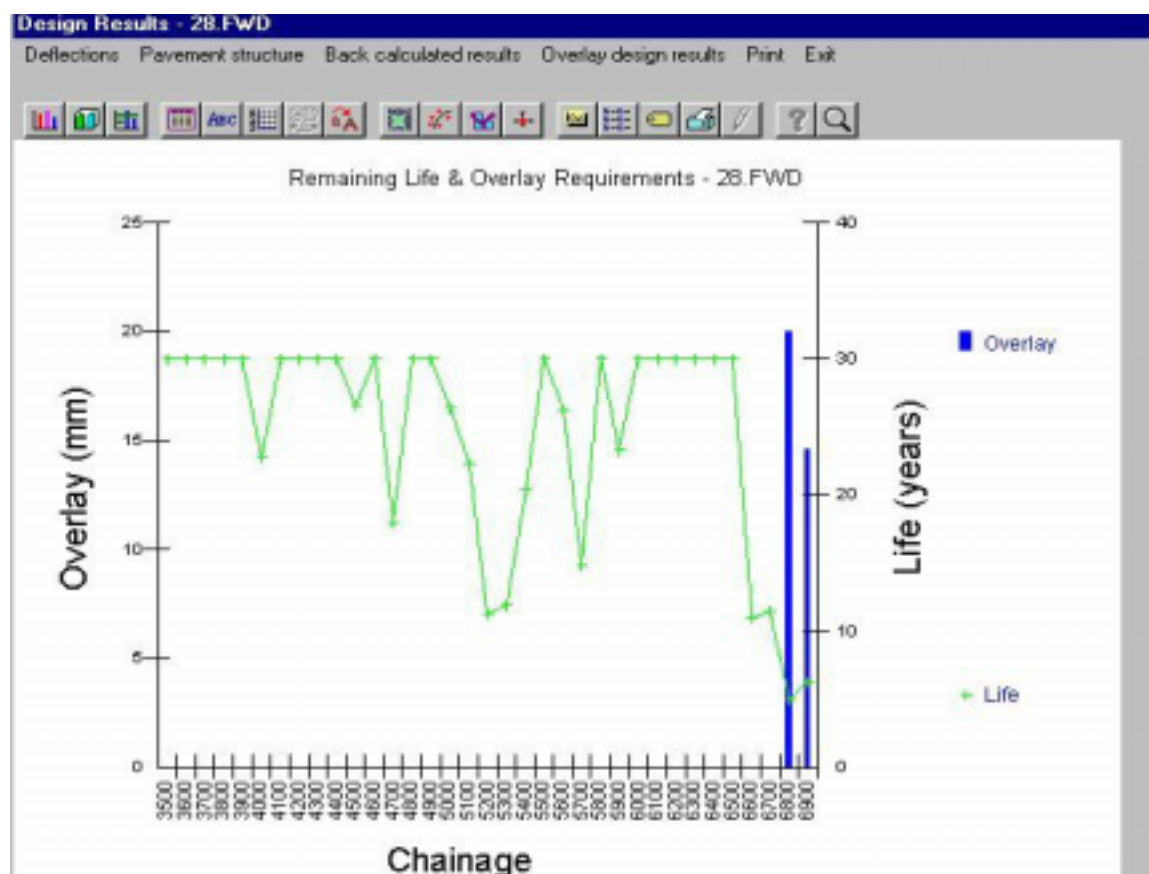
Leitud erinevate konstruktiivsete kihtide e-moodulid võimaldavad vastavate kogemuste olemasolul juba küllalt hästi hinnata vastavate kihtide tugevuslikku sobivust konkreetses kihis.

Olles arvutanud elastsusmoodulid, lisades ülekattematerjali parameetrid ja ka olemasolevate materjalide tüüpandmed ning koormussageduse, kalkuleerib programm vajaliku ülekatte etteantud ajaks (näites 30 aastat).

Alltoodud graafikult on näha ELMOD'i poolt leitav katte arvutuslik eluiga vaadeldaval lõigul (maksimaalne jääk-eluiga on 30 aastat ja maksimaalne eluiga mille puhul ELMOD pakub ülekattet, on 10 aastat.) olemasoleva konstruktsiooniga ning soovituslik ülekate järgmiseks 30-aastase eluea saavutamiseks. Siinjuures tuleb veelkord rõhutada

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

programmi paindlikkust, mille juures antakse inseneri-konstruktori kätte tohutu informatsioon (tarindis olevate materjalide omaduste kohta) kuid otsuse, kas selliste omadustega materjal ikka sobib vastava klassi, liikluse, niiskuse jne tingimustega teele, tuleb teha kogemuste põhjal.



Joonis 4. ELMOD'i arvutatud vajalik ülekate (sinine joon) ja katendi jääk-eluiga.

ELMOD'i puhul saab kasutaja ise määrata normtelje parameetrid. Konkreetset juhul sisestati ennustatavaks koormussageduseks peatüki alguses arvutatud veerand miljonit - 10 tonnist normtelge aastas. Uue asfaldikihi moodul võeti programmi poolt pakutav 2750 MPa. ELMOD'i puhul saab kasutaja mõjutada arvutamise protsessi, elimineerides näiteks tavalisest suurema kõrvalekaldega tulemused. Antud juhul üritati vältida subjektiivseid tulemusi ning ei sekkunud arvutamisse. 2002 aastal turule tulevas versioonis (ELMOD 5.0) on eeldatavalt tehtud mõningaid täiendusi (moodulite skaala puhul on esindatud ka mittelogaritmiline skaala, võimalus sisestada eestikeelseid pealkirju jpm).

Lisas 4 toodud parameetrite nimekirjas on näha, et algparameetreid ilma alajaotusteta on 7, millest enamusi Eestis varem kasutatud pole:

I: Temperatuuri funktsioonid:

- 1) materjali elastsusmoodul (reference modulus) vastaval temperatuuril (MPa).
- 2) temperatuuritundlikkus (temperature sensitivity), kus määratakse millist tüüpi funktsiooniga saab kirjeldada temperatuuri ja elastsusmooduli omavahelist sõltuvust (seose olemasolul logaritmiline seos või eksponentne seos).
- 3) aastaaegade vaheldumisest tekkiva temperatuuri ja niiskuse kõikumist kirjeldava funktsiooni (seasonal variation) valik (nt. sinusoidne või eksponentne).

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

II: kahjustuste tüüp (distress mode) - praod (piki- või põikpraod) ning roopad (kulumis- või läbivajumisroopad)

III: katsekoormamiste arvu ja mooduli omavaheline seos C , (ehk materjali e-mooduli tundlikkus koormamiste arvu suhtes) mis sellisel juhul, kui moodul jääb samaks olenemata koormuste arvust võrdub ühega (eraldi roobaste ja pragude korral).

IV: lubatavad tõmbepingete suurused (permissible strain/stress value) sideainega töödeldud kihtide puhul (MPa) ja vastavad survepinged sideainega töötlemata kihtide puhul (eraldi roobaste ja pragude tekke korral).

V: teekatte materjalist tulenev eeldatav ekspluatatsiooni kõlblikkus (life) aastates (eraldi roobaste ja pragude puhul).

Ülekatte mooduliks valiti 2750 temperatuuril 10°C. Dynatesti seisukoht oli, et ei maksa ühtegi numbrit parameetrite osas muuta ilma töömahukaid katseseeriaid teostamata. Kuna tarkvara pakutavad näite materjalide parameetrid on tuletatud laialdaste uurimustööde tulemuste üldistustena, siis on soovitatav kasutada etteantud väärtusi. Nii on käitunud testimise otstarbel ka käesolevas töös. Siiski, tarkvara lubab määrata kõiki eelpool toodud parameetrite väärtusi. Tarkvara ulatuslikumaks kasutuselevõtuks Eestis tuleks vastavad uuringud läbi viia ning Eestile sobivad parameetrite väärtused leida.

6.2.1 ELMOD tarkvaraga tehtud arvutusnäite järeldus

ELMOD tarkvaraga ülekatte dimensioneerimisel ilmnes, et 2000a olemasolevate normtelgede (250 000) arvu puhul ei paku tarkvara üldse ülekattet – kui mitte arvestada antud teelõigu viimast 200 meetrit, kus konstruktsioon oli nõrgem ka geotulpade järgi. Samas ei saa sellist tulemust näiteks VSNiga otseselt võrreldavateks lugeda, kuna ELMOD on loodud e-moodulite ja ka ülekatte arvutamiseks konkreetse tee tingimustes, mille puhul e-moodulite väärtused tulevad tavaliselt laboratoorsete katsete tulemustest suuremad. Ka ülekatte arvutus ei ole Eesti oludes sobilik lahendus, kuna ei võeta arvesse tõmbepingeid, nihkepingeid ega ka külmakindlust – kuna Eestis paljudel juhtudel just nende näitajatega ongi probleeme. ELMOD'is tehakse arvutus eeldusel, et konstruktsioonis ei ole peale sideainega töödeldud kihi omaduste halvenemisega muid probleeme. Selle idee tagapõhjaks on eeldus, et olemasoleva tee ehitamisel neid näitajaid arvestati teiste näitajate, nagu tolmu- ja vee sisalduse, sideainega töötlemata kihtide kihipaksuste jne. reguleerimise kaudu.

Antud arvutusnäites kalkuleeritud moodulid tulid VSN'is pakutavate elastsusmoodulitega võrreldavate väärtustega. Samas tähendab praktikas ka näiliselt tühine moodulite erinevus näiteks ülekatte puhul lisaks mitmeid sentimeetreid ülemisi kihte. Samuti tulid sideainega töötlemata kihtide moodulid lähedased VSN'i vastavatele elastsusmoodulitele (mis on ilmselt juhuslik, kuna maailmapraktika väidab, et sideainega töödeldud kihtide moodulid peaksid tagasiarvutusel tulema suuremad ning ka metoodikate matemaatilised valemid pole samad).

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

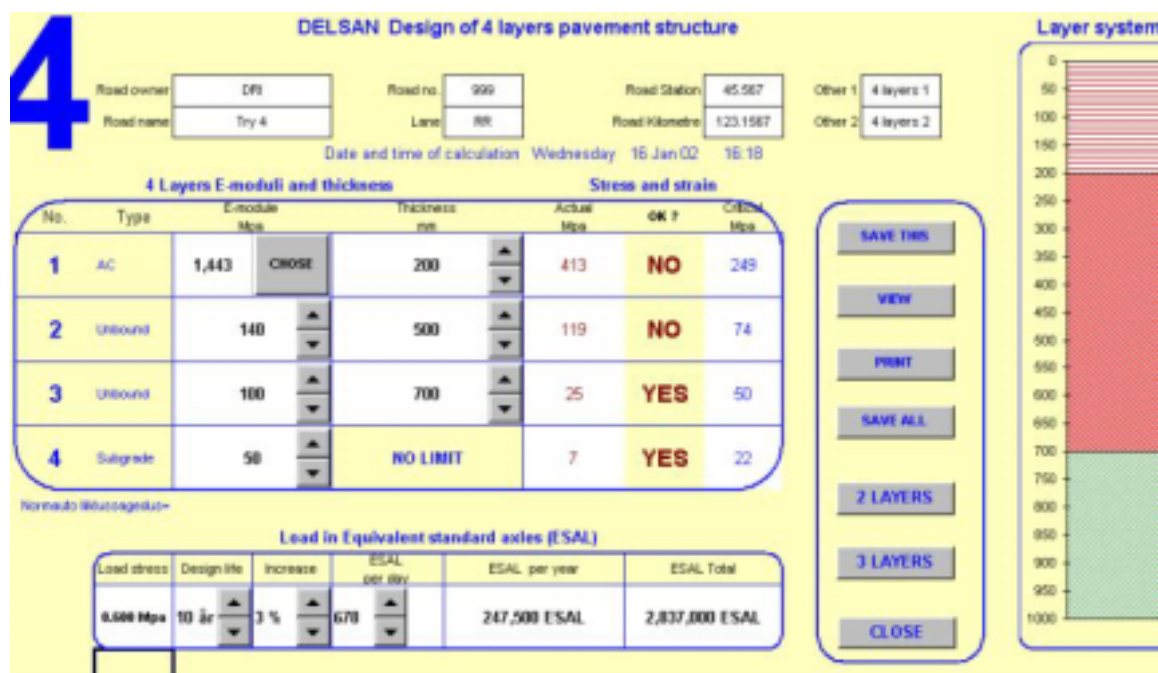
6.3 Arvutusnäide 2

Käesoleva arvutusnäite eesmärk oli võrrelda võimalikult identsete algandmetega Taanis kasutatavat laboratoorsetel andmetel põhinevat programmi DELSAN tagasiarvutusprogrammiga ELMOD, et neid mõlemaid hiljem võrrelda Eestis kasutaval metoodikal põhineva arvutusnäitega.

DELSAN programm on kasutusel Taanis kõikide uute teede projekteerimisel. Sisestada tuleb kihtide arv ja moodulite väärtused, kusjuures mustkatte moodul on mingis vahemikus (näit. vana katte puhul 1000- 2000 MPa ja uue 2000-3000 MPa alt-üles suureneva mooduliga. Samuti tuleb sisestada normtelgede arv, projekteeritav iga ning eeldatav liikluskoormuse kasv aastas. Nii paksuste puhul kui muude sisestavate andmete juures ei saa sisestada suvalist numbrit, vaid peab valima pakutavate numbrite hulgast. Eriti drastiline on see asfaldi moodulite puhul, kus vahemikuks on 1000-5000 MPa tuhandeste sammudega. Ilmselt ei ole ükski insener siiski suuteline hindama elastsusmoodulit täpsemalt, mis tõttu on arvatavasti kehtestatud teatud piiritingimused, mille juures üht või teist alam - või ülempiiri kasutada.

Programmi dimensioneerimise akna paremal küljel on visuaalselt näha, kas konstruktsioon peab vastu või mitte (esimest kinnitab roheline ja teist punane värv).

Käesolev arvutusnäide on tehtud taas DELSAN programmiga ning seekord lähtuti 15.novembril 2001 aastal Maanteeametis kinnitatud e-moodulitest. Mustkatte e-moodulile vastas materjal järjekorra numbriga 10 –“vanad asfaltbetoonid ja mustkatted” – 1400 MPa. Kruusale sideainetega töötlemata materjalidest nr 5 Kruus”: 150 MPa – millele vastab antud programmis 140 MPa, kuna mooduleid saab sisestada ette antud numbrite hulgast. Peenliivale sama nimetusega materjal nr 8 ehk 100 MPa. Pinnase mooduliks pakub programm ise 50 MPa.



Joonis 5. Arvutusnäide 5 DELSAN programmiga

DELSAN programmi arvutus (vt. joonis ülal) olemasoleva tee konstruktsiooni kohta, kus seotud kihi ja selle all oleva kihi (tinglikult alus) madal moodul ei garanteeri tegelike pingete vastuvõtmise. Kuna programmi saab sisestada vaid 4 kihti (k.a. pinnase kiht) siis uut ülekatet saab programmi sisestada vaid ülemise kihi paksuse ja mooduli suurendamisega või ka ainult e-mooduli suurendamisega (näiteks 8 cm paksuse kihi ülesfreesimine ja vajaliku paksusega uue kihi pealelaotamine).

Seda on ka järgnevas näites tehtud – paksus on vähenenud, kuid asfaldi moodulit on uue kihi mõju omaduste lisamiseks tõstetud 1000-2000 MPa vahemikust 2000 MPa'lini, mille programm automaatselt teisendab antud seotud kihi paksuse juures 2400 MPa'lik. See ei vasta küll nende asfaldikihtide üldistatud elastsusmoodulile ja alternatiiv oleks jääda 1443 MPa juurde, mis on veelgi sobimatum.

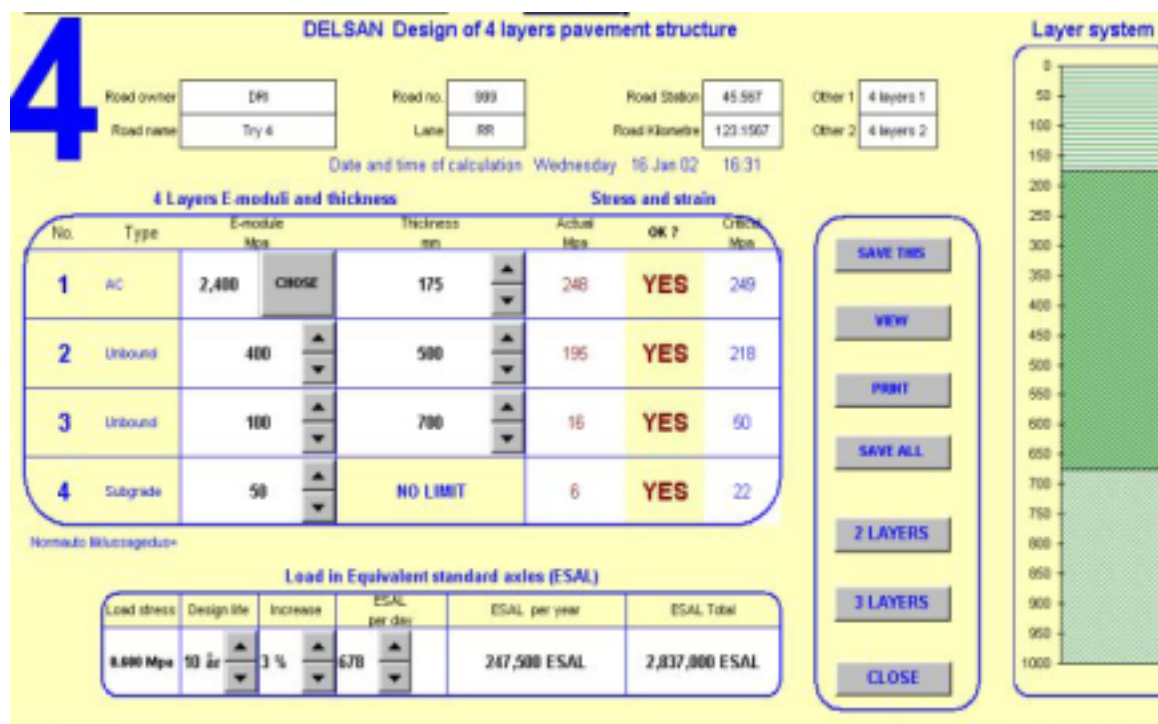
Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

6.4 Arvutusnäide 3

Käesoleva arvutusnäite eesmärk on leida, tarkvara esitatud tingimusi arvestades, ülekate eeldusel, et konstruktsiooni kogupaksust ei suurendata, mis on saavutatav vajaliku sügavusega tasandusfreesimise abil.

Arvutusnäites on kasutatud eelpoolkirjeldatud konstruktsiooni kihtidele ELMOD'ga leitud e-mooduleid. Freesimisega ülekatte imiteerimiseks on tõstetud ülemise kattekihi e-moodulit kuni tegelikud pinged on väiksemad kriitilistest pingetest. DELSAN'iga tehtud käesolevas arvutusnäites saadi pingeid rahuldavaks ülekatte paksuseks ca 5 cm, kusjuures ülesfreesitud kihi paksus on ca 8cm (mis kokku annab ülemise kihi paksuseks $20-8+5=17\text{cm}$, mille asemele tarkvara ise pakub 175 mm). Jooniselt on näha, et 2400 MPa keskmise mooduliga asfaldikiht on piisav rahuldamiseks konstruktsiooni erinevaid nõudeid (vt joonis allpool).

ELMOD leidis olemasoleva kattekihi keskmiseks e-mooduliks 2000 MPa ning arvutus tulemuseks oli, et ülekatet pole vaja. Selle erinevuse põhjuseid on mitmeid: erineva (DELSAN puhul 12T) normtelje kasutamine, ainult ülekattele lihtsustatud mudeli vaatlemist ELMOD poolt, lisaks ei arvesta ELMOD adekvaatselt allolevate nõrkade kihtide mõju ülekatte paksusele.



Joonis 6. DELSAN programmiga arvutatud näide

DELSAN-programmi kasutamise teeb mugavaks asjaolu, et sisestades vastavad paksused, moodulid, liikluskoormuse ja selle kasvu, arvutab programm sisestatud andmete põhjal koheselt tulemused, mis on ka visuaalselt hästi jälgitavad

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

6.5 Arvutusnäide 4

Käesoleva arvutusnäite eesmärk oli võrrelda võimalikult identsete algandmetega laboratoorsetel ja tagasiarvutuse andmetel põhinevaid programme DELSAN ja ELMOD Eestis kasutaval metoodikal põhineva arvutusnäitega.

Käesolev arvutusnäide baseerub oma kihi paksuste osas eelmises näidetes kasutatud olemasoleva tee andmetele. Arvutused on tehtud VSN-Excel tarkvaraga ning tulemused on toodud allpool oleval joonisel. Järgnevalt on arvutatud konstruktsioon ilma ülekatteta kahes variandis: Maanteeameti käskkirjas (15.11.01) ja ELMOD'i pakutud moodulitega.

Variant 1.2											
Katendis on 1 seotud ja 2 sidumata kihti											
Pk	44+50	Normaauto liiklussagedus	678	Tugevusvaru	0.94	Pingetegur	0.85	Ülat 1. kiht, pen>150	0		
		Vajalik elastsusmoodul, MPa	234	Koormustegur	0.6	Hälvete tegur	1.32				
Kihid	Kihi paksus, cm	Kihi elastsusmoodul, MPa			Nihkepingete parameetrid			Painde tõmbetugevus, MPa	Elastusmoodul kihi, MPa	Nihkepingete tugevustegur	Tõmbepingete tugevustegur
		Elastne läbipaine	nihkepingete arv.	tõmbepingete arv.	nidusus, MPa	sisehõõrde nurk, kraadi	tõltingimuste tegur				
Mustkate	20	1400	350	800				0.8	315.4		1.850
Kruus	50	150	150		0.03	45	7		85.9	3.22	
Peenliiv	70	100	100		0.005	38	5		60	1.23	
tolmliiv	140	60	60		0.011	34	3			5.64	
D	37	Erisurve ratta all, MPa		0.6							

Variant 1.2											
Katendis on 1 seotud ja 2 sidumata kihti											
Pk	44+50	Normaauto liiklussagedus	678	Tugevusvaru	0.94	Pingetegur	0.85	Ülat 1. kiht, pen>150	0		
		Vajalik elastsusmoodul, MPa	234	Koormustegur	0.6	Hälvete tegur	1.32				
Kihid	Kihi paksus, cm	Kihi elastsusmoodul, MPa			Nihkepingete parameetrid			Painde tõmbetugevus, MPa	Elastusmoodul kihi, MPa	Nihkepingete tugevustegur	Tõmbepingete tugevustegur
		Elastne läbipaine	nihkepingete arv.	tõmbepingete arv.	nidusus, MPa	sisehõõrde nurk, kraadi	tõltingimuste tegur				
Mustkate	20	2000	1000	3600				2.4	539.5		3.545
Kruus	50	400	400		0.03	45	7		85.9	3.27	
Peenliiv	70	100	100		0.005	38	5		60	6.49	
tolmliiv	140	60	60		0.011	34	3			3.18	
D	37	Erisurve ratta all, MPa		0.6							

Joonis 7. Olemasoleva konstruktsiooni VSN-Excel tarkvaras arvutatud arvutusnäited.

Joonise ülemisel arvutusnäitel on näha, et arvutusel VSN mooduleid kasutades on e-üldine piisav. Alumiselt näitelt on ELMOD'i leitud moodulitega arvutades samuti e-üldine piisav. ELMOD'i pakutavaid parameetreid vaadates on näha, et vaatamata parameetrite rohkusele ei ole nihkepingete jaoks ühtegi näitajat. Sellest aspektist ei ole nihkepingete kriteeriumid ELMOD'i pakutavate moodulitega arvutatavad.

Joonise ülemisel arvutusnäitel pakub välja e-üldist, mis ületab vajalikku 35 protsendiga. Alumine ehk FWD –ELMOD kaudu saadud elastsus-moodulitega arvutusnäite e-üldine on vajalikust suurem 130%. Kruusa jaoks pakub ELMOD VSN'i pakutavast moodulist 167% suuremat moodulit. Liiva elastsusmooduli väärtus osutus kummagi metoodika puhul võrdseks. Mustkattele pakub ELMOD VSN'i pakutavast moodulist 42% suuremat moodulit. Samas näitab maailmakogemus, et sideainega töödeldud kihtide moodulid võivad tagasiarvutusel tulla väärtusega kuni 15 000 MPa. Sellest saab järeldada, et

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

- VSN taustal nii DELSAN, kui ELMOD aladimensioneerivad katendeid (järelalus kehtib juhul, kui ei võeta arvesse metoodikate erinevusi).
- Otseselt ELMOD'i pakutavaid mooduleid VSN'is kasutada ei saa
- Kõige suuremat korrektsiooni vajavad sideainega töödeldud kihtidele ELMOD'i poolt arvutatavad moodulid.

Näites 1 on näha, et ELMOD arvutab kogu konstruktsiooni tugevuskriteeriumina nn. vajalikku ülekatet. Selline kriteerium arvutatakse lähteandmetest, milleks on kihtide paksused ja läbivajumite kaudu arvutatud elastsusmoodulid. Ka e-üldine arvutatakse kihtide paksuste ja vastavate elastsusmoodulite kaudu. Näidetes ELMOD'i e-moodulitega VSN metoodikaga arvutatud konstruktsioon annab piisava e-üldise ja ELMOD ütleb, et ülekatet pole vaja. Siit saab järeldada, et:

- Ülekatte arvutust saab ELMOD'is vaadelda, kui e-üldise arvutust.

Kui ELMOD pakub ülekatet ei ole konstruktsiooni omadused piisavad vastava liiklussageduse kandmiseks ehk e-üldine on väiksem kui vajalik ja vastupidi. Kahjuks ELMOD numbriliselt e-üldist ei arvuta.

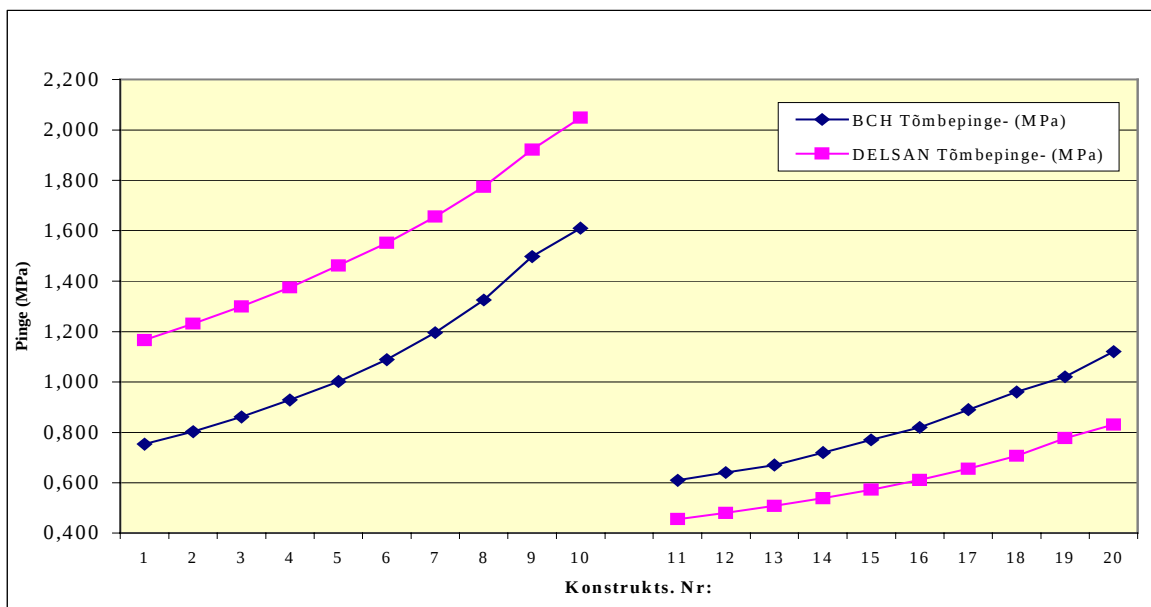
6.6 Arvutusnäited VSN ja DELSAN'ga

6.6.1 Tõmbepingete arvutamine

Käesoleva arvutusnäite eesmärk oli leida mõnda teist moodust eelpool näidetes kasutatud lääne programmide ja VSN-Exeli võrdlemiseks. Kuna ELMOD'i ja DELSAN'i programmi sisu on autoriõiguse kaitsmise eesmärgil salastatud, saab võrrelda ainult mõnda parameetrit mida arvutatakse ka VSN'i metoodikas. Sobivaimaks parameetriks osutus DELSAN'is ja ka VSN'i poolt arvutatavad tõmbepinged asfaldikihis.

Näitearvutustes tehti katseid kolme- ja neljakihiliste konstruktsioonidega. Mõlemaga 10 katset kummaski programmis ehk kokku 40 katsearvutust. Kummagi konstruktsiooni kümne erineva katse puhul muudeti koos nii mooduleid kui kihipaksusi selleks, et tuua esile suuremaid pingete muutusi. Konstruktsioonide andmed on toodud eraldi tabelina lisas 7 ning tulemused esitatud nii tabelis kui graafilisel kujul. Kõikide konstruktsioonide puhul on pinnase mooduliks võetud 50 MPa. VSN'i puhul võeti asfaldi mooduliks tõmbele arvutamisel 3600 MPa ja DELSAN'i puhul jäädi 2000 MPa juurde. Juhul, kui DELSAN'is võeti samuti asfaldi mooduliks 3600 MPa tulid kõik tõmbepinged keskmiselt 36% väiksemad, mis oleks kolmekihilise konstruktsiooni puhul tulemusi lähedamale toonud ning kahekihilise konstruktsiooni puhul kaugemale viinud VSN vastavatest tulemustest.

Järgnevalt on toodud ära lisas 7 esitatud võrreldud konstruktsioonide tõmbepingete arvutusi iseloomustav graafik, kus vasakul asuvad jooned tähistavad kolmekihilist konstruktsiooni ja paremal on kahekihilise konstruktsiooni tõmbepinged kahe erineva arvutusmetoodika puhul.

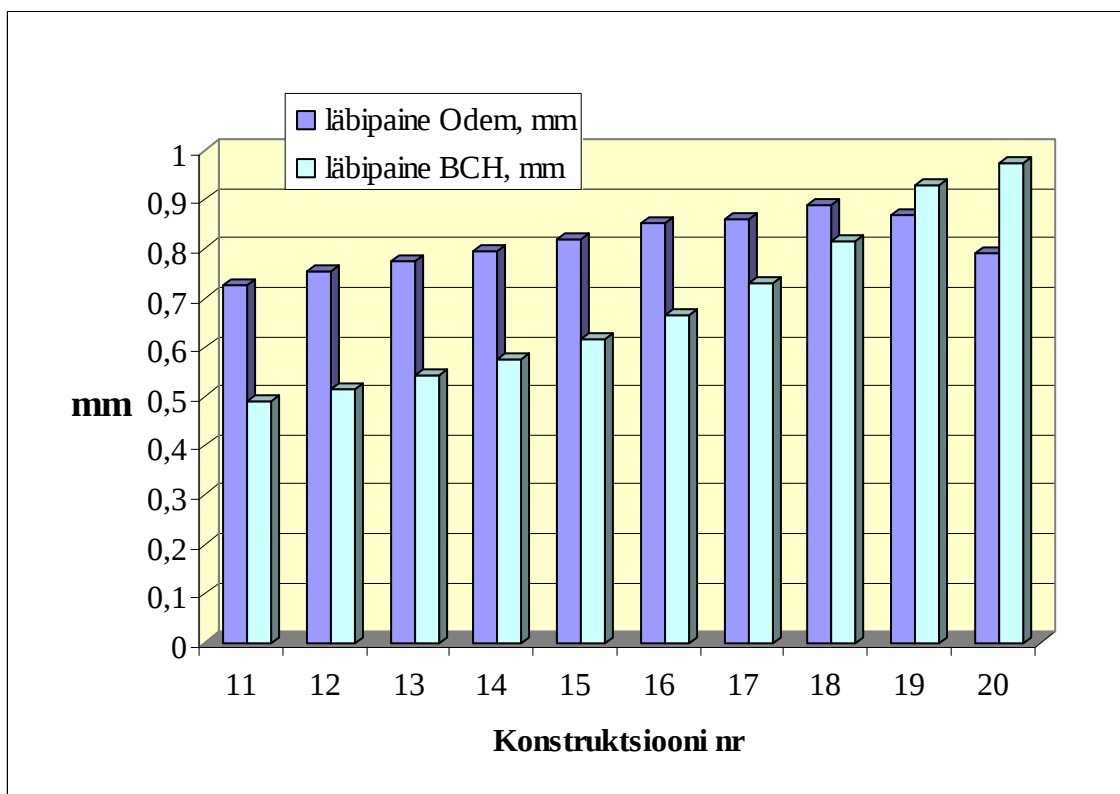


Joonis 8. A/B tõmbepinged vastavalt kihtide paksustele

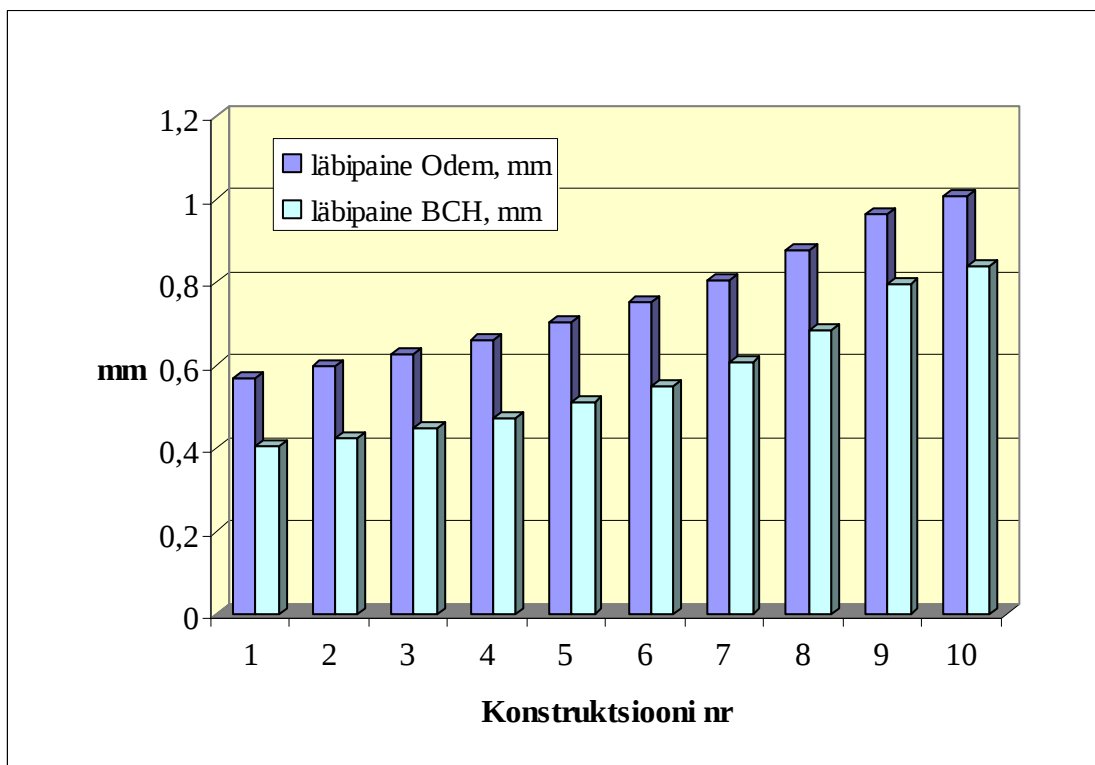
Samuti võrreldi samade konstruktsioonide puhul ka läbipaindeid. DELSAN'is läbipaindeid eraldi välja toodud pole, kuid kuna tegemist on Odemarki meetodiga, siis vahetulemustena olid läbipainded olemas. Ka VSN-Excelis ei ole paigutisi eraldi välja

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

toodud, kuid vahetulemustena on paigutiste väärtused kättesaadavad. Järgnevalt on toodud ära vastavad graafikud. Kolme- ja kahekihilised konstruktsioonid on toodud eraldi graafikutel.

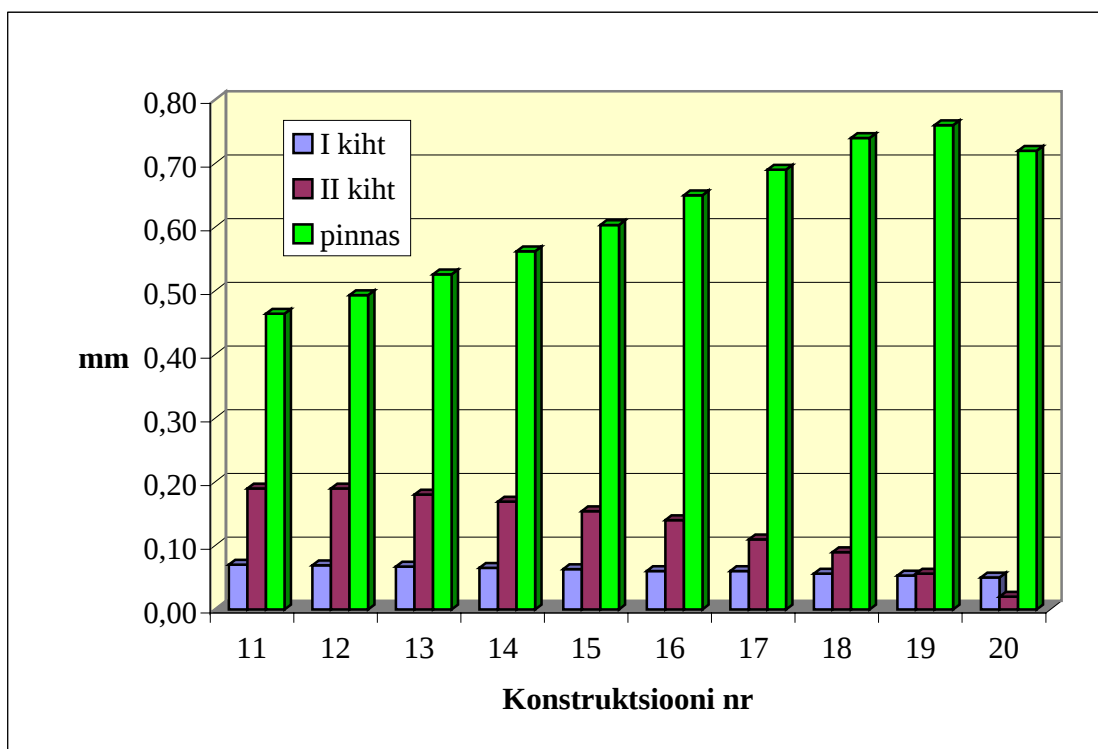


Joonis 9. Kahekihilise konstruktsiooni läbipained

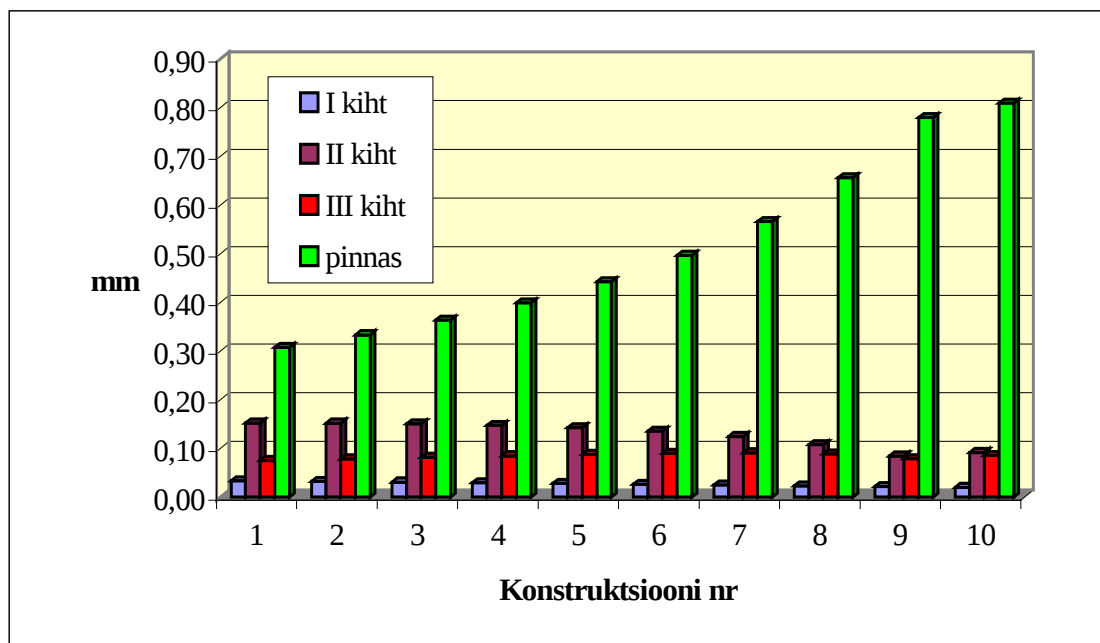


Joonis 10. Kolmekihilise konstruktsiooni läbipained

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.



Joonis 11. Kihtide paigutised 2-kihilise katendi puhul



Joonis 12. Kihtide paigutised 3-kihilise katendi puhul

6.6.2 Järeldused arvutustulemustest

DELSAN programm on e-moodulite osas väga jäik ning standardtelgede ja vajaliku konstruktsiooni paksuse ja moodulite vaheline seos on ebaselge (vaatamata sellele, et arvutusvalemid saadi programmist kätte - vaata lisa 2). Tõmbepingete osas on teatav omavaheline kokkulangevus näha - seda eriti neljakihilise konstruktsiooni puhul. Samuti on näha omavahelisi seoseid deformatsioonide puhul. Konstruktsioonid 19 ja 20 jäävad ilmselt arvutuspiirkonnast välja ning kolmekihilise konstruktsiooni kolmanda kihi paigutis ei ole korrektne, kuna Odemarki valemid on mõeldud 2-kihiliste konstruktsioonide tarvis. Nendel eeldustel leiti ka Odemarki meetodilt VSN'i meetodi paigutistele ülemineku kordaja (vaata lisa 5): $p=0,749273779$, mille $R^2=0,95$.

Üldjoontes on DELSAN programm pigem üldistus Odemarki meetodist ning on sobilik ülikoolides kataloogide tüüpi projekteerimise meetodite arvutusliku tagamaa selgituseks. Odemarki meetod on sobilikum kahekihiliste konstruktsioonide puhul. ELMOD sobib pigem FWD andmete põhjal olemasolevate teede moodulite arvutamiseks. Kuna ELMOD üldist elastsusmoodulit ei arvuta, siis otseseks võrdluseks VSN'iga sai tehtud katselisi arvutusi (vaata lisa 8). Seal ilmnes, et normaaltingimustes tulevad e-üldised ligilähedased VSN'i ja ELMOD'i puhul, vaatamata kihtide moodulite erinevusele. Samas tähendavad sellised suhteliselt väikesed e-üldise erinevused suuri konstruktsiooni maksumuse erinevusi.

7 FWD

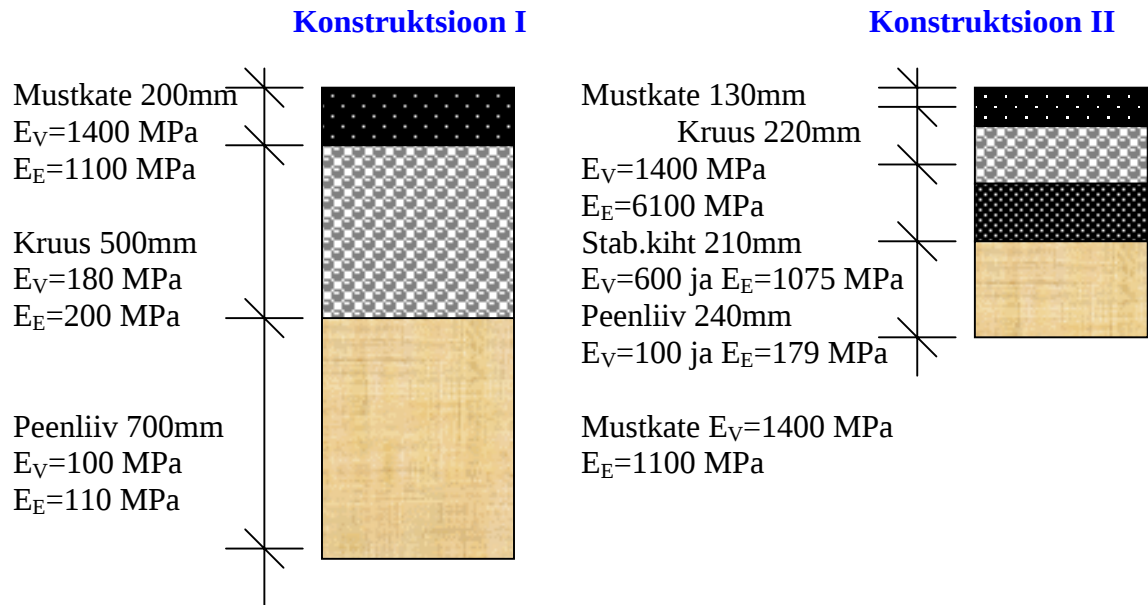
7.1 FWD-põhiste e-moodulite kasutatavus VSN metoodikas

Käesolevate arvutusnäidete eesmärk oli leida lisaks mõnda teist moodust eelpool näidetes kasutatud Lääne programmide ja VSN-Exeli võrdlemiseks. Kuna rohkem parameetreid pole, mida arvutaksid nii VSN'i metoodika kui ka vähemalt üks arvutusnäidetes kasutatud Lääne programm, siis prooviti leida muid võrdlemisviise.

Eestis on olemas suur FWD andmebaas, maaradar ning ka programmid nende andmete töötlemiseks. ELMOD arvutab küll igale kihile eraldi e-mooduli ja pakkudes soovitava uue ülekatte paksuse (vastava liikluskoormuse ja materjalide omaduste juures). Seetõttu pakub huvi, kas oleks mõeldav võrrelda nii ELMOD'iga leitud e-moodulitega kui ka Eestis kehtivate e-moodulitega VSN'is arvutatud e-üldist. Tehtud arvutusnäidetes võrreldi e-üldise käitumist kahe erineva konstruktsiooni puhul, kui kihtide paksusi muudeti nii ükshaaval kui korraga.

Mõlemad konstruktsioonid on võetud Tallinn-Pärnu-Ikla maanteelt ning valiku kriteeriumiks oli konstruktsiooni I puhul võimalikult ideaali lähedased tingimused (mida eeldab ka ELMOD programm) ja konstruktsiooni II puhul võimalikult ELMOD'ile vastunäidustatud konstruktsioon, kus jäik kiht on kahe nõrgema kihi vahel. Geoloogiliste tulpade otstarve oli tegelikult teelt võetud konstruktsioonide lähteandmeteks seadmine.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.



Joonis 13. Konstruktsioonide I ja II geoloogilised tulbad

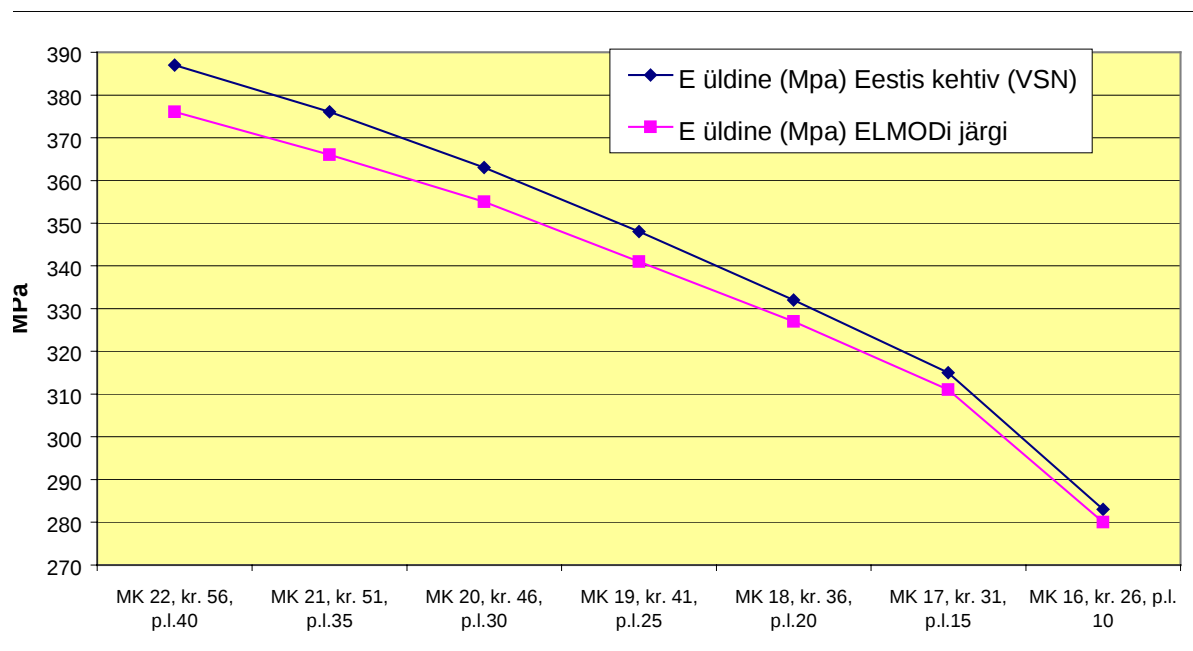
Saadi ülevaade konstruktsiooni kõigi kolme kihi paksuste muutmise mõjust VSN-põhiste ja nn. “mõõdetud” e-moodulitega arvatud e-üldisele. Järgnevatel kahel graafikul on äratoodud kokkuvõtvad joonised, kus on muudetud kummagi konstruktsiooni kõikide kihtide paksusi, kusjuures lisas 8 on äratoodud eraldi iga kihi paksuse muutmise mõjust tingitud e-üldise muutused kummagi konstruktsiooni ning kummagi kihimooduli puhul. Kuna kõige ülevaatlikumad joonised olid kõikide kihtide paksuste muutmistest tingitud e-üldise graafikud, siis piirduti selles peatükis vaid nende kahe graafikuga.

E-üldine ELMOD tähendab, et kihtide e-moodulid on määratud FWD andmete põhjal ELMOD’iga, neid e-moduleid on kasutatud VSN-il baseeravas VSN-Excel katendiarvutusprogrammis leides e-üldise.

E-üldine VSN tähendab, et e-üldine on leitud VSN-põhiseid moduleid kasutades.

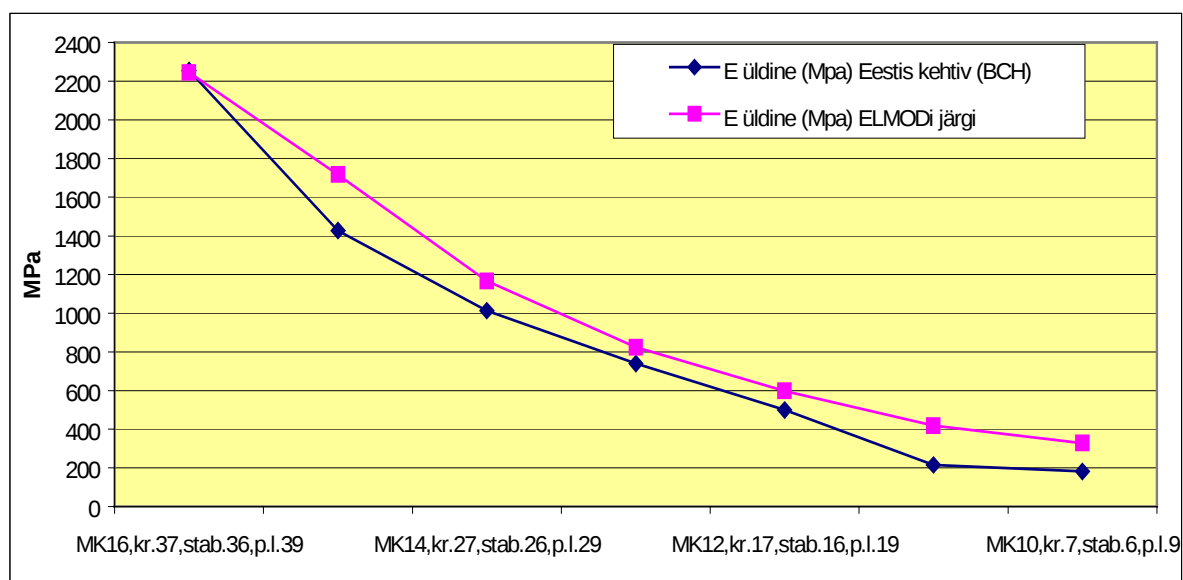
Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

7.1.1 Konstruktsioon I



Joonis 14. Kõikide kihtide paksuse muutuse mõju e-üldisele.

7.1.2 Konstruktsioon II



Joonis 15. Kõikide kihtide paksuste muutusele vastav e-üldine

Eelnevatel joonistel on näha Eestis kehtestatud ja ELMOD'ga leitud kihtide e-moodulite alusel VSN metoodika alusel arvutatud e-üldise võrdluseid erinevate kihipaksuste korral. Graafikutel on esimesena kujutatud kattekonstruktsioon, mille mõlemad arvutusvariandid

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

annavad praktiliselt sama e-üldise väärtuse, kuid arvutustes hálbivad kihtide moodulid üksteisest suuresti. Kuna võimalike lahendite arv on suur, siis kontrollimaks, kas kokkulangevus on juhuslik või mitte, on tehtud täiendavad arvutused muutes kihtide paksusi.

Kihipaksuste muutustega kaasneb e-üldise konstantne muutus antud konstruktsioonis ehk e-üldine sõltub kõikide kihtide moodulitest ja paksustest. Sideainega töötlemata kihtide moodulid ja paksused ei avalda suurt mõju e-üldise muutusele, küll aga konstruktsiooni nihkepingete vastuvõtmisele. Sideainega töödeldud kihtide puhul annab mooduli suurendamine arvestatava e-üldise kasvu.

Kui konstruktsioon I neljakihilise (ilma huumuserikka või monoliitse vahekihita) lähedase konstruktsiooni sisestavate moodulite vahe oli keskmiselt 12,3 % siis e-üldiste vahe oli alla 2%. Konstruktsioon II puhul oli keskmine sisestavate moodulite vahe 144 % ja e-üldiste keskmine vahe 17%.

Hüppelised üleminekud 14,7 cm kihipaksuse juures on tingitud VSN-Excel v0.9 nomogrammide interpreteerimisviisist – konstruktsiooni suvalise kihi paksuse väärtuse juures 14,7 cm muudab tarkvara arvutusvalemit. Teisiti sõnastades vahetab tarkvara suvalise kihipaksuse H ja kontaktsurvepinna d suhte väärtuse (0,4) korral e-üldise arvutusvalemit.

7.2 Üldist FWD kasutamisest

FWD (Falling Weight Deflectometer e. langeva raskusega koormusseade/vajumimõõtja) seadme kasutamisel on omad piirangud kuna seadet kasutatakse välitingimustes. Näiteks ei kasutata seadet talvel. Üldreeglikult loetakse, et teste tehakse niikaua, kuni maa ei ole külmunud, kuna jäätunud kihtide omadused erinevad jäätumata kihtide omadustest. Kuna FWD katsed toimuvad konkreetse tee peal, siis on FWD tulemused sobivaimad "tegelike" moodulite leidmiseks. Vanade teede renoveerimisel taustsüsteemiks kasutatavate moodulite tõlgendamise loogika on erinev Eestis kasutatavast loogikast. Nimelt "tegelikud" moodulid ei ole mitte laboratoorsed või matemaatilised üldistused, vaid konkreetse tee peal saadud tulemused, kuna meid tegelikult huvitavadki moodulid antud konstruktsioonis. Kahjuks mõõdetavad tulemused sõltuvad tee hetkelisest temperatuurist, niiskusest jne. Taanis, kus on suur selle-alane kogemus, on FWD katsete tulemuste teisendamiseks ühele taustsüsteemile püütud leida aastaajakoeffitsiente, kuid ei ole kunagi õnnestunud, kuna iga aasta, keskkond, tee konstruktsioon jne. on erinevad.

7.3 Tagasiarvutusmeetod

7.3.1 Tagasiarvutusmeetodi arvutuspõhimõte

Teekatendi kihtide omadusi on võimalik hinnata erinevate näitajate kaudu. Üheks enamlevinud näitajaks on kihi elastsusmoodul. Kogemustele tuginedes on võimalik öelda kas konkreetse elastsusmooduliga kiht reaalsel liiklustingimustel ka vastu peab. Konstruktsiooni jäikuse saamiseks võib mõõta seda lihtsalt kihi pealt, kuid reaalses konstruktsioonides on kasutatavam keerukam lähenemisviis, mis arvutab e-moodulid etteantud kihtidele välise jõu poolt tekitatud konstruktsiooni vajumiskõvera kuju põhjal ja mida tavaliselt nimetatakse tagasiarvutuseks (back-calculation). Enamus teooriaid eeldab, et on alati olemas selline kihtide e-moodulite kombinatsioon, mille puhul teoreetiline katendi pinna läbipaine vastab tegelikult tekkinud läbipaindele. Eeldades mingisugust katendi konstruktsiooni, antakse reeglina ette eeldatavad ligikaudsed kihtide (alg)moodulid (enamik arvutusprogramme oskab need ka ise ette pakkuda) ja seejärel arvutatakse erinevate moodulitega proovimise teel läbi kogu tarind kuni teoreetiline (mingisugusest moodulite kombinatsioonist arvutatud) ja FWD'ga mõõdetud tegelik läbivajumine omavahel kokku langevad. Tagasiarvutus algab pinnase mooduli leidmisest. Seejärel arvutatakse sidumata kihtide moodul(id) ja viimasena seotud kihi moodul.

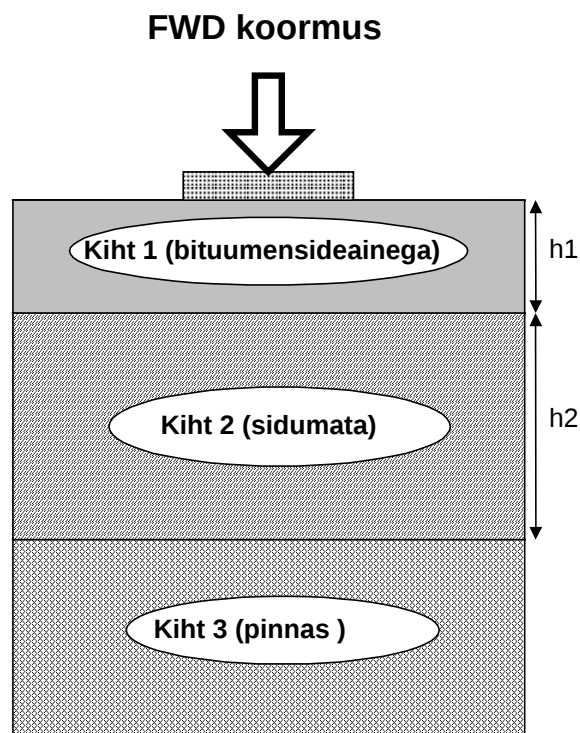
7.3.2 Kihtide arv ja paksus

Vaatamata sellele, et enamuse tarkvarasid vajab arvutuste teostamiseks sisestatavaid kihtide paksusi, suudavad mõned programmid neid leida ka ise - analoogselt elastsusmoodulitega. Üldiselt ei ole need andmed tegelikult usaldatavad. Reeglina on paksused vaja määrata siiski kas ehitusjooniste või geoloogiliste uuringute käigus.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

Paljude tarkvarade puhul soovitatakse ka eri kihtide eeldatavaid e-moodulite suhteid, mille puhul programm annab paremaid tulemusi. Asfaldi kihtide puhul on tavaline soovitus, et selle paksus peab olema vähemalt pool FWD koormusplaadi raadiusest e. tavaliselt üle 75 mm, kui tavaline koormusplaat on 300 mm läbimõõduga. Sellistes tingimustes, kus kriteeriumid ei ole täidetud, hinnatakse õhukeste asfaldikihtide moodul sõltuvalt temperatuurist ja pragunemise astmest. Samuti on soovitatav, et kihtide moodulid suureneksid alt üles.

Erinevad tarkvarad suudavad hakkama saada erineva arvu kihtidega, kuid tavaliselt on kihtide arv piiratud nelja kuni viie kihiga. Sellegipoolest töötavad enamus programme kõige paremini, kui nende kihtide arv on kolm, nagu näha alloleval joonisel. Paljude programmide puhul on nõue, et sarnaste elastsusmoodulitega kihid loetakse üheks, vähendamaks summaarset kihtide arvu. Mõnede programmide puhul nõutakse eeldatavaid elastsusmooduleid juhul, kui kihte on rohkem kui 3. Seda meetodit kasutatakse, kui on olemas kaks sarnast sidumata materjali kihti, millel on väga erinevad elastsusmoodulid. Sageli on aga ka nõudeks, et mudelis oleks ainult üks seotud kiht (AB) ja moodul väheneb märgatavalt konstruktsiooni sügavuse suurenemisega (mõnikord on nõutav suhe $E_i/E_{i+1} > 2$).



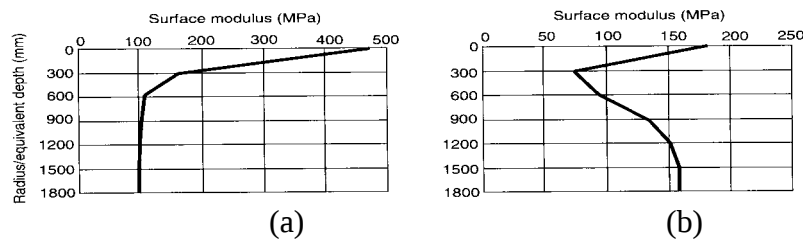
Joonis 16. Tüüpiline 3-kihiline konstruktsiooni mudel COST 336'e järgi.

On ülimalt tähtis, et niisuguste üldistatud (ekvivalentsete) kihtide paksused on määratud võimalikult täpselt. Selle määramiseks on välja töötatud hulk meetodeid: projekti andmed, puurimine, maaradar (GPR) jne.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

7.3.3 Andmete kogumine ja esmatöötlus

Kõik tagasiarvutusprogrammid vajavad andmeid FWD poolt tekitatava koormuse kohta, lisaks on veel tee temperatuuri ning andurite andmed. Tagasiarvutuse puhul on ennustusliku FWD vajumiskõvera valikul lõplike arvutustulemuste suhtes suur tähtsus. Kuna andmeid on suhteliselt palju, saab erandlikud katsete tulemused (näiteks sügavuse suunas suurenevat e-moodulit näitavad tulemused) välja jätta. Tänapäeva arvutivõimsuste juures on võimalik läbi arvutada väga suur hulk vajumiskõveraid lühikese aja jooksul võimaldamaks kiiresti leida mõõdetud andmetega sobiva vajumiskõvera. Samuti peaks olema kasutusel ebanormaalsete läbipainete ülevaatamise mehhanism, mida ka paljud tarkvarad pakuvad (sh. ELMOD). Seda saab saavutada vaadates vastavaid läbipaindediagramme (vt. joonis allpool).



Joonis 17. Moodulite diagrammide näited

Ülaltoodud joonistel näitab (a) kasvavat teekonstruktsiooni ekvivalentset moodulit läbi konstruktsiooni (ekvivalentne sügavus mõõdetakse teekattest). See tähendab, et ülemiste kihtide jäikus on suurem kui alumistel kihtidel. Aluspinnase moodul on antud näites u. 100 MPa. Joonisel (b) on näha konstruktsioon, kus on nn. pehme vahekiht teekatte ja maapinna vahel. Selle näite puhul on pinnase moodul u. 150 MPa ja konstruktsiooni ekvivalentne moodul pehme vahekihi peal on alla 75 MPa.

7.3.4 Vajumiskõverate võrdlemine

Mõõdetud ja ennustatud FWD vajumiskõveraid võrreldakse programmi poolt ja korraldatakse veidi varieeritud algandmetega (kihtide e-moodulitega) kuni kasutaja määratud kokkulangevuse aste saavutamiseni. Mõõdetu ja ennustatu (arvutatud lähenemis- ja/või interpoleerimismeetodil) erinevust saab väljendada erineval moel. Tavapärasemad valemid on toodud allpool:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\delta_{c,i} - \delta_{m,i}|}{\delta_{m,i}} * 100 \% \leq \text{Accuracy Limit } (\%)$$

või

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\delta_{c,i} - \delta_{m,i}}{\delta_{m,i}} \right]^2} * 100 \% \leq \text{Accuracy Limit } (\%)$$

kus

n = andurite arv

$\delta_{c,i}$ = arvutatud deformatsioon andurile i

$\delta_{m,i}$ = mõõdetud deformatsioon andurile i

Kokkulangevuse aste on tavaliselt määratud protsentuaalselt, kuid vahest ka absoluutse kokkulangevuse ühikute kaudu. Reeglina loetakse piisavaks alla nelja protsendilist erinevust. Soovitavalt peaks olema eesmärgiks kaheprotsendiline erinevus, samas ei ole alati võimalik saavutada isegi 4% - eriti juhul, kui on raske sisestada täpseid konstruktiivseid andmeid.

7.3.5 Teetarindi kihtide elastsusmoodulite arvutamine

Konstruksiooni moodul mingi kihi peal sügavuses r , on arvutatav koormusplaadi keskmest kaugusel r asuva anduri registreeritava läbipainde järgi, olles ligikaudu võrdne kogu sellest sügavusest allpool asetsevate konstruktsioonikihtide üldise ehk ekvivalentse e-mooduliga. Ekvivalentne e-moodul sügavuses h_e (kus $h_e = r > 2a$) on arvutatud nagu on näha järgnevas valemis;

$$E_{0(r)} = \left[\frac{(1 - \nu^2) * \sigma_0 * a^2}{r * d_r} \right]$$

kus

$E_0(r)$	katendi ekvivalentne e-moodul ekvivalentsel sügavusel r (MPa)
ν	Poissoni tegur
σ_0	koormusplaadi alune kontaktsurve (kPa)
a	koormusplaadi raadius (mm)
r	kaugus andurist koormusplaadi keskmesse (mm)
d_r	deformatsioon kaugusel r (mm)

Katendi ekvivalentne e-moodul esindab suvalise ühe (sügavuse suunas lõputu) kihina vaadeldavat konstruktsiooniosa. See moodul iseloomustab ekvivalentsest sügavusest r allpool asetsevate kihtide ekvivalentseid moduleid ($h_e = r$)

Kogu katendi ekvivalentne (üldine) e-moodul koormuspaadi keskmisest andurist on seega arvutatav keskmise anduri põhjal ($h_e = r = 0$) järgmise valemiga:

$$E_0 = \left[\frac{2 * (1 - \nu^2) * \sigma_0 * a}{d_r} \right]$$

kus

E_0	kogu katendi ekvivalentne e-moodul
-------	------------------------------------

N-kihi ekvivalentne paksus (ekvivalentne distant tee pinnalt kuni n-kihi enda pinnani) on arvutatav järgneva valemiga:

$$h_{e,n} = f_i \cdot \left[(...((h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} + h_2) \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} + h_3) \dots + h_{n-1}) \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_n}} \right]$$

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

kus

$h_{e, n}$	n-kihi ekvivalentne sügavus, mm
f_i	faktor, $f = 0.8 - 1.0$, sõltuvalt moodulite suhtest, paksusest ja kihtide arvust konstruktsioonis.
h_i	kihi i paksus, mm (kus $i = 1 \dots n$)
E_i	kihi i moodul, MPa (kus $i = 1 \dots n$)

Need valemid baseeruvad Odemarki teorial ja kujutavad endast selle teooria modifikatsioone.

Anduri kauguste jaoks koormusplaadi keskmest, mis on suuremad kui kogu konstruktsiooni ekvivalentne paksus, saab materjali moodul olema ligilähedane aluspinnase enda mooduliga.

8 Elastsetes katendites kasutatavate materjalide omadused

Selle peatüki eesmärgiks on hinnata Eestis kasutatavate teedeehitusmaterjalide tugevuskarakteristikute (määratud VSN-i 46-83 metoodikaga) kasutamise sobivust teiste riikide dimensioneerimismetoodikates.

- tugevuskarakteristikute võrdlus
- erinevuste põhjused
- sobivus riskasutuseks

8.1 Elastsetes katendites kasutatavate materjalide omadused (COST336)

8.1.1 Materjalide tüübid ja omadused

Tavaliselt on elastsete katendite puhul ülemiseks kihiks asfaldikiht. Orgaanilise sideainega (bituumen) töödeldud materjalid (edaspidi lühiduse mõttes BM) on viskoelastsed ja seega jäikus on funktsioon mitmetest tegurist, kaasa arvatud koormamise aeg ja temperatuur. Alati peab olema katse tegemisel olema määratud ka testimise temperatuur. Mõnede tüüpilisemate bituumensideainetega töödeldud materjalide elastsusmoodulid ja Poissoni tegurid COST336 järgi on toodud allolevas tabelis.

Tabel 3. Mõnede bituumensideainega töödeldud materjalide e-moodulid ja Poissoni tegurid

Materjali kirjeldus	Mooduli vahemik (MPa)	Poissoni tegur
Hot Rolled Asphalt Course @ 15C	4 500 - 7 500	0,4
Dense Bitumen Macadam Basecourse @ 15C	4 500 - 7 500	0,4
Hot Rolled Asphalt Roadbase @15C	8 000 - 10 000	0,4
Dence Bitumen Macadam Roadbase @ 15C	7 000 - 10 000	0,4
Dence Bitumen Macadam 50pen Roadbase @ 15C	10 000 - 13 000	0,4
Hevy Duty Macadam Roadbase @ 15C	11 000 - 15 000	0,4
Broken Asphalt Cement @ 20C	1 000 - 6 000	0,25
Dense Rolled Asphalt @ 20C	1 000 - 6 000	0,35
Crushed Stone Rolled Asphalt @ 20C	1 000-12 000	0,35
Märkus: kuna Euronormides ei ole veel välja antud asfaltsegude peatükki, siis koostöös Tallinna Tehnikaülikooliga otsustati bituumensideainega materjalide nimetusi enne mitte tõlkida, kui on teada sõelkõverad, bituumeni sisaldused jne.		

Mineraalse sideainega (harilikult tsement) töödeldud materjalide (TM) kasutamine katendites asfaldikihi all, võivad tekitada tagasiarvutuse puhul teatud probleeme. Sageli omab TM vahekiht kõrgemat e-moodulit kui selle peal oleval BM. Sel põhjusel on niisugustes tarindites BM-l väiksem mõju katendi deformatsioonidele võrreldes konstruktsioonidega, kus tsementstabiliseeritud kiht puudub. Seega peab asfaldi kihile määratlema insenerivaistu põhjal e-mooduli väärtuse ja arvutamisele läheb ainult tsementstabiliseeritud kihi moodul. Asfaldikihi moodulit on vaja määratleda selle tõttu, et

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmis-
tulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

tarkvara ei prooviks automaatselt TM kihist tulenevat jäikust BM kihi arvele panna. Tavaliselt on sellistes tsementstabiliseeritud kihtides probleemiks praod. Selline katkenud kiht põhjustab konstruktsiooni mittehomoogeenset käitumist, eirates enamuse arvutusprogrammide arvutuste eeldusi. Sellistel juhtudel peaks tulemustesse suhtuma ettevaatusega. Mõnede tüüpilisemate tsementsideainetega töödeldud materjalide ja betooni elastsusmoodulid ja Poissoni tegurid COST336 järgi on toodud allolevas tabelis.

Tabel 4. Tsementsideainetega töödeldud materjalide e-moodulid ja Poissoni tegurid

Materjali tüüp	Mooduli vahemik (MPa)	Poissoni tegur
Concrete	30 000 -70 000	0,2
Betoon		
Cement Bound Material (intact)	10 000 - 30 000	0,2
Tsementsideainega töödeldud materjal (monoliit)		
Cement Bound Material (primary cracking)	5 000 - 15 000	0,2
Tsementsideainega töödeldud materjal (pragunenud)		
Cement Bound Material (primary and secondary cracking)	500 -3 000	0,3
Tsementsideainega töödeldud materjal (väga pragunenud)		
Areated Concrete	500 - 5 000	0,15
Poorbetoon		
Fly ash/cement stabilisation	1 500 - 6 000	0,25
Põlevkivituhaga/tsemendiga stabiliseeritud pinnased.		
Sand/cement mortar	2 500 - 7 000	0,2
Liivtsement mört		
Lean concrete	10 000 - 40 000	
Lahja betoon		
Crushed Stone, strongly cemented (Uncracked)	7 000 - 30 000	0,15
Suure tsemendikogusega töödeldud killustik (monoliit)		
Crushed Stone, strongly cemented (Cracked)	500 -3 000	0,35
Suure tsemendikogusega töödeldud killustik (pragunenud)		
Good quality gravel, weakly cemented (Uncracked)	2 000 - 9 000	0,15
Väikse tsemendikogusega töödeldud hea kruus(monoliit)	Keskmine 4 500	
Poor quality gravel, weakly cemented (Uncracked)	2 000 - 6 000	0,15
Väikse tsemendikogusega töödeldud halb kruus(monoliit)	Keskmine 3 000	
Good quality gravel, weakly cemented (Cracked)	160 - 2 000	0,3
Väikse tsemendikogusega töödeldud hea kruus (pragunenud)		
Poor quality gravel, weakly cemented (Cracked)	90 - 1 200	0,35
Väikse tsemendikogusega töödeldud halb kruus(pragunenud)		

Sideainega töötlemata materjalide (SM) omadused on mõnikord sõltuvad surve suuruselt ja seega e-moodulid sõltuvad katsel rakendatud survest, tavaliselt suurenedes suureneva surve puhul. TM kihtide puhul temperatuur tavaliselt ei mõjuta moodulit v.a. juhtudel, kus on tegemist miinuskraadidega. Tavaliselt mõjutab selliste materjalide e-mooduli väärtust oluliselt ka niiskusesisaldus. Samuti võivad mõned SM-d (lubjakivikillustik) tekitada tsementeerumise efekti, mis omakorda mõjutavad kihi jäikust. Mõnede tüüpiliste sideainega töötlemata materjalide elastsusmoodulid ja Poissoni tegurid kindlate koormamistingimuste juures COST336 järgi on esitatud allolevas tabelis.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

Tabel 5. Sideainega töötlemata materjalide elastsusmoodulid ja Poissoni tegurid

	Mooduli vahemik (MPa)	Poissoni tegur
Granular Base (no cementing action) Tsementeerumata sõmermaterjalist alus	200 - 500	0,3
Granular Base (with cementing) Tsementeerunud sõmermaterjalist alus	300 - 2 000	0,3
Granular Sub-base Sõmermaterjalist aluse alumine kiht	50 -200	0,3
Rockfill Kivipuiste	100 - 400	0,3
Sand Liiv	50 - 300	0,35
Mine Spoil Kaevandusjäägid	50 - 300	
Masonry Granulate Tehisliiv	50 -250	
Sand and Gravel Kruusliiv	70 - 300	
Mixed granulate Sõmermaterjalide segud	100 -800	
Concrete granulate Betoonimurd	300 - 1 500	
Crushed stone Killustik	150 - 350	0,3
Capping Layer Uhtekiht	50 - 100	0,45
Wet-mix roadbase Vedelsegu aluskiht	200 - 500	0,45
Sub -base Aluse alumine kiht	50 -150	0,35
Sand Liiv	30 - 150	0,15
Gravel base (MC dependent) Kruusalus (niiskusest sõltuv)	100 - 375	0,4
Granural base Sõmermaterjalist alus	50 - 300	0,35
Gravel sub-base (MC dependent) Kruusast aluse alumine kiht (niiskusest sõltuv)	50 - 300	0,4

Paljud pinnaste omadused on tundlikud neile rakendatava jõu suhtes ning väga suurt rolli mängivad materjalide omadustes nende niiskustingimused. On tehtud uurimusi, et leida seoseid pinnase mooduli ja teiste hästituntud parameetrite vahel nagu CBR. Reeglina on seoste leidmine ebaõnnestunud. Mõnede tüüpilisemate pinnaste elastsusmoodulid ja Poissoni tegurid COST336 järgi on toodud allolevas tabelis.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

Tabel 6. Pinnaste materjalide moodulid ja Poissoni tegurid COST 336'es.

Pinnas	Mooduli vahemik (MPa)	Poissoni tegur
Clay subgrade Savipinnas	30 - 150	0,4
Clay Savi	20 - 80	0,4
Peat Turvas	10 - 40	0,45
Clay, very soft Väga pehme savi	2 - 15	0,5
Clay, soft Pehme savi	5 - 25	0,45
Clay, medium Keskmiste omadustega savi	15 - 50	0,35
Clay, hard Kõva savi	50 - 100	0,1
Clay, sandy Liivane savi	25 - 250	0,2
Sand, silty Tolmjas liiv	7 - 21	0,35
Sand, loose Tihendamata liiv, puisteliiv	10 - 24	0,25
Sand, dense Tihendatud liiv	50 - 80	0,15
Sand and gravel, loose Liiv ja kruus, tihendamata	50 - 140	0,35
Sand and gravel, dense Liiv ja kruus, tihendatud	100 - 200	0,35
Silt Tolm	2 - 20	0,3

8.2 Eesti ja Euroopa tugevuskarakteristikute võrdlus

Eestis kasutatavad tugevuskarakteristikud on määratud 15. novembril 2001 aastal Maanteeametis välja antud peadirektori käskkirjaga nr. 143 [6], mis omakorda põhineb "Teekatendite ehitusmaterjalide ja pinnaste tugevuskarakteristikute täpsustamise" tehnilise nõupidamise protokollil. Karakteristikud on VSN 46-83 põhised.

Läänes kasutatavateks karakteristikuteks on võetud Euroopa Liidu 2002 aastal ilmuva COST 336 paragrahvis 4.4 toodud soovituslikud piirangud.

VSN-i põhised karakteristikud sisestatakse otseselt katendi dimensioneerimise arvutustesse, samas kui COST 336'e karakteristikud on mõeldud kontrollimaks tagasiarvutuse tulemusi. Järgnevalt on ära toodud Eestis kehtivad sideainetega töödeldud kihtide elastsusmoodulite väärtused ning COST 336 väljapakutud vahemikud. Materjalid ei kattu täielikult ning selle tõttu ei ole vastavalt välja toodud kõiki ühes või teises süsteemis pakutavaid materjale.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

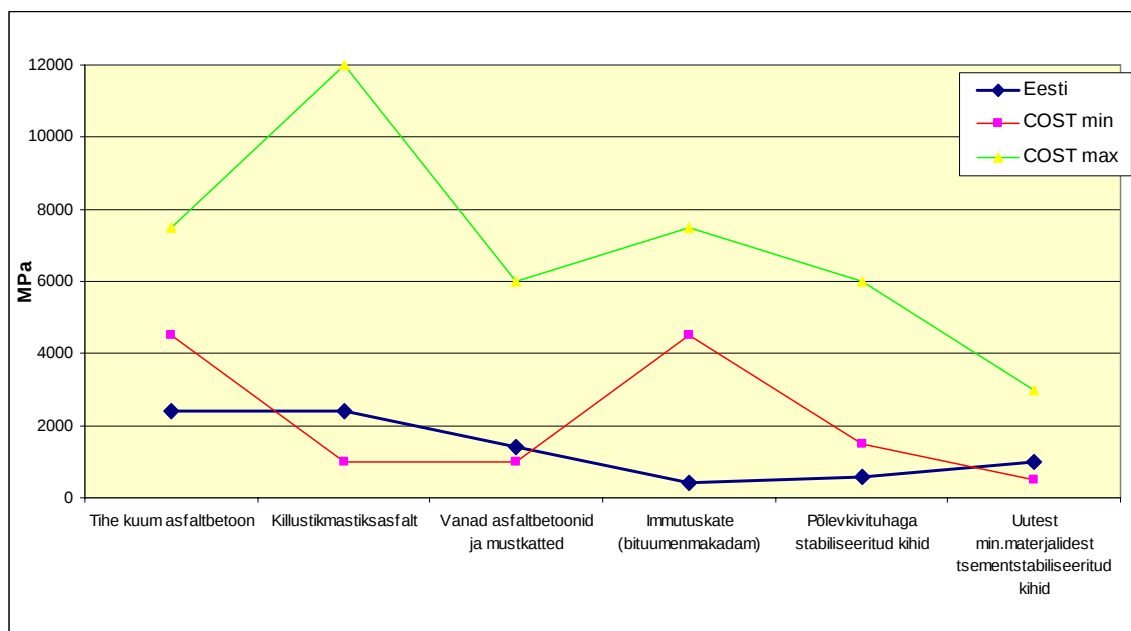
Tabel 7 . Eestis ja Euroopa Liidus (COST 336) kasutatavad e-moodulid

Materjali nimetus	Moodul Eestis +10oC*	Moodul Euroopas +15°C**
Tihe kuum asfaltbetoon	2400 MPa	4500-7500 MPa
Killustikmastiksasfalt	2400 MPa	1000-12000 MPa
Vanad asfaltbetoonid ja mustkatted	1400 MPa	1000-6000 MPa
Mustkillustikust kiht kiilumismeetodil	800 MPa	4500-7500 MPa
Põlevkivituhaga stabiliseeritud kihid	600 MPa	1500-6000 MPa
Uutest min.materjalidest tsementstabiliseeritud kihid	1000 MPa	500-3000 MPa
Lubja- ja tardkivikillustikust kate ja alus	400 MPa	150-350 MPa
Optimaalse terastikuga kruusliiv	180 MPa	70-300 MPa
Liiv (keskliiv)	120 MPa	50-300 MPa
Reakillustikust kiht	250 MPa	200-500 MPa
Jäme kerge saviliiv	65 MPa	25-250 MPa

* MA 15 nov. kk. põhjal

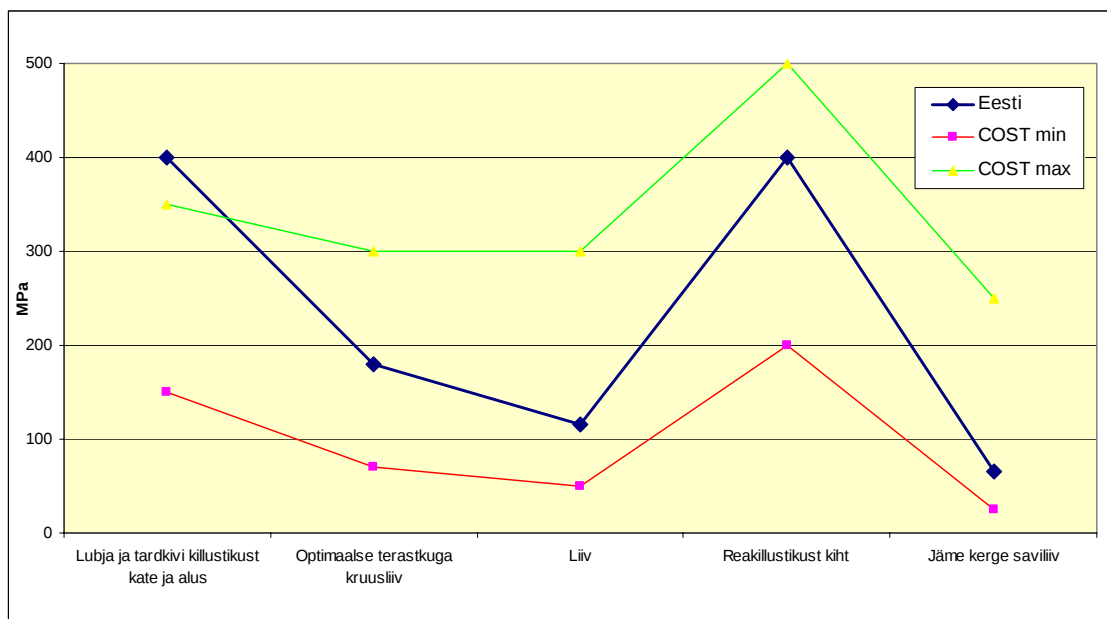
** COST 336

Kasutatavate materjalide moodulite võrdlevast tabelist on näha, et ainult lubja- ja tardkivikillustiku moodul on Eestis kasutatavate karakteristikute puhul suurem Euroopas kasutatavatest moodulitest. Ilmselt tuleks lubja- ja tardkivikillustikku vaadelda eraldi. COST'is toodud elastsusmooduli väärtused on võrreldes Eestis kasutatavate vastavate moodulitega üldjuhul suuremad – kuni 10 korda.



Joonis 18. Eestis (VSN) ja Euroopa Liidus (COST 336) kasutatavate sideainetega töödeldud kihtide e-moodulite võrdlus

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.



Joonis 19. Eestis (VSN) ja Euroopa Liidus (COST336) kasutatavate sideainetega töötlemata kihtide e-moodulite võrdlus

Toodud graafikutelt on näha, et sideainetega töötlemata kihtide Eestis kasutatavad VSN-järgsed e-moodulid enamasti asetuvad COST 336 poolt esitatud soovitusliku piirkonna keskele, sideainetega töödeldud kihtide puhul jäävad aga COST 336 alumise piiri lähedusse.

8.3 FWD ja VSN-põhiste e-moodulite erinevuste põhjused

E-moodulite näol on tegemist materjale iseloomusava tuletatud suurustega, mille väärtused sõltuvad väga erinevatest teguritest. Samas ei oma e-moodulite võrdlemine ilma arvutusmudeleid vaatlemata olulist mõtet. Nii Eestis kasutatavad (VSN-põhised) kui FWD-põhised (COST'i normeeritud) e-moodulid on kinnitatud kogemuslikult ega oma üheselt selgitatavat matemaatilist sisu. Olgu toodud mõned tähelepanekud FWD ja VSN e-moodulite väärtuste erinevuse põhjuste kohta:

- erinev temperatuur
- erinev koormamiskestus
- erinev materjali struktuur
- materjali erinevad töötingimused
- erinev kontaktsurve ja pindala
- Poissoni teguri erinev käsitus
- erinev määramise tehnoloogia
- VSN'i puhul on e-mooduliks arvutuslik nõrgim
- muude (erinevate) koefitsientide erinev kasutamine

Kahe eri viisil kasutamiseks optimeeritud kogemuslikku näitajat saab omavahel siduda ainult kogemuslikult. Olgugi, et küllalt suure arvu süstemaatiliste katsete juures on võimalik tuletada mõningasi matemaatilisi seoseid ei ole looduslikku mitmekesisist sajaprotsendiliselt siiski tõenäoline matemaatiliselt selgitada.

8.4 VSN 46-83 võrdlus teiste riikide dimensioneerimismetoodikatega

VSN 46-83 ja teiste riikide arvutusmetoodika põhjalik võrdlus eeldab nende dimensioneerimismetoodikate põhjalikku tundmist. See aga tähendab pikaajalist teadustöö- ja projekteerimiskogemust, mis omakorda tähendab seda, et niisugune töö eeldab rahvusvahelist, kõrgelt motiveeritud riiklikest huvidest sõltumatut, kõrge teaduspotsiaaliga rahvusvahelise projekteerimiskogemusega töögruppi. Siiski, väheusutav, et lähiajal niisugune töögrupp kokku saadakse ja üleeuroopalised dimensioneerimismetoodika välja töötatakse. Teema on ülimalt laialivalguv ja keeruline.

Kliimaatiliselt ja pinnase tõttu ei osutu võrdluseks sobilikuks kaljuste pinnastega ja liiga palju lõunas asuvate maade dimensioneerimismetoodikad. Sarnase pinnasega ning kliimaatiliselt lähedased maad on Läti, Leedu ja Taani.

Et Lätis on VSN 46-83 ja teiste riikide arvutusmetoodika võrdlus juba tehtud, mille tulemusena võeti kasutusele uus dimensioneerimismetoodika, peaks see kogemus olema meile sobiv arvessevõtmiseks, kuivõrd tegu on sarnastes kliimaatilistes ja geoloogilise-looduslikes tingimustes geograafiliselt lähedal asuva riigiga. Siinkohal olgu toodud Läti vastava uuringu põhjal tehtud otsus:

- arvestades suurt vajalikku kogemust teede projekteerimisel, oleks kõige optimaalsemaks alternatiiviks kasutada Saksamaa rahvusliku teede taastamise komitee poolt loodud teedekonstruksiooni tüüpkatalooge.
- Seejärel see informatsioon sisestada SEGA tarkvarasse, mis omakorda lähtub AASHTO DPS-93-est.

Seega on Lätis tehtud kombineeritud USA ja Saksamaa ühendatud meetod, mille tarvis 2001 aastal leiti katselõikude kaudu sobivamad kohalikud parameetrid. FWD on kõrvale heidetud järgmise põhjendusega: “FWD andmebaaside info on mõttetu, kuna meil ei ole kihtide paksuste kohta adekvaatset informatsiooni igas FWD mõõtepunktis. Parem situatsioon oleks saavutatav, kui me saaksime kasutada GPR infot. Hetkel on siiski parim lahendus sügavad puuraugud, kust saame detailset informatsiooni kihtide paksuste ja niiskusesisalduste kohta.”

Samas on Läti kogemus uue meetodi kasutamisel suhteliselt väike, mistõttu reaalsest võrdlusest saame rääkida alles mõne aasta pärast, kõrvutades uut ja endist kogemust. Ülesehituselt on meetod lihtne, st. suhteliselt lihtsalt määratavate parameetrite põhjal dimensioneeritakse vajalikud uued kihid. Samas ei välista see siiski vajadust uuringute järele – st. remondimeetodi valiku küsimus jääb ka siin lahtiseks.

Võrreldes olukorraga Lätis, meil Eestis:

- puudub AASHTO-l põhinev SEGA tarkvara ning kogemus sellega tööks
- meil on olemas maaradar koos vajaliku tarkvara ja inimestega
- meil on olemas põhjalik FWD andmebaas

Seega on siiani uute teede dimensioneerimiseks Eestis sobivaimad programmid VSN'i suhteliselt korrektselt järgiv Ukrainas välja töötatud CREDO ning Tehnokeskuses

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

väljatöötatud VSN'i põhine programm VSN-Excel versioon 0.9. Viimase eelised CREDO ja teiste Eestis loodud VSN'i põhiste programmide ees on:

- suur kogemus ja selle põhjal ka usaldatavus,
- Windowsi keskkond ja
- eesti keel.

Samas tuleb aga tõdeda, et nn. nomogrammide interpreteerimine kahe valemiga pole VSN-Exceli versioonis 0.9 kõige paremini õnnestunud ja programm vajab selles osas kohendamist. Praegusel kujul tuleb arvestada teatud kihipaksuste puhul sisseprogrammeeritud erinevusega võrreldes VSN-iga (ehk VSN-mõistes on tegu veaga). Hetkel tuleb seda asjaolu arvutustel silmas pidada ja arvutustulemusi kogemuslikult korrigeerida.

Olemasolevate teede uuringutel on Taanis valdavalt kasutusel FWD-mõõtmistel, puuraukudel või maaradari-infol põhinevaid tagasiarvutusprogramme. Kõige paindlikum neist on ELMOD, mis võimaldab saadud andmetega dimensioneerida ka ülekatte.

Tabel 8. VSN ja FWD matemaatilised ja praktilised erinevused.

Omadus	VSN	FWD
Katse kestus (koormamisaeg)	0,1 sek	ca 0,02 sek
ratta kontaktsurve/löögijõud	0,6 MPa	0,7 MPa
arvutuslik koormuspinna/plaadi läbimõõt	37 cm	30 cm
Poissoni tegur	0,3	0,35
temperatuur	10°C	0~50°C

Koormamiskestuse redutseerimiseteguriks on hr. Ants Vaimel [13] VSN'i põhjal pakkunud välja järgmist seost:

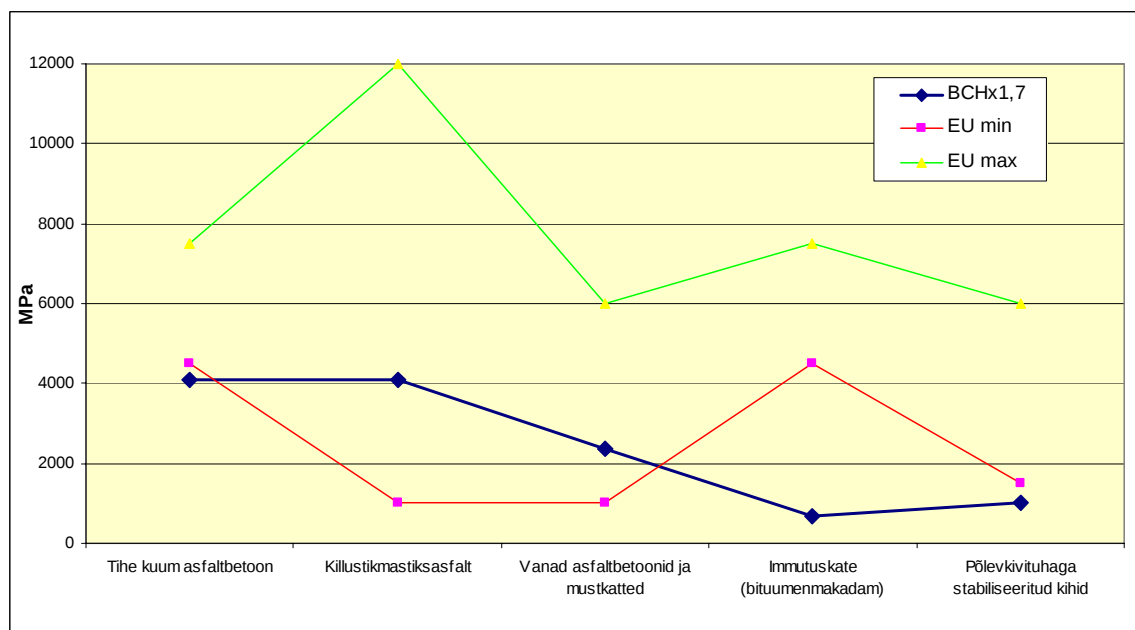
$$K_k = (0,1/t)^{0,33}$$

kus t – on FWD 8000 koormamiskestvus ehk

$$K_k = (0,1/0,02)^{0,33} = 1,700826843$$

Korrutades VSN-i sideainetega töödeldud materjalide moodulid läbi 1,7-ga saame juba ligilähedasemad elastsusmoodulid, mille puhul jäävad siiski arvestamata koormuste kontaktsurve ja pindalade erinevus ning Poissoni tegurite erinevused:

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.



Joonis 20. Redutseeritud VSN moodulite väärtused võrdluses COST 336 väärtusega.

Elastusmooduli põhivalem (parameetrid erinevad FWD ja VSN-i puhul) on järgmine:

$$E = K_p \cdot p \cdot D \cdot K_{\text{temp}} / s,$$

kus

K_p – arvestab Poissoni tegurit,

p – plaadi ja katsetatava kihi kontaktpinna erisurve (MPa),

D – plaadi läbimõõt (vahel asendatud $2r$) 'iga (mm)

s – vajum plaadi all (mm)

K_{temp} – temperatuuriparandusetegur elastusmooduli taandamiseks arvutuslikule temperatuurile

8.4.1 Poissoni tegurit, kontaktsurvet ja kontaktpinna erinevusi arvestava kordaja leidmine.

Kuna FWD katsete tulemusi arvutatakse tagasiarvutusprogrammides Odemarki meetodi kohaselt, tuleks leida (muutes katsete käigus erinevustega parameetrite väärtusi) e-moodulite üleminekukordajad, mis taandaksid need erinevused. Kahjuks ei ole võimalik ELMOD'ist ega ka VSN 46-83 põhiseist CREDO'st valemide kätte saada ja ka sisestada vastavaid parameetreid, et selliseid katseid läbi viia.

Seda probleemi on võimalik ületada arvutades teadaolevate Odemarki valemitega lõpptulemusest (kihtide paigutistest) tagasi lähteandmete (kihtide e-moodulite) poole. Selline arvutus jälgendaks ELMOD'i teostatavat tagasiarvutust ehk FWD mõõdetud paigutise kaudu konstruktsiooni kihtide e-moodulite leidmist. Ainuke erinevus tagasiarvutusega on selles, et ei leita mitte koguläbipainde põhjal kõikide kihtide mooduleid, vaid iga kihi läbipainde põhjal vastava kihi moodul.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmis-
tulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

Vigade vältimiseks ning suurema arvu katsete teostamiseks loodi Teede Tehnokeskuses vastav Odemarki valemil põhinev tarkvara, mis võimaldab arvutada (pinnase kihti kaasa arvates) 3 ja 4 kihilist konstruktsiooni. Kuna eesmärk oli Poissoni teguri, kontaktsurve ja kontaktpinna mõju arvestava Odemarki meetodil põhineva tarkvara loomine, siis need parameetrid on tarkvaras kasutaja määrata. Odemarki teooria loodi algselt 3 kihilise konstruktsiooni jaoks ja selle tõttu objektiivsema tulemuse saavutamiseks valitigi näitlikuks konstruktsiooniks seda tüüpi tarind. Katsete käigus muudeti vastava kihi läbipainet ning teostati tagasiarvutus, saamaks teada milline peaks sellise paigutise korral olema vastava kihi e-moodul. Hõlbustamaks arvutusi võrreldi FWD ja VSN kogu kolme näitaja komplekti korraga (koormusraadius, kontaktsurve ja Poissoni tegur; vt. ka tabel 8) ning muudeti konstruktsiooni kihtide läbipaindeid. Allolevalt jooniselt on näha üks arvutusnäide nii FWD parameetritega kui ka VSN'i parameetritega. Parameetrid on antud tarkvaras toodud paremal üleval nurgas. Ülemine arvutusnäide on FWD parameetritega ja alumine VSN'i parameetritega.

3						FWD	
Konstruktsiooni sisestatavad andmed:						Koormusraadius	150 mm
Materjalid:	kihi paksus	E moodul					
Vana A/B	h1= 150 mm	3000 Mpa	Kontaktsurve:	0.7 Mpa			
Peenliiv	h2= 300 mm	300 Mpa	Poissoni tegur:	0.35			
Pinnas		50 Mpa					
Arvutus: 1. Asfaldikihi alused horisontaalpinged						2. Pinnase vertikaalpige:	
he2=	323.1652035 mm		he4=	905.8931 mm			
δz=	0.177608751 Mpa		δz=	0.027832 Mpa			
εz=	594.2910296 μ pinge		1 kihi paigutis:	0.022143 mm		Paigutised/	0.65803
σz=	-209.3105005 μ pinge		2 kihi paigutis:	0.102829 mm		kokku:	(mm)
			pinnase paigutis:	0.533058 mm			
3						VSN	
Konstruktsiooni sisestatavad andmed:						Koormusraadius	185 mm
Materjalid:	kihi paksus	E moodul					
Vana A/B	h1= 150 mm	3000 Mpa	Kontaktsurve:	0.6 Mpa			
Peenliiv	h2= 300 mm	300 Mpa	Poissoni tegur:	0.3			
Pinnas		50 Mpa					
Arvutus: 1. Asfaldikihi alused horisontaalpinged						2. Pinnase vertikaalpige:	
he2=	323.1652035 mm		he4=	905.8931 mm			
δz=	0.207811625 Mpa		δz=	0.035669 Mpa			
εz=	694.3728757 μ pinge		1 kihi paigutis:	0.020808 mm		Paigutised/	0.834427
σz=	-209.7569928 μ pinge		2 kihi paigutis:	0.119492 mm		kokku:	(mm)
			pinnase paigutis:	0.694127 mm			

Joonis 21. Tehnokeskuse Odemarki tarkvara VSN ja FWD parameetritega 3 kihilise konstruktsiooni näited.

Järgnevas arvutusnäites toimus kalkulatsioon joonisel 21 toodud FWD näites olevate andmete põhjal Odemarki meetodil.

I: arvutatakse horisontaalpinged bituumensideainega töödeldud kihi alumises osas
(Ainuke joonisel 21 mitte näha olev väärtus on konstant “f” järgnevas valemis):

$$h_{e2} = f \cdot h_1^3 \sqrt{E_1/E_2} = 1,0 \cdot 150^3 \sqrt{3000/300} = 323 \text{ mm}$$

Kus f – kihtidele arvule vastav konstant, mille väärtus mitmekihilise konstruktsiooni katte puhul on 1,0 ja alumistele kihtide puhul 0,8 (v. t. h_{e3})
 h_1 – esimese kihi paksus (mm)
 E_1 ja E_2 – vastava kihi elastsusmoodulid (MPa)

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

$$\sigma_z = 0.7 \times \left[1 - \left\{ 1 + \left(\frac{150}{323} \right)^2 \right\}^{-1.5} \right] = 0.178 \text{ MPa} \quad (0.194 \text{ MPa})$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1+.35) \times 0.7}{300} \left[\frac{323}{150} \times \left(1 + \left(\frac{323}{150} \right)^2 \right)^{-1.5} - (1 - 2 \times .35) \left(\frac{323}{150} \times \left(1 + \left(\frac{323}{150} \right)^2 \right)^{-0.5} - 1 \right) \right] =$$

$$595 \text{ } \mu\text{strain} \quad (657 \text{ } \mu\text{strain})$$

$$\varepsilon_r = \left[\frac{1-.35}{2 \times .35} (.178 - 300 \times 595 \times 10^{-6}) - .35 \times .178 \right] / 300 = -210 \text{ } \mu\text{strain} \quad (-237 \text{ } \mu\text{strain})$$

II: Vertikaalsurve aluskihis:

$$h_{e,3} = 0.8 \times (323 + 300) \times \sqrt[3]{\frac{300}{50}} = 906 \text{ mm}$$

$$\sigma_z = 0.7 \times \left[1 - \left\{ 1 + \left(\frac{150}{906} \right)^2 \right\}^{-1.5} \right] = 0.028 \text{ MPa} \quad (0.030 \text{ MPa})$$

III: Paigutised.

Katte paigutis:

$$\frac{(1+.35) \times .7 \times 150}{3000} \left[2(1-.35) - \left\{ \left(1 + \left(\frac{150}{150} \right)^2 \right)^{-0.5} + (1 - 2 \times .35) \left(\left(1 + \left(\frac{150}{150} \right)^2 \right)^{0.5} - \frac{150}{150} \right) \right\} \right] =$$

$$0.022 \text{ mm}$$

II kihi paigutis:

$$\frac{(1+.35) \times 0.7 \times 150}{300} \left[\left\{ \left(1 + \left(\frac{323}{150} \right)^2 \right)^{-0.5} + .3 \left(\left(1 + \left(\frac{323}{150} \right)^2 \right)^{0.5} - \frac{323}{150} \right) \right\} - \left\{ \left(1 + \left(\frac{623}{150} \right)^2 \right)^{-0.5} + .3 \left(\left(1 + \left(\frac{623}{150} \right)^2 \right)^{0.5} - \frac{623}{150} \right) \right\} \right] = 0.103 \text{ mm}$$

Aluspinnase paigutis:

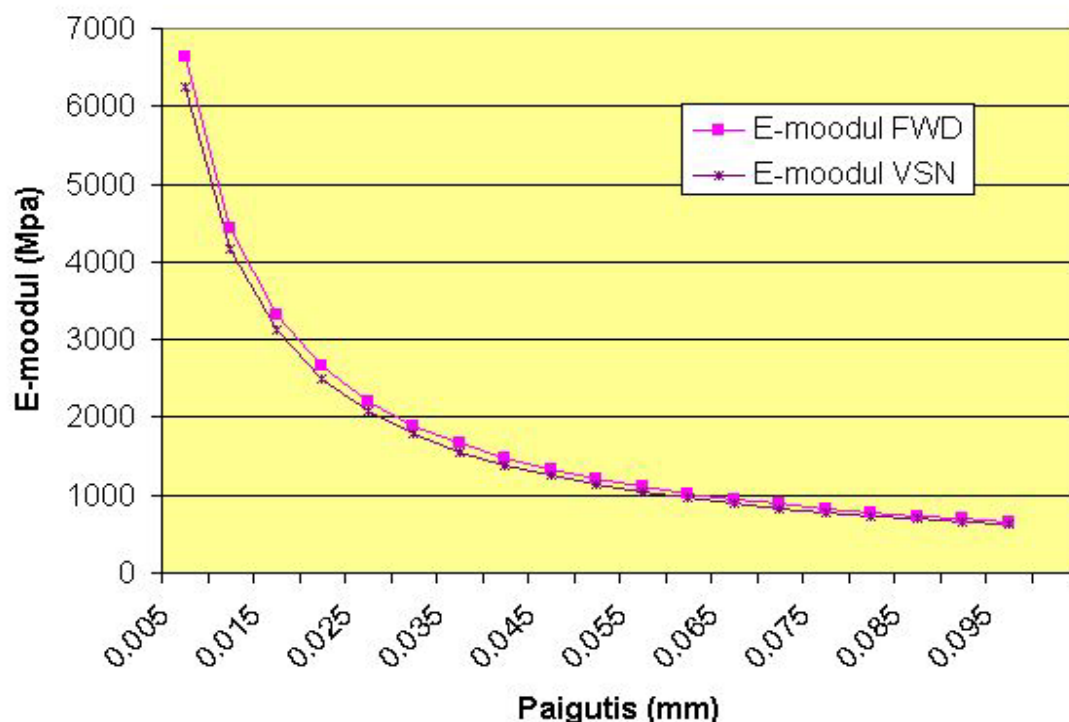
$$\frac{(1+.35) \times .7 \times 150}{50} \left[\left\{ \left(1 + \left(\frac{906}{150} \right)^2 \right)^{-0.5} + (1 - 2 \times .35) \left(\left(1 + \left(\frac{906}{150} \right)^2 \right)^{0.5} - \frac{906}{150} \right) \right\} \right] = 0.533 \text{ mm}$$

Paigutised kokku: $0.022 + 0.103 + 0.533 = 0.658 \text{ mm}$ (tarkvara annab vastavaks väärtuseks 0.65803 mm - joonis 21)

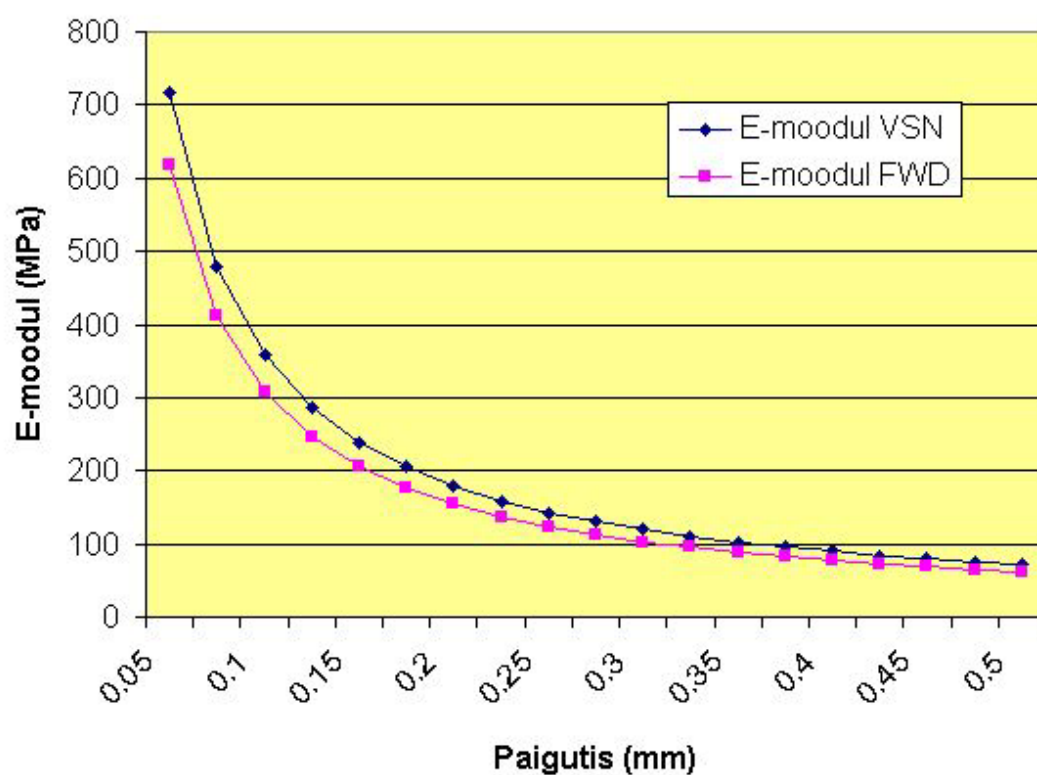
Seejärel leiti Exceli võimalusi kasutades (tehes arvutuskäiku tagurpidi ehk leiti lõpptulemusest alg tulemust) etteantud kihi paigutisele vastav kihi moodul.

VSN'iga ei saa analoogset katseteseeriat läbi viia, kuna materjalide elastsusmoodulid on määratud vastavalt temperatuurile, mitte ei sõltu näiteks Poissoni tegurist, koormusraadiusest ja kontaktsurve. Järgnevatel graafikutel on toodud arvutustulemused.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.



Joonis 22. Sideainega töödeldud kihtide Poissoni teguri, kontaktsurve ja koormusraadiuse erinevustest põhjustatud e-mooduli ja paigutiste sõltuvuste erinevuste võrdlus.



Joonis 23. Sideainega töötlemata kihtide Poissoni teguri, kontaktsurve ja koormusraadiuse erinevustest põhjustatud e-mooduli ja paigutiste sõltuvuste erinevuste võrdlus.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

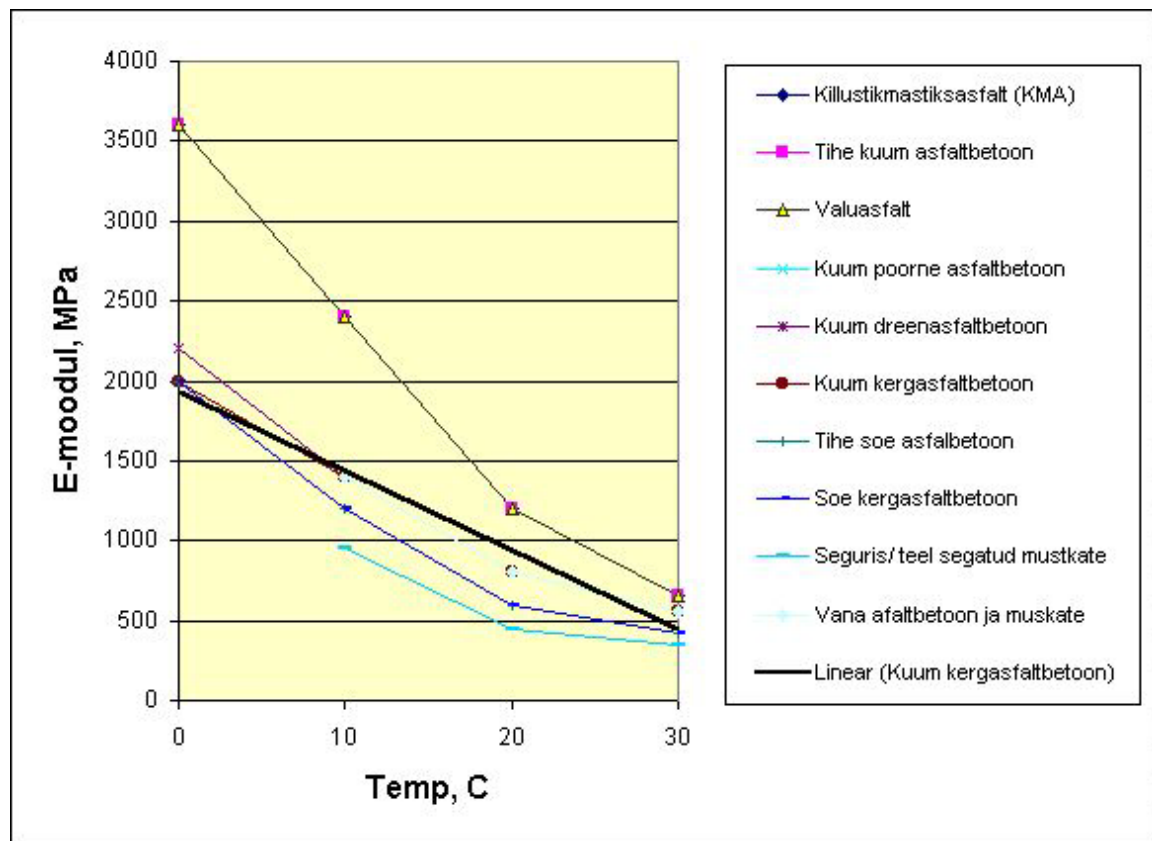
Tehti Odemarki meetodil 20 katset sideainega töödeldud ja 20 töötlemata kihtidega. Arvutus toimus tavapärasest meetodist erinevalt paigutise kaudu e-mooduli leidmise eesmärgil. Elastsusmooduli ja paigutise sõltuvuse analüüsil selgus, et Poissoni teguri, kontaktsurve ja koormusraadiuse erinevustest tingituna sideainega töödeldud materjalide e-moodul tuleb FWD e-moodulite võrreldes VSN'i pakutavate näitajate puhul väiksem ning sideainega töötlemata kihtide puhul suurem. Sideainega töötlemata kihtide e-mooduli üleminekutegur Odemarki FWD väärtustelt VSN'i taustsüsteemi on **1,16** ja sideainega töödeldud kihtide e-mooduli üleminekutegur Odemarki FWD väärtustelt VSN'i metoodikasse on **0,94** (Lisa1).

Sideainega töödeldud ja töötlemata kihtide vastupidine tulemus oli tingitud sellest, et Odemarki teooria järgi koormusraadiuse suurenemine jätab ligilähedaselt samaks sideainega töödeldud kihtide läbipainde ja vähendab tugevalt sideaineta kihtide läbipainet. Teine põhjus on see, et väiksem Poissoni tegur vähendab tugevalt sideainega töödeldud kihtide läbipainet ning vähendab suhteliselt vähe sideainega töötlemata kihtide läbipainet. Kontaktsurve vähenemine mõjutab Odemarki teoorias mõlemat tüüpi materjale suhteliselt vähe.

8.4.2 Temperatuuri-kordaja leidmine.

Analoogselt teiste tabel 8 toodud erinevustega, oleks vajalik ka temperatuuri puhul leida ülemineku kordaja, mis redutseeriks tee temperatuuril mõõdetud elastsusmoodulid VSN'is arvutuslikule 10°C e-moodulile (MPa). Kuna orgaanilise sideainega töödeldud katte temperatuuritundlikkus sõltub, nii materjali terastikulisest koostisest kui bituumeni margist, võib (toetudes Maanteeameti 15. novembri käskkirjale ning VSN'ile, kus on antud materjalide vastavad elastsusmoodulid 0,10 ja 20°C juures, MPa) igale materjalile oma temperatuurisõltuvuse graafiku tuletada. Kuna 15. novembri käskkirjas on antud vaid moodulid 0, +10 ja +20°C juures kasutati ka VSN'is olemasolevate materjalide puhul seal antud mooduleid 30°C juures.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.



Joonis 24. Maanteeameti peadirektori 15.novembri käskkirjas toodud sideainetega töödeldud materjalide elastsusmoodulite sõltuvus temperatuurist.

Sobivaks osutus vaikimisi kasutada joonis 24'l toodud temperatuurisõltuvusi ELMOD'i arvutustulemuste töötusel, kuna enamus tagasiarvutustarkvarasid (k.a. ELMOD) eeldab, et iga kasutaja sisestab ise temperatuuri sõltuvuse. Teiseks ei ole Lääne kirjanduses üldtunnustatud temperatuuri ja e-mooduli sõltuvuse graafikut, millele saaks analoogselt Odemarki teooriale toetuda. Lisaks puudub Odemarki valemite temperatuuri parameeter, mida muutes oleks saanud leida vastavad sõltuvused.

Järgnevas tabelis tähistab E1 sideainega töödeldud kihtide elastsusmooduleid arvutamisel elastsele deformatsioonile ehk materjali elastsusmoodul +10°C juures ja E_{temp} vastaval tee temperatuuril mõõdetud e-moodulit.

	10°C üleminekuvõrrand	Ruutkeskmine hälve R^2
Killustikmastiksfalt (KMA):	$E1 = (3600 - E_{temp}) / 120$	1
Tihe kuum asfaltbetoon ja valuasfalt:	$E1 = (3468 - E_{temp}) / 100.3$	0.9746
Kuum poorne asfaltbetoon ja kuum drenasfaltbetoon:	$E1 = (2068 - E_{temp}) / 55.2$	0.9503
Kuum kergasfaltbetoon:	$E1 = (1928 - E_{temp}) / 49.2$	0.9689
Tihe soe asfaltbetoon ja soe kergasfaltbetoon	$E1 = (1856 - E_{temp}) / 53.4$	0.9354
Seguris/ teel segatud mustkate:	$E1 = (1183 - E_{temp}) / 30$	0.871
Vana asfaltbetoon ja mustkate:	$E1 = (1760 - E_{temp}) / 42$	0.9423

Tabel 9. Sideainega töödeldud materjalide +10°C temperatuuri-üleminekuvõrrandid ja ruutkeskmised hälbed, millest on identsed võrrandid välja jäetud.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

Kuna kuueteistkümnest Maanteeameti 15. novembri käskkirjas pakutavast materjalist on 10'nele pakutud elastsusmoodulit erinevatel temperatuuridel, siis kolmandik materjalidest jääb väljaspool eeltoodud võrrandeid. Samas on välja jäänud materjalide sideainesisaldus väiksem ja seega need materjalide omadused sõltuvad vähem temperatuurist.

8.4.3 FWD-VSN üleminekukordaja.

FWD katsetel ja Odemarki teorial põhineva ELMOD programmi ja VSN arvutusmetoodikal on palju erinevusi, kuid suuremad erinevused on: Katse kestus (koormamisaeg), ratta kontaktsurve/löögi jõud, arvutuslik koormuspinna/plaadi läbimõõt, Poissoni tegur ja temperatuur (tabel 8)

Eelnevates peatükkides üritati leida FWD-ELMOD arvutatud e-moodulite erinevate näitajate üleminekutegureid VSN taustsüsteemi:

- Katse kestuse üleminekuteguriks (K_k) leiti punktis 7.5 VSN'i pakutava valemiga järgnev kordaja :

$$K_k = 1,700827$$

- Ratta kontaktsurve, koormusplaadi läbimõõdu ja Poissoni teguri üleminekutegur leiti Odemarki teooriale toetudes (lisa 1) sideainega töödeldud (S_t) ja töötlemata (S_{tm}) materjalidele eraldi:

$$\text{Sideainega töötlemata kihtide üleminekutegur} - S_{tm} = 1,16$$

$$\text{Sideainega töödeldud} - S_t = 0,94$$

- Seejärel tuli leida erinevatele bituumensideainetega töödeldud materjalidele vastavad e-moodulite üleminekuvõrrandid FWD katsel esinenud temperatuurilt (E_{temp}) (mis redutseeriti eelnevalt katte keskmiseks temperatuuriks) arvutuslikule e-mooduli (E_1) $+10^\circ\text{C}$ temperatuurile:

$$\text{Killustikmastiksasfalt (KMA):} \quad E_1 = (3600 - E_{temp}) / 120$$

$$\text{Tihe kuum asfaltbetoon ja valuasfalt:} \quad E_1 = (3468 - E_{temp}) / 100.3$$

$$\begin{array}{l} \text{Kuum poorne asfaltbetoon ja} \\ \text{kuum drenasfaltbetoon:} \end{array} \quad E_1 = (2068 - E_{temp}) / 55.2$$

$$\text{Kuum kergasfaltbetoon:} \quad E_1 = (1928 - E_{temp}) / 49.2$$

$$\begin{array}{l} \text{Tihe soe asfaltbetoon ja} \\ \text{soe kergasfaltbetoon:} \end{array} \quad E_1 = (1856 - E_{temp}) / 53.4$$

$$\text{Seguris/ teel segatud mustkate:} \quad E_1 = (1183 - E_{temp}) / 30$$

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmis-
tulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

Vana asfaltbetoon ja mustkate:

$$E_{17} = (1760 - E_{\text{temp}}) / 42$$

Kui eelnevaid kõiki parandustegureid arvesse võtta siis saame järgmist kahte tüüpi FWD-ELMOD arvutatud e-moodulite üleminekuvõrrandid VSN taustsüsteemi:

Sideainega töödeldud materjalide jaoks:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{\text{FWD-ELMOD}} / (K_k * S_{\text{tm}} * E_{1i}) = \\ &= E_{\text{FWD-ELMOD}} / (1,70083 * 1,06420 * E_{1i}); \\ E_1 &= (0,55248 * E_{\text{FWD-ELMOD}}) / (E_{1i}) \end{aligned}$$

ja sideainega töötlemata materjalide jaoks:

$$\begin{aligned} E_1' &= E_{\text{FWD-ELMOD}} / (K_k * S_{\text{tm}}) = E_{\text{FWD-ELMOD}} / (1,70083 * 0,86139); \\ E_1' &= (0,68256 * E_{\text{FWD-ELMOD}}) / (E_{1i}) \end{aligned}$$

Eelnevad võrrandid on loodud baseerudes teooria võimalustele. Jooniselt 19 on näha, et VSN e-moodulid on FWD e-moodulitest väiksemad. See avaldub ka üleminekuvõrrandites, mille arvutuses nii sideainega töödeldud, kui töötlemata materjalide moodulid kaotavad oma algsest väärtusest. Maailmapraktikas on mainitud, et tagasiarvutusprogrammis kipuvad ülehindama sideainega töödeldud kihtide mooduleid ja alahindama sideainega töötlemata kihtide mooduleid. Seda on näha ka eeltoodud üleminekukordajate juures, kus sideainega töödeldud materjali kaotab oma algväärtusest rohkem, kui sideainega töötlemata materjal.

Need valemid on teoreetilised ning ilmselt on olemas ka teisi lähenemisviise, mis võivad viia täpsemate tulemusteni. Antud vameid tuleks vaadelda, kui ühe võimaliku lähenemisviisi tulemusi. Lõpptulemus võiks olla igalele materjalile eraldi summaarne üleminekukordaja.

8.5 FWD-ELMOD meetodi “hüved ja puudused”

Teoreetilised “hüved”

- Sobib kasutada olemasolevate, ülekatet vajavate teede ülekatete arvutamiseks
- Võimaldab hõlpsasti iseloomustada eri tarindikihtide omadusi (e-mooduleid)
- Mõõtmise suhtelisest lihtsusest tingituna hõlbus mõõta nt kasvõi iga 10 - 100 m tagant saamaks piisav hulk infot katendikihtide kulgemise kohta piki (aga ka põiki) teed
- Teede projekteerimise kvaliteet pikas perspektiivis tõuseb, kuna info on täpsem
- Konkurentsivõime Euroopa taustsüsteemis tõuseb, kuna kogu Euroopas kasutatakse FWD teste
- ELMOD'i viimase versiooni (4.5) arvutusmeetod on väga suuresti kohalike olude järgi kohandatav
- Programm töötab Windowsi keskkonnas ja on lihtne kasutada

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

- FWD katse on võrreldes puuraugu puurimisega märgatavalt odavam (kuni 10 x)
- FWD katse on võrreldes puuraugu puurimisega märgatavalt kiirem (kuni 10 x)
- Arvestab reaalselt olukorda teel - iga tarindikihi (max 4 kihti) reaalne e-moodul arvutatakse reaalselt mõõtmiste põhjal (mitte ei aimata tabelist)
- Katse lühiajalisus - mõõtmiste häiriv mõju liiklusele suhteliselt väike
- Andmed salvestatakse ja säilitatakse andmebaasis, mistõttu infot on lihtne edastada, paljundada, kasutada ulatuslikes analüüsides
- Erinevad mõõtmised ja arvutustulemused on omavahel võrreldavad tehes võimalikuks nt. süsteemse analüüsi teede võrgu tasemel tuhandete mõõtmiste kõrvutamise
- Kasutusjuhendid ja tarkvara on inglisekeelne (ja mitte nt. portugali keelne nagu tarkvara nimega BAP (LEAD))
- Meetod on katendile ohutu

Teoreetilised “puudused”

- Ei sobi kasutamiseks uute katendite projekteerimisel
- Vaevaline kasutuselevõtt, kuna VSN on olnud kasutusel pikka aega (inerts)
- Vähene kogemus Eestis tagasiarvutusmeetodi kasutamisel
- Eestis puuduvad vastavad spetsialistid
- Programmi parameetrite kohandamine Eesti oludele vajab mahukaid uurimustöid, et tekiks programmi suhtes kogemuslik usaldus
- Mõõtmisi ei saa teha talvekuudel
- Mõõtmised on tundlikud kliimatingimuste suhtes (temperatuur, niiskus...)
- Eesti teekatete all olevad kihid on sageli ebaühtlase koostisega ja erinevad nt mujal Euroopas katete all olevatest materjalidest, mistõttu sealne kogemus ei ole üheselt meie oludes kasutatav
- Arvutus ei kasuta harjumuspäraseid näitajaid nagu nidusust ja sisehõõrde nurka
- Puudub eestikeelne kasutuskeskkond (ELMOD - ingl.k)

9 Kokkuvõte

Käesolevas töös käsitletakse tagasiarvutusmetoodikat FWD – ELMOD'i näitel ja otseselt Odemarki valemite põhjal koostatud programme võrdluses VSN 46-83'ga. Samuti on antud ülevaade erinevates maades kasutatavatest metoodikatest ning rahvusvahelistest dimensioneerimismetoodikatest üldiselt. Selgitati tagasiarvutusprogrammi ELMOD tööpõhimõtteid. Võeti ühendust tootjafirma ja ka kasutajatega erinevatest maadest. Käidi kohapeal riikides, kus kasutatakse tagasiarvutust kui ka kataloogi-tüüpi metoodikat ning koguti taustainfot erinevate metoodikate kohta. Teostati võrdlevaid katsearvutusi FWD andmete ning VSN'i järgi kehtivate parameetrite põhjal. Samuti võrreldi graafikutel COST 336 ja VSN'i andmeid. Töötati välja Excelis töötav Odemarki valemitel põhinev programm ning võrreldi analoogselt Taani päritolu programmis kasutatud kalkulasioone seal kasutatud arvutusvalemitega. Mõlemaga teostati korduvaid arvutusi. Välja valiti parameetrid, mis on esindatud ka VSN'is ning teostati VSN'iga analoogsed arvutused. Tulemused toodi ära tabelite ja graafikute kujul. Esitati metoodikate teoreetilised ja praktilised eelised ning puudused Eesti keskkonna suhtes.

Teostatud arvutusnäited olid valitud Tallinn-Pärnu-Ikla maanteelt, lähtudes põhimõttest, et võimalikult pikal lõigul oleksid võimalikult ühtlased omadused. Teoreetilised 20 konstruktsiooni valiti lähtudes põhimõttest, et moodulid peaksid suurenema alt üles ning et oleks esindatud ka äärmuslike omadustega konstruktsioonid toomaks välja metoodikate arvutuslikud piirid. Parameetrite võrdluses valiti välja need näitajad, mida arvestatakse nii VSN'is kui COST 336es. Graafikute jaoks toodi võrdluses ära ainult need materjalid, mis olid olemas mõlemates normides.

Kuna sellel teemal pole Eestis vastavat uurimustööd tehtud, prooviti võrrelda erinevate metoodikate sobivust Eesti kliima ja pinnase materjalidest tulenevate omadustega. Prooviti anda ülevaade mujal maailmas kasutatavatest metoodikatest, laskumata tagasiarvutusele põhinevate programmide kõrvalt liiga detailselt teistesse metoodikatesse.

Töös selgus, et tagasiarvutusprogrammid eeldavad, et tee konstruktsiooni konstruktiivsete kihtide moodulid peavad olema alt üles kasvavad ning väiksema paksusega, kui FWD koormusplaadi raadius (150mm). Seda silmas pidades peaks selgitama, kui palju Eesti oludes on teid mille konstruktiivsed kihid on alt üles suureneva mooduliga ning selgitama kui oluline on alla paksuste 150mm katte kihtide e-moodulite määramine. Sellest lähtuvalt selguks FWD-ELMOD metoodika VSN'i kohandamise tegelik vajadus. Otse VSN'iga ei saa kohandada ühtegi Läänes kasutatavat metoodikat, kuna VSN'is kasutavad näitajad ja ka arvutustulemused põhinevad erinevatel parameetritel.

Käesolevas töös leitud üleminekutegurid on loodud mõttega, et FWD kaudu leitud kihtide e-moodulid viiakse üle VSN metoodikaga võrreldavaks ning siis arvutatakse VSN'is nende kaudu e-üldine. Kahtlemata ei ole need tegurid lõplikud ja esindavad vaid ühte võimalikku lähenemisviisi. Kuna materjalide omadused sõltuvad väga paljudest parameetritest saaks pakutud tegureid ilmselt veel täiustada ja täpsustada nii nagu igat teist tuletatud/leitud tegurit.

10 Järeldused ja ettepanekud täiendavate uuringute teostamiseks

Reeglina uute, projekteeritavate teede katendeid ei arvutata vaid konstruktsioon valitakse katalogiseeritud tüüplahenduste hulgast vastavalt tee klassile ja liiklusele, mis on eelnevalt tuletatud mõne (sageli riikliku) uurimisasutuse poolt erinevatest dimensioneerimismetoodikatest lähtuvalt, mis püüavad ühel või teisel moel võtta arvesse konkreetse riigi kohalikke olusid. Niisugused “valmiskonstruktsioonid” on üldjuhul tuletatud empiirilistest füüsikalise-matemaatilistest (nt. Odemarki võrrandid) ja praktilistest (nt. AASHTO Road Test) kaalutlustest lähtuvalt. Igas riigis on insenerimõtte arenedes siiski välja kujunenud vastavas riigis sobivad katendid – see on kogemusest lähtuv teadmine, mille eest on purunenud või üledimensioneeritud teede näol makstud meeletut hinda, kuid mis oma ala spetsialistide ja uurimisasutuste abiga on aja jooksul kogemuseks vormunud ja nüüd, vastavate maade projekteerimisalase normistiku kaudu praktilist kasutust leiavad. Kuigi eri maades on uute materjalide ja kasutustingimuste arvestamiseks seda kogemust valemite näol täiendatud, tundub, et Eestis siiani kasutatav nn. VSN-metoodika on neist kõige detailsem, kuid samas komplekssem. Samas, Eestile sobiva katendiarvutussüsteemi loomisel peaks peamiseks kaalukeeleks olema just kogemus. Senine kogemus kinnitab, et VSN-il baseeruv metoodika on Eestis põhimõtteliselt kasutatav. Selleks, et eelnimetatud põhinev metoodika Eestis realselt kasutatav oleks tuleb luua:

- selged eestikeelsed juhised nimetatud metoodika kasutuselevõtuks
- üldised ja üheselt mõistetavad reeglid erinevate koefitsientide kasutamiseks
- teede digitaalne geoloogiliste tulpade andmebaas (hindmaks FWD kasutuse ulatust)
- katendis kasutada lubatud materjalide andmebaas koos neile isel. omadustega
- uute katendi materjalide andmebaasi lisamise põhimõtted
- pinnaste tugevusomaduste määramise metoodika
- töötada välja arvutiprogramm eeltoodu mugavaks kasutuselevõtuks
- kohandada VSN Euroopas kasutatavatele materjalidele

Olemasolevate teede puhul on ülesanne tegelikult kordi keerulisem kus ei saa üldjuhul rääkida katendi dimensioneerimisest, sest praktika on näidanud, et olemasolevate teede katendites olevad materjalid on väga ebaühtlase asetusega ja sageli ei vasta mingisugustele nõuetele. Ülesande keerukus seisneb majanduslikult otstarbekaima lahenduse valikus, sest olevate teede vead ei ole ega saagi olla standardiseeritud ning igale olukorrale ja juhtumile tuleb leida just konkreetseks puhuks sobivaim unikaalne lahendus. Selline lahendus saab baseeruda ainult oleva olukorra põhjalikul analüüsil, mille tegemiseks on maailmas kasutusele võetud kõikvõimalikud meetodid ja tehnikad, sest erinevate lahendustega kaasnevad majanduslikud kulud ühiskonnale erinevad kordades. Harvad pole juhtumid kus majanduslikult otstarbekaimaks osutub tee uuesti ehitamine või põhjalik rekonstrueerimine (otsekulud võivad ületada uue tee ehitamise kulusid – vana tee lammutamine, liikluse ümbersuunamine). Teisal võib olla piisav vaid kulumiskihi taastamine. Esmapilgul odavana tunduv lahendus juhul, kui see on valesti valitud remondimeetod, põhjustab ühiskonnale reeglina ülisuuri kulusid. Eesmärk – tagada tee eksploatatsioonikõlblikkus ühiskonnale optimaalsel tasemel teatava perioodi vältel on saavutatav vaid jätkuvate investeeringute ja spetsialistide kaasamisega teedelasestesse uuringutesse tagamaks erialase teabe arengut ja kättesaadavust kõigile

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

teedespetsialistidele. Olemasoleva tee puhul on ülesanne lihtsustatult jagatav kolme etappi:

- selgitada välja tee lagunemise põhjused
- selgitada välja võimalused lagunemise põhjuste kõrvaldamiseks
- valida ühiskonnale majanduslikult otstarbekaim lahendus.

Eeltoodu on loogiline rida kus järgnev pole eelnevata võimalik, mistõttu lõpptulemus saab sõltuda ainult sellise loogilise rea läbikäimise põhjalikkusest, alahindamata seejuures esimese etapi tähtsust. Tasasus, defektide areng, kandevõime, roobas ja paljud muud näitajad annavad väga olulist informatsiooni tee võimaliku lagunemise põhjuste kohta. Kombineerides seda informatsiooni täna Eestis olemasoleva kaasaegse uurimistehnika (maadarar) ning arvutusmeetoditega (FWD andmete analüsaatorid, tee seisundi kompleksanalüsaatorid) saame kujundada ja arendada kohalikku, kogemusel baseeruvat uurimispotentsiaali hoopis uuel kvalitatiivsel tasemel. Ainult pidevate uuringute ja arendustööga on võimalik lihtsustada tüüp vigade avastamist, luua uusi tüüplahendusi ja remondimeetodeid, täiustada olemasolevaid – kõik selleks, et pakkuda ühiskonnale majanduslikult otstarbekaimat lahendust.

Teoreetiliselt on võimalik teekonstruktsiooni omadusi uurida ka vahetu geoloogiliste puurimistega ja teha nt. kontrollarvutused VSN-iga, kuid sellisel juhul kas oleksime valmis puurima Eesti maanteed läbi ca 2m sügavuselt nt. iga 50m tagant, et siis mõõta iga kihi moodul eraldi laboris ? Ilmselt mitte.

Seni laialdasemalt kasutusel olev metoodika olemasolevate teede kihtide omaduste hindamisel on FWD-l põhinev tagasiarvutusmetoodika. ELMOD-tüüpi programmiga on põhimõtteliselt võimalik hinnata tarindikihtide ligikaudseid omadusi tinglike e-moodulite kaudu. Selleks, et selline tagasiarvutusel põhinev uurimismeetod oleks Eestis põhjendatud ja kasutatav tuleks:

- selgitada alt-üles suurenevate e-moodulitega konstruktsioonidega teede osakaal Eestis
- jätkuvalt teostada kandevõimemõõtmisi Eesti maanteedel
- määrata seotud ja sidumata katendikihtide paksused Eesti maanteedel
- analüüsida saadud andmetega tarindikihtide omadused Eesti maanteedel
- selgitada tagasiarvutusmeetodiga leitud e-moodulite hindamise kriteeriumid Eestis

11 Kasutatud allikad

1. Per Ullidtz. 1999 "Pavement Design."
 2. Scetauroute – DCER (1999), HDM-4 Road Detoration Model - Second Calibration. Development of Estonian Network Level Assumptions, Bennett, C and Paterson, WOD (2000), HDM 4 Calibration Guide. HDM Document, Volume 5. Juslen et al (2001), Network Level Strategy for Paved Roads in Estonia. Phare (1999), Development of Estonian Network Level Assumptions, Final report. Viatek, Scetauroute and Stratum
 3. VSN 46-83 "Instruktsija po projektirovaniju doroznõh odezd nestestkovo tipa"
 4. TECHNICAL SUB-COMMITTEE; COST 336 "Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation." COST Secretariat Brussels, Final Draft January 2001.
 5. Harmonization of the Use of the Falling on Pavements Part 1, harmonization of FWD measurements and data processing for flexible road pavement evaluation, FEHRL report No.1996/1
 6. Maanteeameti peadirektori käskkiri nr. 143. Teekatendite ehitusmaterjalide ja pinnaste tugevuskarakteristikute täpsustamine. Maanteeamet, 15 november 2001 a.
 7. Estimation of Paving Materials Design Moduli from Falling Weight Deflectometer Measurements; Transportation research record 1293.
 8. "Layer moduli during HVS testing; comparing laboratory results with backcalculations from FWD and MDD deflections" P.Ullidtz, J.T.Harvey, M.Riemer and J.A.Prozzy.
 9. Prediction of Pavement Response using Non-Classical theories of Elasticity, Per Ullidtz 1981
 10. LatvASHTO asphalt research project; Latvian road Administration, Pavement Management System Department, Project manager: J.Barbars, Riga, 2001-11-07
 11. French Design Manual for Pavement Structures, Laboratoire central des Ponts Chausse'es 1997
 12. Pavement Analysis and Design; Yang H. Huang University of Kentucky 1993
 13. Lähteülesanne (projekt) uurimustööle "Teekatendi konstruktsioonikihtide elastsusmoodulite määramine." Ants Vaimel 2001
 14. Russia Highway Rehabilitation and Maintenance Project: Review of Standards, University of Waterloo Canada 1993
 15. Mattias Olep. Teekatendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Bakalaureusetöö. 2001
-
- Experiences in using falling weight deflectometers as routine equipment, Danish Road Directorate 1989.
 - Pavement Subgrade performance Study, danish Road Institute 1998
 - US. department of Transportation, federal Highway Administration Virginia
 - Uurimustöö – Backcalculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume I: Slab on Elastic Solid and Slab on Dense-Liquid Foundation Analysis of Rigid Pavements
 - University Of South Carolina, Department of Civil Engineering, Columbia
 - Uurimustöö – Alternative Method for Temperature Correction of Backcalculated Equivalent Pavement Module
 - SHRP's Layer Moduli Backcalculation Procedure, Strategic Highway Research Program, Washington 1993
 - A Sensitivity Test of Two Deterioration Models for Flexible Pavements, Peter Ekdahl, Lund University, Sweden 1999
 - Department of Civil Engineering, North Carolina State University USA
 - Uurimustöö "Influence of test Parameters in SHRP P07 Procedure on Resilient Module of Asphalt Concrete Field Cores" 1993
 - Riigi Maanteeamet Tehnokeskus "Teekatendite kandevõime mõõtmistulemused 1996a."

LISAD

LISA 1. Kihtide Poissoni teguri, kontaktsurve ja koormusraadiuse erinevustest põhjustatud e-mooduli üleminekutegurite leidmine.....	61
LISA 2. DELSAN valemid	63
LISA 3. Väljavõte Saksa Teede dimensioneerimise kataloogist.....	64
LISA 4. ELMOD tarkvara parameetrid.....	70
LISA 5. Odemarki ja VSN paigutiste üleminekukordajad.....	73
LISA 6. Tagasiarvutusprogrammide nimekiri	74
LISA 7. DELSAN - konstruktsioonide andmed ja tõmbepinged.....	75
LISA 8. Arvutusnäited – VSN + ELMOD.....	78
Konstruktsioon I.....	78
Konstruktsioon II.....	80
LISA 9. VSN ja DELSAN valemid	82
Tõmbepingete valemid	82
Paigutiste valemid	83
LISA 10. Läti SEGA tarkvara.	84
LISA 11. Summary	85

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmis-
tulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

LISAD

LISA 1. Kihtide Poissoni teguri, kontaktsurve ja koormusraadiuse erinevustest põhjustatud e-mooduli üleminekutegurite leidmine.

Käesolevates katsetes muudeti spetsiaalselt sellel eesmärgil loodud Tehnokeskuse Odemarki tarkvaras otsitava kihi paigutist ning märgiti tabelisse sellele vastav kihi e-moodul. Joonisel 1. on muudetud sideainega töödeldud kihi paigutist ning märgiti välja sellele vastav kihi moodul.

	Koormusraadius	150 mm	Koormusraadius	105 mm				
Sideainega	Kontaktsurve	0.7 Mpa	Kontaktsurve	0.6 Mpa				
töödeldud	Poissoni tegur	0.36	Poissoni tegur	0.3				
kihi paigutis (mm)	Elastusmoodul 10oC	MPa	Elastusmoodul 10oC	Mpa	Jagatis	keskmine	Vahe %	Täpsus %
0.005	13284		12485		1.063997	13286.493	0.019	99.981
0.01	6643		6243		1.064072	6643.7768	0.012	99.988
0.015	4429		4162		1.064152	4429.1859	0.004	99.996
0.02	3322		3121		1.064402	3321.3573	-0.019	99.981
0.025	2657		2497		1.064077	2657.2987	0.011	99.989
0.03	2214		2081		1.063912	2214.5929	0.027	99.973
0.035	1898		1784		1.063901	1898.5286	0.028	99.972
0.04	1660		1561		1.063421	1661.2107	0.073	99.927
0.045	1476		1387		1.064167	1476.0406	0.003	99.997
0.05	1329		1249		1.064051	1329.1814	0.014	99.986
0.055	1207		1135		1.063436	1207.863	0.072	99.928
0.06	1107		1040		1.064423	1106.7644	-0.021	99.979
0.065	1022		960		1.064583	1021.6286	-0.036	99.964
0.07	949		892		1.063901	949.26328	0.028	99.972
0.075	886		832		1.064904	885.41149	-0.066	99.934
0.08	830		780		1.064103	830.07327	0.009	99.991
0.085	782		734		1.065395	781.12023	-0.113	99.887
0.09	738		694		1.063401	738.55237	0.075	99.925
0.095	699		657		1.063927	699.1771	0.025	99.975
0.1	665		624		1.065705	664.05862	-0.142	99.858
Sideainega töödeldud kihtide e-mooduli üleminekutegur VSN-Odemark					1.064197		P2=	99.960
Sideainega töödeldud kihtide e-mooduli üleminekutegur Odemark-VSN					0.939676			

Joonis 1. Sideainega töödeldud kihtide Poissoni teguri, kontaktsurve ja koormusraadiuse erinevustest põhjustatud e-mooduli üleminekuteguri leidmine.

Jooniselt on näha, et sideainega töödeldud kihtide e-mooduli üleminekutegur Odemarki FWD väärtustelt VSN'i taustsüsteemi on **0,94**.

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmis-
tulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

LISAD

	Koormusraadius	150 mm	Koormusraadius	185 mm				
Sideainega	Kontaktsurve:	0.7 Mpa	Kontaktsurve:	0.6 Mpa				
töötlemata	Poissoni tegur:	0.35	Poissoni tegur:	0.3				
kihi paigutis (mm)	Elastsusmoodul 10oC	MPa	Elastsusmoodul 10oC	Mpa	Jagatis	keskmine	Vahe %	Täpsus %
0.025	1234		1434		0.86053	1235.2339	0.100	99.900
0.05	617		717		0.86053	617.61694	0.100	99.900
0.075	411		478		0.859833	411.74463	0.181	99.819
0.1	309		359		0.860724	309.23917	0.077	99.923
0.125	247		287		0.860627	247.21906	0.089	99.911
0.15	206		239		0.861925	205.87231	-0.062	99.938
0.175	176		205		0.858537	176.58504	0.332	99.668
0.2	154		179		0.860335	154.18889	0.123	99.877
0.225	137		159		0.861635	136.96108	-0.028	99.972
0.25	123		143		0.86014	123.17883	0.145	99.855
0.275	113		130		0.869231	111.98076	-0.902	99.098
0.3	103		120		0.858333	103.36685	0.356	99.644
0.325	95		110		0.863636	94.752948	-0.260	99.740
0.35	88		102		0.862745	87.861825	-0.157	99.843
0.375	82		96		0.854167	82.693482	0.846	99.154
0.4	77		90		0.855556	77.525139	0.682	99.318
0.425	73		84		0.869048	72.356797	-0.881	99.119
0.45	69		80		0.8625	68.911235	-0.129	99.871
0.475	65		75		0.866667	64.604283	-0.609	99.391
0.5	62		72		0.861111	62.020112	0.032	99.968
Sideainega töötlemata kihtide e-mooduli üleminekutegur VSN-Odemark					0.86139		R2=	99.695
Sideainega töötlemata kihtide e-mooduli üleminekutegur Odemark-VSN					1.160914			

Joonis 2. Sideainega töötlemata kihtide Poissoni teguri, kontaktsurve ja koormusraadiuse erinevustest põhjustatud e-mooduli üleminekuteguri leidmine.

LISA 2. DELSAN valemid

(silinderjäikusele baseeruvad valemid)

I:

$$E_{\text{mod } 2} = E_3 \left(\frac{1}{h_2/R + 1} \right)^2 + E_2 \left(1 - \frac{1}{h_2/R + 1} \right)^2 ;$$

$$E_{\text{mod } 3} = E_4 \left(\frac{1}{h_3/R + 1} \right)^2 + E_3 \left(1 - \frac{1}{h_3/R + 1} \right)^2$$

II:

$$h_{e1} = h_{e2} = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1(1-\mu^2_2)}{E_{\text{mod } 2}(1-\mu^2_1)}} ;$$

$$h_{e3} = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1(1-\mu^2_3)}{E_{\text{mod } 3}(1-\mu^2_2)}} + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2(1-\mu^2_3)}{E_{\text{mod } 3}(1-\mu^2_2)}} ;$$

$$h_{e4} = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1(1-\mu^2_4)}{E_{\text{mod } 4}(1-\mu^2_1)}} + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2(1-\mu^2_4)}{E_{\text{mod } 4}(1-\mu^2_1)}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3(1-\mu^2_4)}{E_{\text{mod } 4}(1-\mu^2_1)}} ;$$

III:

Surve kontaktpinnale:

$$Z = P \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{R}{h_E} \right)^2 \right)^{1.5}} \right)$$

, kus

E_n = vastava kihi elastsusmoodul (MPa)

h_n – vastava kihi paksus (mm)

R – kontaktsurvepinna raadius (mm)

h_e - kihi ekvivalentne paksus (mm)

$E_{\text{mod } n}$ – vastava kihi modifitseeritud elastsusmoodul, mis vastab kihi uuele arvutuslikule paksusele h_e .

μ - Poissoni tegur

Tafel A 0: Bauweisen für Fahrbahnen der Bauklasse SV
Verkehrsbelastungszahl (VB) > 3200 (Dickenangaben in cm, Ausgaben des Verformungsmoduls E_s in MN/m^2)

	Detritus
	Helminths
	Protozoa
	Bacteria
	Bacterial Fungus
	Bacterial Fungus
	Soil Invertebrates
	Keystone
	Key or Substrate
	High quality
	Low quality
	Topsoil or Substrate
	Substrate

Tafel A3: Bauweisen für Fahrbahnen der Bauklasse III

Verkehrsbelastungszahl (VB) 300–900 (Dickenangaben in cm, Angaben des Verformungsmoduls E_2 in MN/m^2)

Zeile	Dicke d 1 Tragisch ohne Bodenmitte	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800	810	820	830	840	850	860	870	880	890	900	910	920	930	940	950	960	970	980	990	1000	1010	1020	1030	1040	1050	1060	1070	1080	1090	1100	1110	1120	1130	1140	1150	1160	1170	1180	1190	1200	1210	1220	1230	1240	1250	1260	1270	1280	1290	1300	1310	1320	1330	1340	1350	1360	1370	1380	1390	1400	1410	1420	1430	1440	1450	1460	1470	1480	1490	1500	1510	1520	1530	1540	1550	1560	1570	1580	1590	1600	1610	1620	1630	1640	1650	1660	1670	1680	1690	1700	1710	1720	1730	1740	1750	1760	1770	1780	1790	1800	1810	1820	1830	1840	1850	1860	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	2110	2120	2130	2140	2150	2160	2170	2180	2190	2200	2210	2220	2230	2240	2250	2260	2270	2280	2290	2300	2310	2320	2330	2340	2350	2360	2370	2380	2390	2400	2410	2420	2430	2440	2450	2460	2470	2480	2490	2500	2510	2520	2530	2540	2550	2560	2570	2580	2590	2600	2610	2620	2630	2640	2650	2660	2670	2680	2690	2700	2710	2720	2730	2740	2750	2760	2770	2780	2790	2800	2810	2820	2830	2840	2850	2860	2870	2880	2890	2900	2910	2920	2930	2940	2950	2960	2970	2980	2990	3000	3010	3020	3030	3040	3050	3060	3070	3080	3090	3100	3110	3120	3130	3140	3150	3160	3170	3180	3190	3200	3210	3220	3230	3240	3250	3260	3270	3280	3290	3300	3310	3320	3330	3340	3350	3360	3370	3380	3390	3400	3410	3420	3430	3440	3450	3460	3470	3480	3490	3500	3510	3520	3530	3540	3550	3560	3570	3580	3590	3600	3610	3620	3630	3640	3650	3660	3670	3680	3690	3700	3710	3720	3730	3740	3750	3760	3770	3780	3790	3800	3810	3820	3830	3840	3850	3860	3870	3880	3890	3900	3910	3920	3930	3940	3950	3960	3970	3980	3990	4000	4010	4020	4030	4040	4050	4060	4070	4080	4090	4100	4110	4120	4130	4140	4150	4160	4170	4180	4190	4200	4210	4220	4230	4240	4250	4260	4270	4280	4290	4300	4310	4320	4330	4340	4350	4360	4370	4380	4390	4400	4410	4420	4430	4440	4450	4460	4470	4480	4490	4500	4510	4520	4530	4540	4550	4560	4570	4580	4590	4600	4610	4620	4630	4640	4650	4660	4670	4680	4690	4700	4710	4720	4730	4740	4750	4760	4770	4780	4790	4800	4810	4820	4830	4840	4850	4860	4870	4880	4890	4900	4910	4920	4930	4940	4950	4960	4970	4980	4990	5000	5010	5020	5030	5040	5050	5060	5070	5080	5090	5100	5110	5120	5130	5140	5150	5160	5170	5180	5190	5200	5210	5220	5230	5240	5250	5260	5270	5280	5290	5300	5310	5320	5330	5340	5350	5360	5370	5380	5390	5400	5410	5420	5430	5440	5450	5460	5470	5480	5490	5500	5510	5520	5530	5540	5550	5560	5570	5580	5590	5600	5610	5620	5630	5640	5650	5660	5670	5680	5690	5700	5710	5720	5730	5740	5750	5760	5770	5780	5790	5800	5810	5820	5830	5840	5850	5860	5870	5880	5890	5900	5910	5920	5930	5940	5950	5960	5970	5980	5990	6000	6010	6020	6030	6040	6050	6060	6070	6080	6090	6100	6110	6120	6130	6140	6150	6160	6170	6180	6190	6200	6210	6220	6230	6240	6250	6260	6270	6280	6290	6300	6310	6320	6330	6340	6350	6360	6370	6380	6390	6400	6410	6420	6430	6440	6450	6460	6470	6480	6490	6500	6510	6520	6530	6540	6550	6560	6570	6580	6590	6600	6610	6620	6630	6640	6650	6660	6670	6680	6690	6700	6710	6720	6730	6740	6750	6760	6770	6780	6790	6800	6810	6820	6830	6840	6850	6860	6870	6880	6890	6900	6910	6920	6930	6940	6950	6960	6970	6980	6990	7000	7010	7020	7030	7040	7050	7060	7070	7080	7090	7100	7110	7120	7130	7140	7150	7160	7170	7180	7190	7200	7210	7220	7230	7240	7250	7260	7270	7280	7290	7300	7310	7320	7330	7340	7350	7360	7370	7380	7390	7400	7410	7420	7430	7440	7450	7460	7470	7480	7490	7500	7510	7520	7530	7540	7550	7560	7570	7580	7590	7600	7610	7620	7630	7640	7650	7660	7670	7680	7690	7700	7710	7720	7730	7740	7750	7760	7770	7780	7790	7800	7810	7820	7830	7840	7850	7860	7870	7880	7890	7900	7910	7920	7930	7940	7950	7960	7970	7980	7990	8000	8010	8020	8030	8040	8050	8060	8070	8080	8090	8100	8110	8120	8130	8140	8150	8160	8170	8180	8190	8200	8210	8220	8230	8240	8250	8260	8270	8280	8290	8300	8310	8320	8330	8340	8350	8360	8370	8380	8390	8400	8410	8420	8430	8440	8450	8460	8470	8480	8490	8500	8510	8520	8530	8540	8550	8560	8570	8580	8590	8600	8610	8620	8630	8640	8650	8660	8670	8680	8690	8700	8710	8720	8730	8740	8750	8760	8770	8780	8790	8800	8810	8820	8830	8840	8850	8860	8870	8880	8890	8900	8910	8920	8930	8940	8950	8960	8970	8980	8990	9000	9010	9020	9030	9040	9050	9060	9070	9080	9090	9100	9110	9120	9130	9140	9150	9160	9170	9180	9190	9200	9210	9220	9230	9240	9250	9260	9270	9280	9290	9300	9310	9320	9330	9340	9350	9360	9370	9380	9390	9400	9410	9420	9430	9440	9450	9460	9470	9480	9490	9500	9510	9520	9530	9540	9550	9560	9570	9580	9590	9600	9610	9620	9630	9640	9650	9660	9670	9680	9690	9700	9710	9720	9730	9740	9750	9760	9770	9780	9790	9800	9810	9820	9830	9840	9850	9860	9870	9880	9890	9900	9910	9920	9930	9940	9950	9960	9970	9980	9990	10000	10010	10020	10030	10040	10050	10060	10070	10080	10090	10100	10110	10120	10130	10140	10150	10160	10170	10180	10190	10200	10210	10220	10230	10240	10250	10260	10270	10280	10290	10300	10310	10320	10330	10340	10350	10360	10370	10380	10390	10400	10410	10420	10430	10440	10450	10460	10470	10480	10490	10500	10510	10520	10530	10540	10550	10560	10570	10580	10590	10600	10610	10620	10630	10640	10650	10660	10670	10680	10690	10700	10710	10720	10730	10740	10750	10760	10770	10780	10790	10800	10810	10820	10830	10840	10850	10860	10870	10880	10890	10900	10910	10920	10930	10940	10950	10960	10970	10980	10990	11000	11010	11020	11030	11040	11050	11060	11070	11080	11090	11100	11110	11120	11130	11140	11150	11160	11170	11180	11190	11200	11210	11220	11230	11240	11250	11260	11270	11280	11290	11300	11310	11320	11330	11340	11350	11360	11370	11380	11390	11400	11410	11420	11430	11440	11450	11460	11470	11480	11490	11500	11510	11520	11530	11540	11550	11560	11570	11580	11590	11600	11610	11620	11630	11640	11650	11660	11670	11680	11690	11700	11710	11720	11730	11740	11750	11760	11770	11780	11790	11800	11810	11820	11830	11840	11850	11860	11870	11880	11890	11900	11910	11920	11930	11940	11950	11960	11970	11980	11990
-------	------------------------------------	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

LISAD

Tafel A 4: Bauweisen für Fahrbahnen der Bauklasse IV

Verkehrsbelastungszahl (VB) 60–300 (Dickenangaben in cm, Angaben des Verformungsmoduls E_{z} in MN/m^2)

Zeile	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80	Vorgelagerter Oberbau
1	Bauweisen mit bituminöser Decke		1		2		3.1		3.2		4.1		4.2		5		6		11		12		Vorgerollter Oberbau		Asphaltoberbau		11		12		Vorgerollter Oberbau		Asphaltoberbau				
			bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		bei Tragschicht und Bodenerfestigung auf Frostschuttschicht		bei Tragschicht und Schottertragschicht auf Frostschuttschicht $E_z = 50 \text{ MN/m}^2$		bei Tragschicht und Schottertragschicht auf Frostschuttschicht $E_z = 100 \text{ MN/m}^2$		bei Tragschicht und Kiestragschicht auf Frostschuttschicht $E_z = 150 \text{ MN/m}^2$		bei Tragschicht und Kiestragschicht auf Frostschuttschicht $E_z = 200 \text{ MN/m}^2$		bei Tragschicht und Kies- oder Schottertragschicht auf Planum		bei Tragschicht und hydraulisch gebundene Tragschicht auf Frostschuttschicht		bei Tragschicht auf Planum		bei Tragschicht und hydraulisch gebundene Tragschicht auf Planum																
2	Bauweisen mit Betondecke		1		2.1		2.2		3		4.1		4.2																								
			Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																								
3	Bauweisen mit Pflasterdecke		1		2		3		4		5		6		7		8																				
			bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		bei Tragschicht und Schottertragschicht auf Frostschuttschicht		bei Tragschicht und Kiestragschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung auf Frostschuttschicht		Schottertragschicht auf Frostschuttschicht		Kiestragschicht auf Frostschuttschicht		Kies- oder Schottertragschicht auf Planum		hydraulisch gebundene Tragschicht auf Frostschuttschicht																				
Dicke d 1 Tragschicht ohne Bodenschicht		220	310	42	51	280	360	46	300	41	24	34	44	54	230	310	49	160	390	49	59	69	340	44	54												
		Dreischicht		Reinfolge		Schotter- oder Kies		Bodenschicht		Bodenerfestigung		Schottertragschicht		Kiestragschicht		Kies- oder Schottertragschicht		hydraulisch gebundene Tragschicht																			
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)																									
		Tragschicht mit hydraulischen Bodenschicht auf Frostschuttschicht		Bodenerfestigung mit hydr. Bodenschicht auf Frostschuttschicht (gemäß DN 8094 Material)		Tragschicht auf hydraulischen Bodenschicht aus eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material)		Frostschuttschicht aus weit- o. intermediär eingestülften (gemäß DN 8094 Material																									

- 1) Mit Einwirkung von Mineralstoffen nur bei starker Bewehrung anwendbar
 2) Nur mit gebrochenen Mineralstoffen und bei örtlicher Bewehrung anwendbar
 3) Mit zusätzlichen Maßnahmen zur gezielten Rißbildung (z. B. gemäß ZTV-T-SIB)
 4) Bei zweischichtiger Nutzung der Tragschichten oder bei notwendiger Abschlachtung

- 5) Bei zweischichtiger Nutzung der Tragschichten oder bei notwendiger Abschlachtung
 6) Anordnung einer bit. Tragschicht von 8 cm Dicke
 7) Ohne umfangreiche Erprobung

- 8) Frostschuttschicht
 9) Tragschicht auf hydr. Bodenschicht
 10) Tragschicht
 11) Kies- oder Schottertragschicht
 12) Kiestragschicht
 13) Schottertragschicht
 14) Bodenerfestigung
 15) Betonober- oder -unterbau
 16) Betondecke
 17) Pflasterdecke
 18) Frostschuttschicht

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

LISAD

Tafel A5: Bauweisen für Fahrbahnen der Bauklasse V

Verkehrsbelastungszahl (VB) 10–60 (Dickenangaben in cm, Angaben des Verformungsmoduls E_a in MN/m²)

Zelle	Dicke d 1 Tragschicht oberhalb	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800	810	820	830	840	850	860	870	880	890	900	910	920	930	940	950	960	970	980	990	1000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
1	Bauweisen mit bituminöser Decke	1	2	3.1	3.2	4.1	4.2	5	6	11	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht	bei Tragschicht und Bodenerfestigung auf Frostschuttschicht	bei Tragschicht und Schottertragschicht auf Frostschuttschicht	bei Tragschicht und Schottertragschicht auf Frostschuttschicht	bei Tragschicht und Kiestragschicht auf Frostschuttschicht	bei Tragschicht und Kiestragschicht auf Frostschuttschicht	bei Tragschicht und Kiestragschicht auf Planum	bei Tragschicht und hydraulisch gebundene Tragschicht auf Frostschuttschicht	bei Tragschicht und hydraulisch gebundene Tragschicht auf Planum																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
2	Bauweisen mit Betondecke	1	2.1	2.2	3	4.1	4.2	21	22																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		Tragschicht mit hydraulischen Bindemittel auf Frostschuttschicht	Bodenerfestigung mit hydraulischen Bindemittel auf Frostschuttschicht	Tragschicht mit hydraulischen Bindemittel auf Frostschuttschicht	Tragschicht mit hydraulischen Bindemittel auf Frostschuttschicht	Tragschicht mit hydraulischen Bindemittel auf Frostschuttschicht	Tragschicht mit hydraulischen Bindemittel auf Frostschuttschicht	Tragschicht mit hydraulischen Bindemittel auf Planum	Tragschicht mit hydraulischen Bindemittel auf Planum	Tragschicht mit hydraulischen Bindemittel auf Planum	Tragschicht mit hydraulischen Bindemittel auf Planum																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
3	Bauweisen mit Pflasterdecke	1	2	3	4	5	6	7	8	21	22																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		bei Tragschicht auf Frostschuttschicht	bei Tragschicht und Schottertragschicht auf Frostschuttschicht	bei Tragschicht und Kiestragschicht auf Frostschuttschicht	Bodenerfestigung auf Frostschuttschicht	Schottertragschicht auf Frostschuttschicht	Kiestragschicht auf Frostschuttschicht	Kies- oder Schottertragschicht auf Planum	hydraulisch gebundene Tragschicht auf Frostschuttschicht	hydraulisch gebundene Tragschicht auf Planum	hydraulisch gebundene Tragschicht auf Planum																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Deckenschicht		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung		Belastung	

- 1) Mit runderkörnigen Mineralstoffen nur bei örtlicher Bewehrung anwendbar
 2) Nur mit gebrochenen Mineralstoffen und bei örtlicher Bewehrung anwendbar
 3) Nur bei Bodenverfestigung im Baumaschinenverfahren ausführbar
 4) Mit zusätzlichen Maßnahmen zur gezielten Rißbildung (z. B. gemäß ZTVF-S10)

- 5) Bei zwischenzeitlicher Nutzung der Tragschichten oder bei notwendiger Abdeckung
 6) Bei zwischenzeitlicher Nutzung der Tragschicht oder bei notwendiger Abdeckung
 7) Anordnung einer bit. Tragschicht von 8 cm Dicke
 8) Ohne umfangreiche Erprobung

- Deckenschicht
 Betondecke
 Pflasterdecke
 Bodenschicht
 Bituminöse Tragschicht
 Bodenerfestigung
 Schottertragschicht
 Kiestragschicht
 Kies- od. Schottertragschicht
 Hydr. geb. Tragschicht
 Tragschicht mit hydr. Bindemittel
 Frostschuttschicht

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

LISAD

Tafel A6: Bauweisen für Fahrbahnen der Bauklasse VI

Verkehrsbelastungszahl (VB) < 10 (Dickenangaben in cm, Angaben des Verformungsmoduls E_{v2} in MN/m²)

Zeile	Dicke d 1 Tragschicht ohne Bodenmittel	43	45	48	50	53	55	58	60	63	65	68	70	73	75	78	80	83	85	88	90	93	95	98	100	103	105	108	110	113	115	118	120	123	125	128	130	133	135	138	140	143	145	148	150	153	155	158	160	163	165	168	170	173	175	178	180	183	185	188	190	193	195	198	200	203	205	208	210	213	215	218	220	223	225	228	230	233	235	238	240	243	245	248	250	253	255	258	260	263	265	268	270	273	275	278	280	283	285	288	290	293	295	298	300	303	305	308	310	313	315	318	320	323	325	328	330	333	335	338	340	343	345	348	350	353	355	358	360	363	365	368	370	373	375	378	380	383	385	388	390	393	395	398	400	403	405	408	410	413	415	418	420	423	425	428	430	433	435	438	440	443	445	448	450	453	455	458	460	463	465	468	470	473	475	478	480	483	485	488	490	493	495	498	500	503	505	508	510	513	515	518	520	523	525	528	530	533	535	538	540	543	545	548	550	553	555	558	560	563	565	568	570	573	575	578	580	583	585	588	590	593	595	598	600	603	605	608	610	613	615	618	620	623	625	628	630	633	635	638	640	643	645	648	650	653	655	658	660	663	665	668	670	673	675	678	680	683	685	688	690	693	695	698	700	703	705	708	710	713	715	718	720	723	725	728	730	733	735	738	740	743	745	748	750	753	755	758	760	763	765	768	770	773	775	778	780	783	785	788	790	793	795	798	800	803	805	808	810	813	815	818	820	823	825	828	830	833	835	838	840	843	845	848	850	853	855	858	860	863	865	868	870	873	875	878	880	883	885	888	890	893	895	898	900	903	905	908	910	913	915	918	920	923	925	928	930	933	935	938	940	943	945	948	950	953	955	958	960	963	965	968	970	973	975	978	980	983	985	988	990	993	995	998	1000	1003	1005	1008	1010	1013	1015	1018	1020	1023	1025	1028	1030	1033	1035	1038	1040	1043	1045	1048	1050	1053	1055	1058	1060	1063	1065	1068	1070	1073	1075	1078	1080	1083	1085	1088	1090	1093	1095	1098	1100	1103	1105	1108	1110	1113	1115	1118	1120	1123	1125	1128	1130	1133	1135	1138	1140	1143	1145	1148	1150	1153	1155	1158	1160	1163	1165	1168	1170	1173	1175	1178	1180	1183	1185	1188	1190	1193	1195	1198	1200	1203	1205	1208	1210	1213	1215	1218	1220	1223	1225	1228	1230	1233	1235	1238	1240	1243	1245	1248	1250	1253	1255	1258	1260	1263	1265	1268	1270	1273	1275	1278	1280	1283	1285	1288	1290	1293	1295	1298	1300	1303	1305	1308	1310	1313	1315	1318	1320	1323	1325	1328	1330	1333	1335	1338	1340	1343	1345	1348	1350	1353	1355	1358	1360	1363	1365	1368	1370	1373	1375	1378	1380	1383	1385	1388	1390	1393	1395	1398	1400	1403	1405	1408	1410	1413	1415	1418	1420	1423	1425	1428	1430	1433	1435	1438	1440	1443	1445	1448	1450	1453	1455	1458	1460	1463	1465	1468	1470	1473	1475	1478	1480	1483	1485	1488	1490	1493	1495	1498	1500	1503	1505	1508	1510	1513	1515	1518	1520	1523	1525	1528	1530	1533	1535	1538	1540	1543	1545	1548	1550	1553	1555	1558	1560	1563	1565	1568	1570	1573	1575	1578	1580	1583	1585	1588	1590	1593	1595	1598	1600	1603	1605	1608	1610	1613	1615	1618	1620	1623	1625	1628	1630	1633	1635	1638	1640	1643	1645	1648	1650	1653	1655	1658	1660	1663	1665	1668	1670	1673	1675	1678	1680	1683	1685	1688	1690	1693	1695	1698	1700	1703	1705	1708	1710	1713	1715	1718	1720	1723	1725	1728	1730	1733	1735	1738	1740	1743	1745	1748	1750	1753	1755	1758	1760	1763	1765	1768	1770	1773	1775	1778	1780	1783	1785	1788	1790	1793	1795	1798	1800	1803	1805	1808	1810	1813	1815	1818	1820	1823	1825	1828	1830	1833	1835	1838	1840	1843	1845	1848	1850	1853	1855	1858	1860	1863	1865	1868	1870	1873	1875	1878	1880	1883	1885	1888	1890	1893	1895	1898	1900	1903	1905	1908	1910	1913	1915	1918	1920	1923	1925	1928	1930	1933	1935	1938	1940	1943	1945	1948	1950	1953	1955	1958	1960	1963	1965	1968	1970	1973	1975	1978	1980	1983	1985	1988	1990	1993	1995	1998	2000	2003	2005	2008	2010	2013	2015	2018	2020	2023	2025	2028	2030	2033	2035	2038	2040	2043	2045	2048	2050	2053	2055	2058	2060	2063	2065	2068	2070	2073	2075	2078	2080	2083	2085	2088	2090	2093	2095	2098	2100	2103	2105	2108	2110	2113	2115	2118	2120	2123	2125	2128	2130	2133	2135	2138	2140	2143	2145	2148	2150	2153	2155	2158	2160	2163	2165	2168	2170	2173	2175	2178	2180	2183	2185	2188	2190	2193	2195	2198	2200	2203	2205	2208	2210	2213	2215	2218	2220	2223	2225	2228	2230	2233	2235	2238	2240	2243	2245	2248	2250	2253	2255	2258	2260	2263	2265	2268	2270	2273	2275	2278	2280	2283	2285	2288	2290	2293	2295	2298	2300	2303	2305	2308	2310	2313	2315	2318	2320	2323	2325	2328	2330	2333	2335	2338	2340	2343	2345	2348	2350	2353	2355	2358	2360	2363	2365	2368	2370	2373	2375	2378	2380	2383	2385	2388	2390	2393	2395	2398	2400	2403	2405	2408	2410	2413	2415	2418	2420	2423	2425	2428	2430	2433	2435	2438	2440	2443	2445	2448	2450	2453	2455	2458	2460	2463	2465	2468	2470	2473	2475	2478	2480	2483	2485	2488	2490	2493	2495	2498	2500	2503	2505	2508	2510	2513	2515	2518	2520	2523	2525	2528	2530	2533	2535	2538	2540	2543	2545	2548	2550	2553	2555	2558	2560	2563	2565	2568	2570	2573	2575	2578	2580	2583	2585	2588	2590	2593	2595	2598	2600	2603	2605	2608	2610	2613	2615	2618	2620	2623	2625	2628	2630	2633	2635	2638	2640	2643	2645	2648	2650	2653	2655	2658	2660	2663	2665	2668	2670	2673	2675	2678	2680	2683	2685	2688	2690	2693	2695	2698	2700	2703	2705	2708	2710	2713	2715	2718	2720	2723	2725	2728	2730	2733	2735	2738	2740	2743	2745	2748	2750	2753	2755	2758	2760	2763	2765	2768	2770	2773	2775	2778	2780	2783	2785	2788	2790	2793	2795	2798	2800	2803	2805	2808	2810	2813	2815	2818	2820	2823	2825	2828	2830	2833	2835	2838	2840	2843	2845	2848	2850	2853	2855	2858	2860	2863	2865	2868	2870	2873	2875	2878	2880	2883	2885	2888	2890	2893	2895	2898	2900	2903	2905	2908	2910	2913	2915	2918	2920	2923	2925	2928	2930	2933	2935	2938	2940	2943	2945	2948	2950	2953	2955	2958	2960	2963	2965	2968	2970	2973	2975	2978	2980	2983	2985	2988	2990	2993	2995	2998	3000	3003	3005	3008	3010	3013	3015	3018	3020	3023	3025	3028	3030	3033	3035	3038	3040	3043	3045	3048	3050	3053	3055	3058	3060	3063	3065	3068	3070	3073	3075	3078	3080	3083	3085	3088	3090	3093	3095	3098	3100	3103	3105	3108	3110	3113	3115	3118	3120	3123	3125	3128	3130	3133	3135	3138	3140	3143	3145	3148	3150	3153	3155	3158	3160	3163	3165	3168	3170	3173	3175	3178	3180	3
-------	--	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	---

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

LISAD

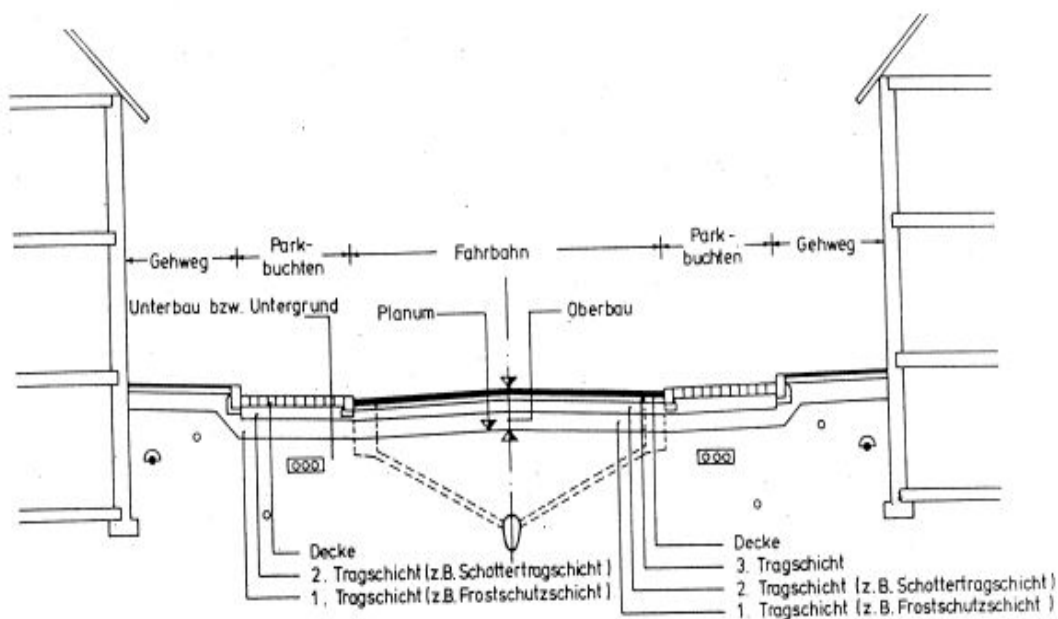


Bild 3: In geschlossener Ortslage mit wasserundurchlässigen Randbereichen und geschlossener seitlicher Bebauung sowie mit Entwässerungseinrichtungen

Joonis 1. Saksa teede dimensioneerimise kataloogis esinevaid mõisteid selgitav joonis

LISA 4. ELMOD tarkvara parameetrid

ELMOD programm pakub nelja parameetri faili - neist kaks on asfaltbetooni kohta, ühe tsementstabiliseeritud materjali kohta ja kaks sidumata materjalide kohta. Andmete muutmine ei ole Dynatesti ehk tootjafirma esindaja väitel soovitatav enne mitmeaastast katsete seeriat.

Material Parameters

Material: AC

Reference Modulus - Eref: 2750 MPa Reference Temperature - Tref: 25 °C

Temperature sensitivity:
☐ None ☐ Factors
☒ Semi-log ☐ Exponential

Temperature variation:
☐ None ☒ Factors
☐ Sinousoidal

Distress Mode :
☒ Fatigue Cracking ☐ Permanent Deformation

Fatigue Cracking Details:
☒ Long. ☐ Trans.
☒ Strain ☐ Stress
 Permissible value = 1162 (mstrain) * Mload ^ -0.304 * (E / 6.9) ^ C
 C = -0.259 for E < 6.9 (MPa) else C = -0.259 Life 20 years

Permanent Deformation Details:
☐ Strain ☒ Stress
 Permissible value = 0.12 (MPa) * Mload ^ -0.307 * (E / 160) ^ C
 C = 1 for E < 160 (MPa) else C = 1 Life 20 years

OK Add name Delete Cancel

Joonis 1. ELMODi tarkvara pakutav asfaltbetooni andmete fail

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

LISAD

Material Parameters

Material: **Clay**

Reference Modulus - Eref: **160** MPa Reference Temperature -Tref: **25** °C

Temperature sensitivity: ☒ None ☐ Factors ☐ Semi-log ☐ Exponential

Seasonal variation: ☒ None ☐ Factors ☐ Sinusoidal ☐ Exponential

Distress Mode : ☐ Fatigue Cracking ☐ Permanent Deformation

Fatigue Cracking Details

☒ Long. ☐ Trans. ☐ Strain ☒ Stress

Permissible value = **0.39** (MPa) * Mload ^ **-0.285** * (E/ **3000**) ^ C

C = **1** for E < **3000** (MPa) else C = **1** Life **20** years

Permanent Deformation Details

☐ Strain ☒ Stress

Permissible value = **0.1425** (MPa) * Mload ^ **-0.307** * (E/ **160**) ^ C

C = **1.16** for E < **160** (MPa) else C = **1** Life **20** years

Buttons: **OK** **Add name** **Delete** **Cancel**

Joonis 2. ELMOD'i tarkvara pakutav savipinnaste andmete fail

Material Parameters-C:\Program Files\ELMOD4\DK.wpr

Materials New Delete Cancel OK

Material: **AC2**

Reference Modulus - Eref: **2750** MPa Reference Temperature -Tref: **25** °C

Temperature sensitivity: ☐ None ☐ Factors ☒ Semi-log ☐ Exponential

Temperature variation: ☐ None ☐ Temperature ☒ Sinusoidal

Distress Mode : ☒ Fatigue Cracking ☐ Permanent Deformation

Fatigue Cracking Details

☒ Long. ☐ Trans. ☒ Strain ☐ Stress

Permissible value = **195** (mstrain) * Mload ^ **-0.178** * (E/ **6.9**) ^ C

C = **0** for E < **6.9** (MPa) else C = **0** Design Life **10** years

Joonis 3. ELMOD'i tarkvara pakutav asfaltbetooni andmete fail

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks.

LISAD

Material Parameters

Material: **Cement-bound Materials (PCC)**

Reference Modulus - Eref: **35000** MPa Reference Temperature - Tref: **25** °C

Temperature sensitivity: ☒ None ☐ Factors ☐ Semi-log ☐ Exponential

Seasonal variation: ☒ None ☐ Factors ☐ Sinusoidal ☐ Exponential

Distress Mode: ☒ Fatigue Cracking ☐ Permanent Deformation

Fatigue Cracking Details

☒ Long. ☐ Trans. ☐ Strain ☒ Stress

Permissible value = **1.38** (MPa) * Mload ^ **-0.333** * (E / **35000**) ^C

C = **1** for E < 35000 (MPa) else C = **1** Life **20** years

Permanent Deformation Details

☒ Strain ☐ Stress

Permissible value = **451** (mstrain) * Mload ^ **-0.28** * (E / **160**) ^C

C = **0** for E < 160 (MPa) else C = **0** Life **20** years

OK Add name Delete Cancel

Joonis 4. ELMOD'i tarkvara pakutav tsementstabiliseeritud materjali andmete fail

LISA 5. Odemarki ja VSN paigutiste üleminekukordajad

Tabel 1. Odemarki ja VSN paigutiste üleminekukordaja arvutustabel

Konstr.NR	Odemark läbipaine, mm	VSN läbipaine, mm	Läbipainete Jagatis	VSN* keskmine	Vahe %	Täpsus %
1	0,570	0,40	1,413	0,538	1,804	98,196
2	0,597	0,42	1,412	0,564	1,951	98,049
3	0,627	0,45	1,405	0,596	1,973	98,027
4	0,662	0,47	1,396	0,633	1,920	98,080
5	0,702	0,51	1,380	0,680	1,610	98,390
6	0,750	0,55	1,360	0,736	1,061	98,939
7	0,807	0,61	1,333	0,808	-0,092	99,908
8	0,877	0,68	1,285	0,911	-2,962	97,038
9	0,966	0,80	1,212	1,063	-9,404	90,596
10	1,008	0,84	1,205	1,117	-10,953	89,047
11	0,724	0,49	1,483	0,652	5,238	94,762
12	0,752	0,51	1,463	0,686	4,975	95,025
13	0,773	0,54	1,425	0,724	3,801	96,199
14	0,796	0,58	1,382	0,769	2,156	97,844
15	0,820	0,62	1,330	0,823	-0,248	99,752
16	0,850	0,67	1,276	0,889	-3,303	96,697
17	0,860	0,73	1,178	0,975	-9,858	90,142
18	0,886	0,82	1,086	1,089	-18,011	81,988
Üleminekutegur VSN- Odem. keskmine			1,335		R2=	95,482

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks. LISAD

LISA 6. Tagasiarvutusprogrammide nimekiri

#	Programmi nimi	Kontaktisik	Firma	e-maili address
1	UEC-SLAB, PAVERS	Marc Stet	KOAC Pavement Consultants	MarcStet@Compuserve.Com
2	BAP (LEAD)	Joao Rocha de Almeida	New University of Lisbon, Portugal	jr@mail.fct.unl.pt
3	EVERCALC 5.0	Linda Pierce	Washington State DOT	piercel@wsdot.wa.gov
4	CARE	Arthur van Dommelen	DWW, The Netherlands	A.E.vDommelen@DWW.RWS.MINVENW.NL
5	CANUV	Jozef Komacka	University of Zilina, Slovak Republic	komacka@fstav.utc.sk
6	BACKLAY	Mr. Bohuslav Novotny	CVUT, Prag, Czech Republic	bnovotny@mbox.vol.cz
7	BOUSDEF	Haiping Zhou	LAW PCS Reno NV	hzhou@lawco.com
8	MODCOMP 4	Prof. L. H. Irwin	Cornell University	LH11@cornell.edu
9	UMPED, PEDD	Dr. W. Uddin	University of Mississippi	cvuddin@olemiss.edu
10	MICHBACK, MFPDS	Ronald Harichandran	Michigan State University	harichan@egr.msu.edu
11	DAPS	Geoff Rowe	Abatech Computer Services	growe@abatech.com
12	EFROMD2	Binh Vuong	Australian Road Research Board	binv@arrb.org.au
13	ELMOD	Frank Holt	Dynatest	fholt@dynatest.com
14	MODULUS 5.1	Tom Scullion	Texas Transport Institute	t-sculion@tamu.edu
15	SIDMOD	Fuming Wang		fuming@public.zz.ha.cn
16	WESDEF	Don Alexander	Waterways Experimental Station, USA	alexand@mail.wes.army.mil
17	CLEVERCALC			anders.lenngren@vv.se
18				

EI VASTA

LISA 7. DELSAN - konstruktsioonide andmed ja tõmbepinged

Tabel 1. 3 ja 2 kihiliste konstruktsioonide pingete arvutusnäited.

NR	Materjal	Paksus (mm)	Moodul (MPa)	Suhteline deformatsioon 10 ⁶	Pinge (MPa)	Tõmbepinge- (MPa)
1	A/B	250	3600	324	0,753	0,648
	Kruus	500	180			
	Liiv	500	100			
2	A/B	240	3600	342	0,803	0,684
	Kruus	450	180			
	Liiv	450	100			
3	A/B	230	3600	361	0,861	0,722
	Kruus	400	180			
	Liiv	400	100			
4	A/B	220	3600	382	0,928	0,764
	Kruus	350	180			
	Liiv	350	100			
5	A/B	210	3600	406	1,002	0,812
	Kruus	300	180			
	Liiv	300	100			
6	A/B	200	3600	431	1,089	0,862
	Kruus	250	180			
	Liiv	250	100			
7	A/B	190	3600	460	1,196	0,92
	Kruus	200	180			
	Liiv	200	100			
8	A/B	180	3600	493	1,325	0,986
	Kruus	150	180			
	Liiv	150	100			
9	A/B	170	3600	534	1,497	1,068
	Kruus	100	180			
	Liiv	100	100			
10	MK	160	3600	569	1,61	1,138
	Kruus	100	180			
	Liiv	100	100			
11	MK	250	800	325	0,405	0,455
	Kruus	500	180			
12	MK	240	800	343	0,433	0,4802
	Kruus	450	180			
13	MK	230	800	363	0,465	0,5082
	Kruus	400	180			
14	MK	220	800	385	0,5	0,539
	Kruus	350	180			
15	MK	210	800	409	0,543	0,5726
	Kruus	300	180			
16	MK	200	800	436	0,59	0,6104
	Kruus	250	180			
17	MK	190	800	468	0,648	0,6552
	Kruus	200	180			

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks. LISAD

18	MK	180	800	505	0,723	0,707
	Kruus	150	180			
19	MK	170	800	555	0,82	0,777
	Kruus	100	180			
20	MK	160	800	593	0,865	0,8302
	Kruus	100	180			

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks. LISAD

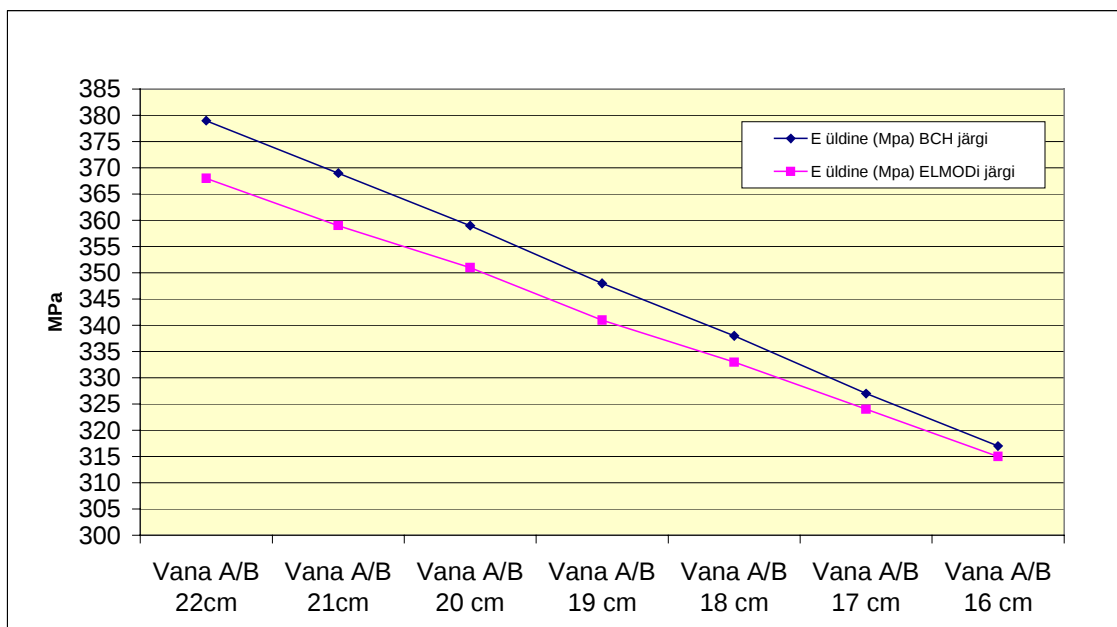
Tabel 1. 3 ja 2 kihiliste konstruktsioonide läbipainete arvutusnäited.

konstruktsioon:	Paksus (mm)	Moodul (MPa)	suht. deformatsioon 10^6	Läbipaine	Läbipaine
				Delsan, mm	BCH, mm
1 A/B	250	2000	324	0.570	0.4
Kruus	500	180			
Liiv	500	100			
2 A/B	240	2000	342	0.597	0.42
Kruus	450	180			
Liiv	450	100			
3 A/B	230	2000	361	0.627	0.45
Kruus	400	180			
Liiv	400	100			
4 A/B	220	2000	382	0.662	0.47
Kruus	350	180			
Liiv	350	100			
5 A/B	210	2000	406	0.702	0.51
Kruus	300	180			
Liiv	300	100			
6 A/B	200	2000	431	0.750	0.55
Kruus	250	180			
Liiv	250	100			
7 A/B	190	2000	460	0.807	0.61
Kruus	200	180			
Liiv	200	100			
8 A/B	180	2000	493	0.877	0.68
Kruus	150	180			
Liiv	150	100			
9 A/B	170	2000	534	0.966	0.80
Kruus	100	180			
Liiv	100	100			
10 A/B	160	2000	569		0.84
Kruus	100	180			
Liiv	100	100			
Algavad 2 kihiliste konstruktsioonide arvutusnäited.					
11 MK	250	1400	325	0.742	0.49
Kruus	500	180			
12 MK	240	1400	343	0.752	0.51
Kruus	450	180			
13 MK	230	1400	363	0.773	0.54
Kruus	400	180			
14 MK	220	1400	385	0.796	0.58
Kruus	350	180			
15 MK	210	1400	409	0.820	0.62
Kruus	300	180			
16 MK	200	1400	436	0.850	0.67
Kruus	250	180			
17 MK	190	1400	468	0.860	0.73
Kruus	200	180			
18 MK	180	1400	505	0.886	0.82
Kruus	150	180			
19 MK	170	1400	555	0.869	0.93
Kruus	100	180			
20 MK	160	1400	593	0.790	0.97
Kruus	100	180			

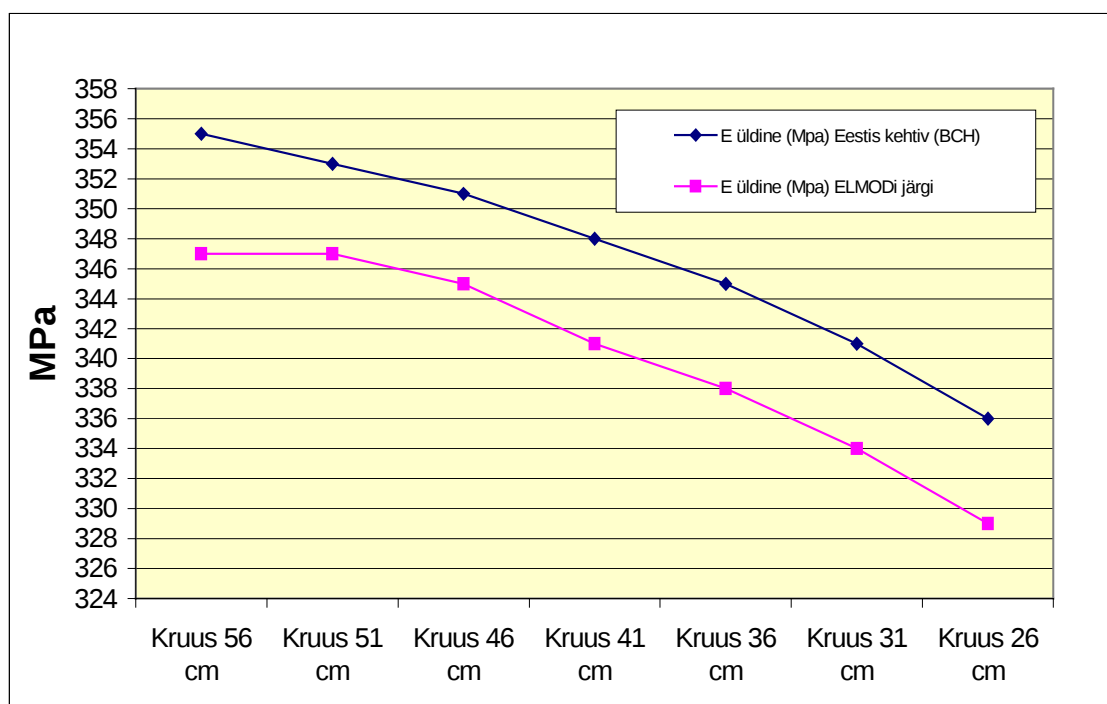
LISA 8. Arvutusnäited – VSN + ELMOD

Konstruksioon I

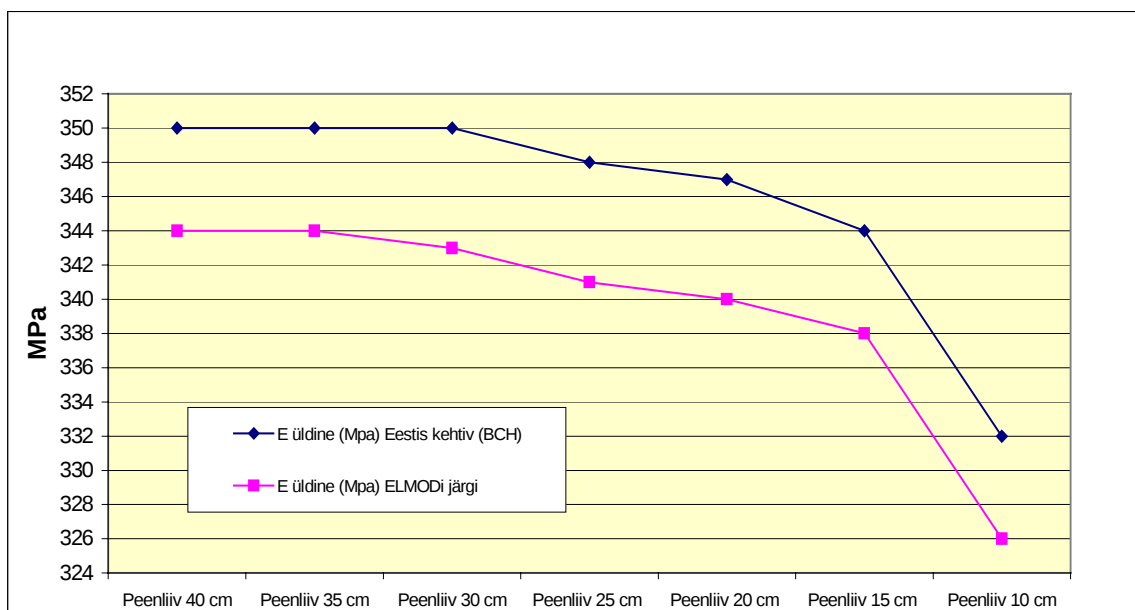
On leitud konstruktsiooni I e-üldise muutuse sõltumine erinevate konstruktiivsete kihtide paksuste muutumisest vastavalt VSN'ist saadud ja FWD põhjal arvutatud moodulitega.



Joonis 1. Konstruktsiooni e-üldise muutuse sõltuvus a/b kihtide paksuste muutumisest



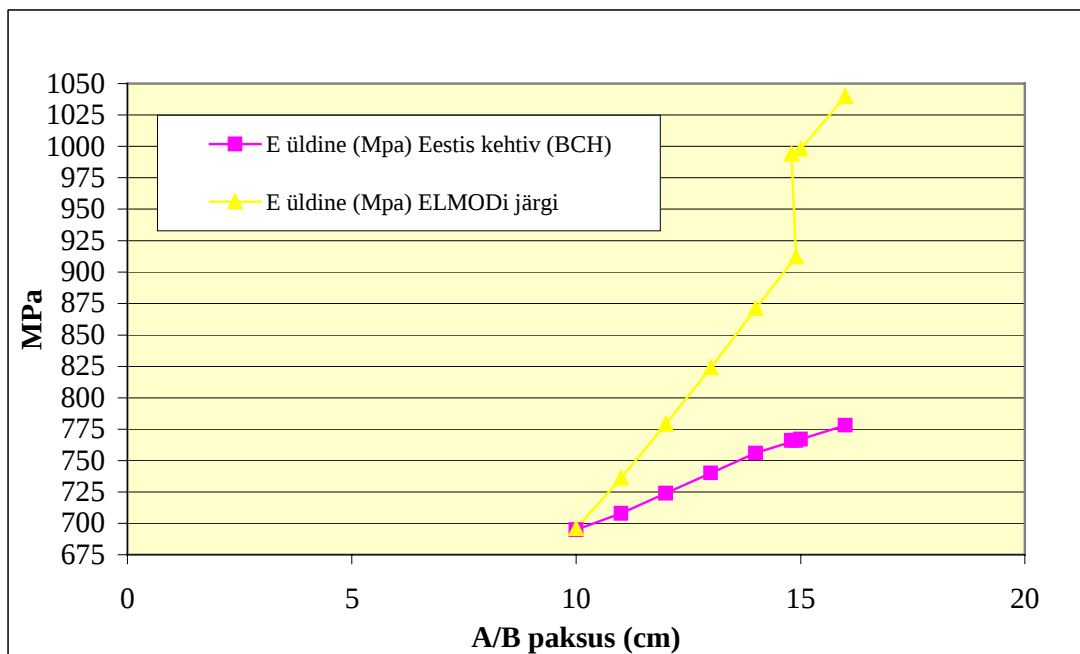
Joonis 2. Konstruktsiooni e-üldise sõltuvus kruusakihtide paksuste muutumisest



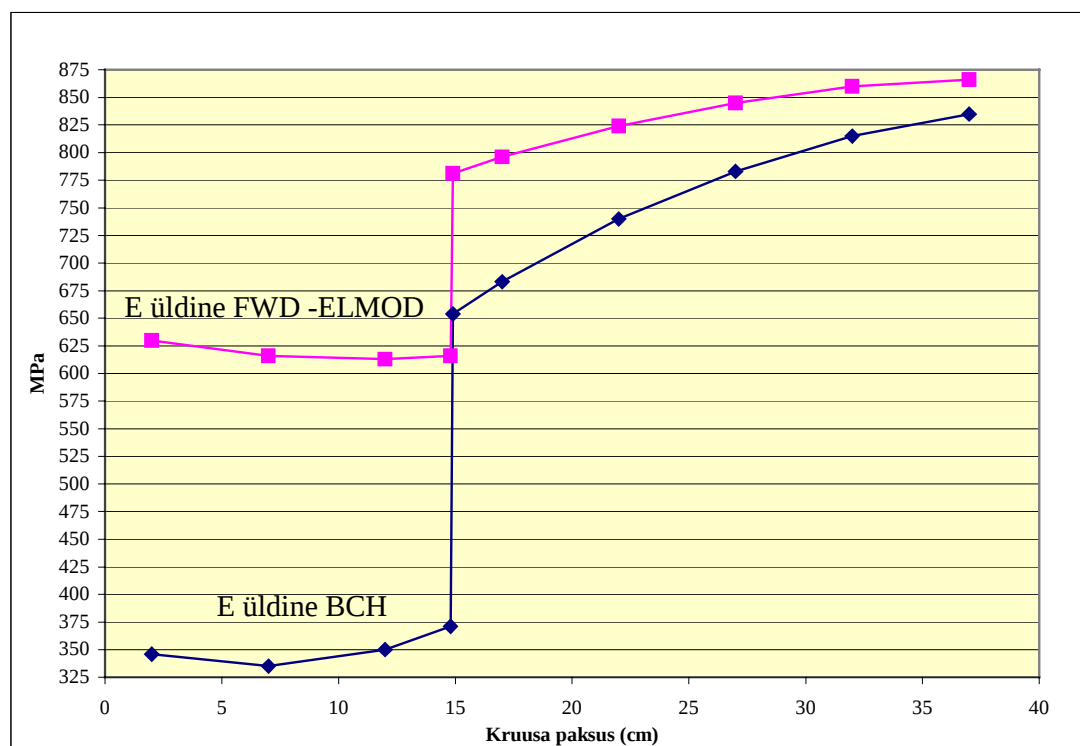
Joonis 3. Konstruktsiooni e-üldise sõltuvus liivakihi paksuste muutumisest

Konstruksioon II

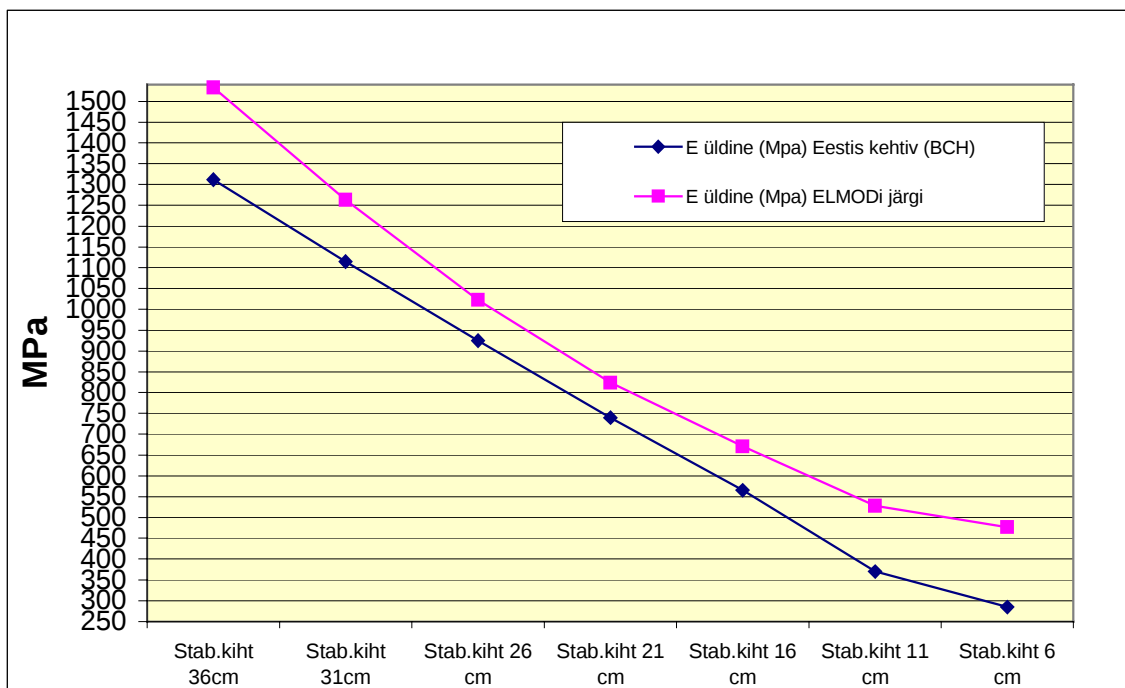
On leitud konstruktsiooni II e-üldise muutuse sõltumine erinevate konstruktiivsete kihtide paksuste muutumisest vastavalt VSN'ist saadud ja FWD põhjal arvutatud moodulitega.



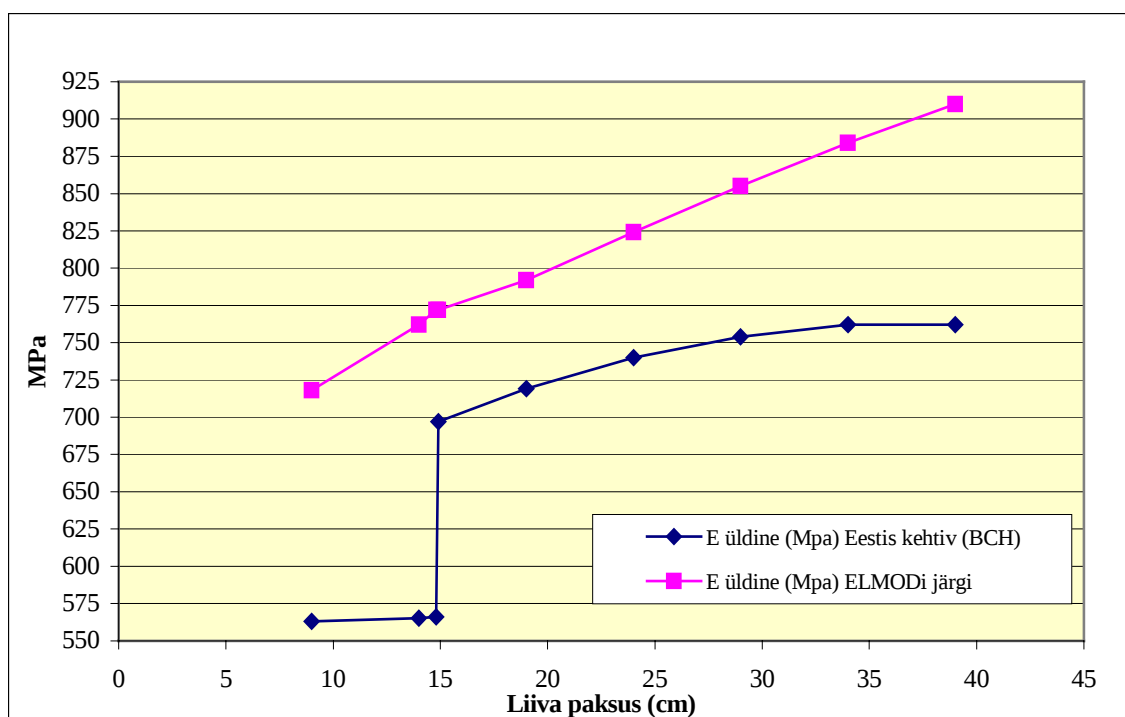
Joonis 4. Konstruktsiooni e-üldise sõltuvus a/b kihi paksuste muutumisest



Joonis 5. Konstruktsiooni e-üldise sõltuvus kruusakihi paksuste muutumisest



Joonis 6. Konstruktsiooni e-üldise sõltuvus stabiliseeritud kihi paksuste muutumisest



Joonis 7. Konstruktsiooni e-üldise sõltuvus liivakihi paksuste muutumisest

LISA 9. VSN ja DELSAN valemid

Tõmbepingete valemid

VSN tõmbepingete valem:

kui $H/d > (1,42)/(E_1/E_2) + 0,127$, siis

$$R_1 = 1,28 * (E_1/E_2) * (H/d) * [1 - 0,637 * \arctan(C) * [\arctan(1/C)]^2] * p \quad (1)$$

kui $H/d \leq (1,42)/(E_1/E_2) + 0,127$, siis,

$$R_1 = (1,818 + 0,162 * (E_1/E_2)) * [1 - 0,637 * \arctan(C_1) * [\arctan(1/C_1)]^2] \quad (2)$$

kus

$$C = A * (H/d)^{0,9} + B;$$

$$C_1 = A(1,42/(E_1/E_2) + 0,127)^{0,9} + B;$$

$$A = 0,083 * [\ln(E_1/E_2)]^{2,2+1,870};$$

$$B = 0,00004 * (E_1/E_2)^{1,4+0,007}; \text{ kui on mitmekihiline asfalt siis } H = h_1 + h_2;$$

E_n - vastava kihi elastsusmoodul, MPa

h_n - vastava kihi paksus, cm

d - katte ja ratta kontaktpinnaga pindvõrdse ringi läbimõõt, cm

DELSANi seotud kihi tegeliku tõmbepinge valem:

$$\sigma_z = \sigma_0 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{a}{z} \right]^3}} \right) \quad (3)$$

kus

σ_0 - plaadi kontaktsurve, MPa

a - plaadi raadius, mm

z - kihi paksus, mm

Paigutiste valemid

VSN paigutise valem:

$$s = 2(1+\nu) \cdot \frac{(d \cdot p)}{E_{\text{uld}}}$$

kus

ν - Poissoni tegur

d - koormuspinna raadius, mm

p – kontaktsurve, MPa

E_{uld} - üldine elastsusmoodul, MPa

DELSAN kihi paigutise valem:

$$d_z = \frac{(1+\nu)\sigma_0 a}{E} \left(-\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{a}{z}\right)^2}} + (1+\nu) \left(\sqrt{1+\left(\frac{z}{a}\right)^2} - \frac{z}{a} \right) \right)$$

kus

σ_0 - plaadi kontaktsurve

a - plaadi raadius, mm

z - kihi paksus, mm

Katendite dimensioneerimismetoodikate võrdlus. Metoodika leidmine FWD mõõtmistulemuste kasutamiseks katendi kandevõime hindamiseks ja dimensioneerimiseks. LISAD

LISA 10. Läti SEGA tarkvara.

Läti Tehnikaülikooli professor Deternis Dzenis'e väljatöötatud Läti AASHTO versioon, mis kasutab SN'i ehk struktuuri numbrit.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Structure calculation for road	A6	section	61,1 - 65,4 km				Subresults -1,645 alfa 0,004339 6526,696 18,59891		
2	Input data:									
3	Safety level Z_R (90% or 95%)	95								
5	Elasticity module for subgrade M_r (MPa)	45								
6	Current loading of the section, E_{10}	900								
7	Lane factor F_j	0,5								
8	Annual growth factor for E_{10} p	0,03								
9	Calculation period, T (years)	15								
10	Structural Number SN (needed)	4,42								
11	Accumulated lane loading for calculation period W_{18}	7453887								
12										
13	Layer No.	layer thickness cm D_n	Layer factor a_n	Drainage factor m_n				1,3 4,9 1,8 3,0 0,0 0,0		
14	Layer No.1	3	0,42	1						
15	Layer No.2	19	0,26	1						
16	Layer No.3	8	0,22	1						
17	Layer No.4	25	0,11	1,1						
18	Layer No.5									
19	Layer No.6									
20										
21	SN (calculated)	4,32								
22										
23	deltaSN	-0,09	Unsuufficient bearing capacity							

Joonis 1: Lätis AASHTO põhjal väljatöötatud SEGA tarkvara.

LISA 11. Summary

Present survey is considering a combination of FWD- ELMOD as example of backcalculation method and program which bases directly on Odemarks method to compare with Russian VSN 46-83. Also there is given overview of methods which are used in other countries and general picture about international design standards.

Backcalculation program named ELMOD was studied. The contact was made with producing firm and also with users from range of countries. Many states were visited - countries that use backcalculation and also those ones which use catalogue type design standards. Different type of data and background information was collected. Comparative calculations were made with FWD data and with parameters that were taken from VSN 46-83. There was also comparative figures of COST 336 and VSN 46-83 parameters. The program was made that uses Odemarks method and comparative calculations were made with Danish program that uses same formulas. Results, which could have been compared with VSN, were selected and same calculations were made with VSN. Results were presented on figures and tables. There was presented positive and negative points of those methods in Estonian environment.

Real calculation samples were chosen from Tallinn-Pärnu-Ikla highway. Idea was to choose section which would have same properties at least for few kilometers. 20 theoretical constructions were chosen with idea that modules should reduce from top layers towards ground layer and also constructions with drastical properties should be considered respect to bring out the limits of different calculation formulas. That kind of parameters were chosen in parameters comparative figures that were represented in both-COST and VSN standards.

Although there haven't been any such research before in Estonia, there was an attempt to explain differences according to every countries climate and geological background and to give overview what is going on around the world, without getting in too deep with other methods than backcalculation.

In this research become clear that it is not possible to adapt with VSN any western design method, because input data of VSN and also calculation results base on different parameters. In same time backcalculation represents in Western Hemisphere normative method of calculation, which also have lot of positive characteristics. That is the reason why we shouldn't look a side of this method. In further research there should be made more detail investigation of those programs and made more clear decisions on which conditions calculated FWD modules could be used in our conditions and rough transition formula which considers all the parameters that are different in FWD tests and VSN calculations should be estimated.