



TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO

Karsten Holter

KATENDIARVUTUSE ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2024



Karsten Holter

KATENDIARVUTUSE ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Teedeehitus

Juhendaja: Ain Kendra, MSc

Tallinn 2024

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina Karsten Holter

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Katendiarvutuse analüüs

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, Karsten Holter

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja Ain Kendra

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäevad digiallkirjades)

SISUKORD

LÜHENDITE LOETELU	6
SISSEJUHATUS	7
1 SIIRDETEGURID	9
1.1 Praktilised siirdeteguri arvutused	11
1.2 Rehvitüübi mõju siirdetegurile	14
2 KAP JA RATTATÜÜP	16
2.1 Probleem – üksikrattaga telgi on enam kui paarisrattaga.....	17
2.2 Tegelikud koormused kaalupunktides.....	18
3 GAPMAN JA MUUGA SADAMA TEE	20
3.1 Mõõtmised	21
3.2 Muuga sadama tee vajumite analüüs	24
3.3 Roopa tekke põhjused	25
4 RIIGITEE NR 4 TALLINN-PÄRNU-IKLA KATENDIARVUTUSE ANALÜÜS.....	27
5 MAKSUMUSE VÕRDLUS KUI KASUTADA PAARIS- VÕI ÜSIKRATTATEGURIT	30
5.1 Konstruktsiooni kasutusea arvutuskäik	35
5.2 Tulemuste analüüs	36
6 TULEMUSE VÕRDLEMINE KRP-GA.....	37
KOKKUVÕTE	40
SUMMARY.....	42
VIIDATUD ALLIKAD.....	44
Lisa 1. Gapman: Katse I 1/4	48
Lisa 2. Gapman: Katse I 2/4	49
Lisa 3. Gapman: Katse I 3/4	50
Lisa 4. Gapman: Katse I 4/4	51
Lisa 5. Gapman: Katse II 1/4.....	52
Lisa 6. Gapman: Katse II 2/4.....	53
Lisa 7. Gapman: Katse II 3/4.....	54
Lisa 8. Gapman: Katse II 4/4.....	55
Lisa 9. Gapman: Katse III 1/5.....	56
Lisa 10. Gapman: Katse III 2/5	57
Lisa 11. Gapman: Katse III 3/5	58
Lisa 12. Gapman: Katse III 4/5	59
Lisa 13. Gapman: Katse III 5/5	60

Lisa 14. Gapman: Katse IV 1/3	61
Lisa 15. Gapman: Katse IV 2/3	62
Lisa 16. Gapman: Katse IV 3/3	63
Lisa 17. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp I (paarisratas)	64
Lisa 18. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp I (üksikratas)	65
Lisa 19. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp II (paarisratas)	66
Lisa 20. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp II (üksikratas)	67
Lisa 21. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp III (paarisratas)	68
Lisa 22. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp III (üksikratas)	69
Lisa 23. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp IV (paarisratas)	70
Lisa 24. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp IV (üksikratas)	71
Lisa 25. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp V (paarisratas)	72
Lisa 26. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp V (üksikratas)	73
Lisa 27. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp VI (paarisratas)	74
Lisa 28. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp VI (üksikratas)	75

LÜHENDITE LOETELU

KAP	– Katendirvutuse programm – Excel-rakendus mis realiseerib MA (Maanteeamet) 2001-52 ja MA (Maanteeamet) 2017-003 juhendi arvutusalgoritmid
KRP	– Katendi Rehkendusprogramm – Excel-rakendus, mis tugineb Soome juhisel 2018/038
E-moodul	– Teekonstruktsiooni või selle kihi elastsusmoodul (MPa)
TTÜ	– Tallinna Tehnikaülikool, TalTech
60t uuring	– Raskemate ja pikemate veoste mõju arvutamine riigiteede taristule
VAAB	– Veoauto ja autobuss – liiklusloenduse sõidukite liigituse komponent
SAPA	– Sõiduauto ja pakiauto – liiklusloenduse sõidukite liigituse komponent
AR	– Autorong – liiklusloenduse sõidukite liigituse komponent
TEN-T	– ik. <i>Trans-European Transport Network</i> – Üle euroopalised võrgustikud
Odemark	– Sven Nils Odemark, kaasaegse katendiarvutuse üks alusepanijaid
VSN 46-83	– vk. <i>Ведомственные строительные нормы</i> – Nõukogude Liidu ehitusnorm
PMB	– ik. <i>Polymer modified bitumen</i> – Polümeerbituumen
ODN	– vk. <i>отраслевые дорожные нормы</i> – Vene Föderatsiooni teedenorm
WIM	– ik. <i>Weight In Motion</i> – sõidukite kaalumise maanteekiirusel

SISSEJUHATUS

Ehituse peamiseks eesmärgiks on luua uut väärtust ning teha seda selliselt, et tagatud oleks nii turvalisus, kui ka praktilisus. Uue tee ehituse puhul on oluline arvesse võtta autostumise kasvu, mis esitab nõuded tee ristlõikele. Teedevõrk peab tagama vajalikud ühendused arenevale maakasutusele. Majanduse areng käib käsikäes transpordiga, raskesõidukid kasvavad nii mõõdus (pikkus, kõrgus) kui kaalus. Riik on võtnud terve rea kohustusi rahvusvaheliste ühenduste väljaehitamiseks (TEN-T) milleks on ka eraldatud vahendid Euroopast, kuid välisfinantseerimise avanedes on samavõrd piiratud siseriiklikke eraldisi. [1] Viimaste aastate muutused maailmas (COVID, sõjategevus Ukrainas) on veelgi kahandanud teedehituse finantseerimise prioriteetsust. Oluliseks peetakse raudteeühenduse kaasajastamist lootuses, et see kahandab autotranspordi rolli, kuigi Euroopas sellist mõju veel täheldatud ei ole – Rail Balticu finantseerimiseks on veelgi vähendatud teehoiu rahastamist ja kuigi RB sisaldab ka teedehituslikke töid, on probleemiks asfalttööde mahu kahanemine.

Teekatendid projekteeritakse eeldatava korduvkoormuste läbikute järgi kavandatud kasutusea jooksul. Raskesõidukid taandatakse siirdeteguritega normtelgedeks ning logaritmivalemiga leitakse uue katendi vajalik kandevõime. [2] Seni kasutatakse riigiteedel 1983. aasta juhendist pärit seoseid ja kuigi siirdetegureid on uuendatud, ei arvesta algoritmid muutunud koormusolukorda [3]. Programm KAP (Katendi Arvutuse Programm) tugineb juhendil VSN 46-83 [3] millest on realiseeritud meie kliimavööndit käsitlev osa ilma staatilise koormuse kontrollita (ameti tollasel hinnangul riigiteedel staatilist koormust ei esine) [4]. Võrreldes KAP arvutustulemusi teiste riikide reglemendi alusel arvutatuga, selguvad mõned olulised aspektid – esiteks, on selgelt alahinnatud reaalseid koormusdiapasoone, algoritmid toimivad loogiliselt madalatel koormustel kuid koormuse kasvuga kasvab sellest tulenev vajalik kandevõime marginaalselt. Ning teiseks, on valitud liivade elastsusmoodulid kõrged, mistõttu kasutatakse konstruktsioonides liiga õhukest alust ja loodetakse, et liivadega õnnestub tagada katendile vajalik reziim (veereziim, külmakindlus, kandevõime). Tulemusena võime küll arvutada konstruktsiooni kandevõime, kuid see ei ole millegagi mõõdetav. Ning kuigi eeldatakse katendi 20-aastast tööiga, jääb see tegelikkuses oluliselt lühemaks seetõttu, et katend on aladimensioneeritud.[5], [6]. Lisaks KAP-ile on loodud ka alternatiivne Katendi Rehkendusprogramm (koostatud TTÜ teedehituse magistritöö raames; Simmo Talpas-Taltsepp, 2024) [7], mis tugineb Soome teekonstruktsioonide projekteerimisjuhendile [8]. KRP-ga arvutatu võimaldab sidumata kihtide osas võrrelda tulemust plaatkoormuskatse või teiste seadmetega mille tulemused on plaatkoormuskatsega võrreldud. [7]

Põhilise probleemkohana, mis takistab ühelt programmilt teisele (KAP-KRP) üleminekut Eesti riigiteedel on Transpordiamet välja toonud teekonstruktsioonide kallinemise. Argument peab paika suurema liiklusega teedel ja juhul, kui võrdluseks kasutatakse Soome juhise astmelist skeemi (kandevõimenõuded on esitatud tugevusklasside lõikes, mitte otsese funktsionaalse seosena koormusest) [9]. KAP pooldajad on seisukohal, et KAP potentsiaal ei ole veel täielikult ära kasutatud. Ühe näitena tuuakse asjaolu, et kui kasutada arvutuseluseks üksikrattaid (KAP võimaldab seni veel valida, kas koormus on üksik- või paarisrattaga, kuid määratletud ei ole, kui suur peaks olema üksikrataste osakaal liikluses, et tohiks arvutuseluseks seda arvestada). Üksik- ja paarisratta koormuse korrektsem käsitus KAP'i kasutamisel tooks tõenäoliselt ka KAPiga arvutatud konstruktsiooni tusedamaks ja omakorda lähedasemaks KRP arvutustega, mis muudaks ülemineku odavamaks.

Käesoleva uuringu eesmärgiks on tuginedes 60-tonni töös kasutatud algandmetele ja meetodikale, võrrelda erinevate koormuste ja aluspinnaste lõikes valitava rattatüübi mõju lõpptulemusele ja teekonstruktsioonide maksumusele. Hüpoteesi järgi kujuneb üksikrattale dimensioneeritud katend paksemaks ja kallimaks kui paarisrattale dimensioneeritu. Selleks, et teha kindlaks kui suur see vahe on tuleb teha nii KAP, kui ka KRP programmis vastavad arvutused. [7], [9]

Arvutuste tulemusena koostatakse vastavad maatriksid teekonstruktsioonidest kahele aluspinnasele, neljale koormusgrupile ja neljale arvutusskeemile. Esmalt KAP ja eeldades koormuseks paarisrattast, teiseks KAP üksikrattaga, kolmandaks KRP ja astmelise kandevõimenõudega nagu on kirjas Soome juhises (2018/038) [8] ning neljandaks KRP ja logaritmilise seosega koormuse ja vajaliku kandevõime vahel, millega arvestas Talpas-Taltsepp oma lõputöös [7]. Kasutades 60-tonni uuringus välja toodud materjalide ühikhindasid, leiame nimetatud riigiteede katendikonstruktsioonide maksumuse neljas variandis [9].

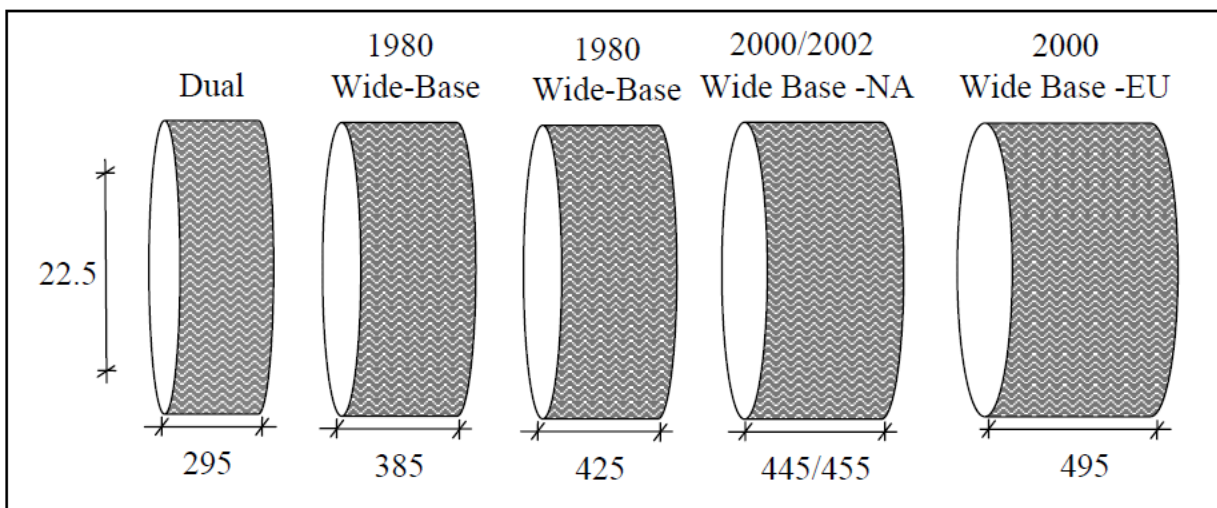
1 SIIRDETEGURID

Paaris- ja üksikratta poolt tekkivad jõud teekonstruktsioonidele on erinevad ning seetõttu erineb ka nende arvestamine 10-tonnisteks normtelgedeks. Teisisõnu kasutatakse siirdetegureid, et loendatud sõidukid teisendada 10-tonniste normtelgede arvuks. 2015. aastal koostatud uuringuga võrreldi siirdeteguri arvutusalgoritme ja valiti sobilikuks Taani algoritm, mille alusel on koostatud ka hetkel kehtivad siirdetegurid, kuigi tuginedes vaid eelnenud uuringutes kasutatud kaalumisanndmete keskväärtustele igas sõidukigrupis. Paarisratta ja üksikratta vahe on siirdetegurialgoritmis laias laastus kahekordne (Joonis 6) [2]. Senine loendustehnika ei suuda eristada üksik- ja paarisrattaid. Sõidukite liigiline jaotus aruandluses piirdub kolme kategooriaga - SAPA, VAAB või AR. Tavaline liiklusloendusseade (statsiooniarsete induktiivmähistega püsiloendus) suudab eristada 10 erinevat tüüpi sõidukit ning voolikloendus (telgede ja nende vahekauguste hindamine) 13 erinevat tüüpi sõidukit. Viimastel aastatel minnakse üle kaasaegsemale tehnoloogiale mis tugineb video, laser- või radartehnikaga fikseeritud sõidukite pikkusel ja mitte telgede arvul. Eestis on olnud kokku neli kaalupunkti, Pärnu lähedal lagunes, Muuga sadama tee punkt oli eravalduses ning riigi hallata on olnud Adavere ja Luige. Need kõik on oma toimivuse lõpetanud ja häälestatakse kaasaegset Ääsmäe-Kernu lõigus, mis peaks suutma eristada ka üksik- ja paarisrattad igale teljele (rataste tsentrite vahekaugus igal teljel) ja kus püütakse rakendada kiiruskaamera põhimõtteid ülekaaluliste sõidukite tuvastamiseks. Seniste siirdetegurite uuringud tuginevad ajaloolisel andmestikul, kus paarisratta kasutus on oletuslik juhindudes teatud sõidukite telgede arvust ja telgede vahekaugustest. 2015. aasta uuringu raames ei analüüsitud eraldi kaalupunktide andmeid vaid kasutati varasemate tööde koondinfot. 2023. aasta 60-tonni töös kasutati Adavere ja Luige kaalupunktide 2020 aasta andmeid (miljon kaalutud raskesõidukit) [9]. Hinnang, kas konkreetsetel teljel on üksik- või paarisrattas, on oletuslik seni, kuni ei suudeta kasutada Ääsmäe-Kernu andmeid. Siirdetegurikomplekt lepatakse kokku üle riigi ühtne, kuigi otseselt kaalumisanndmed näitavad väga suuri erisusi erinevate kaalupunktide keskmiste vahel nagu ka erisusi suundade lõikes (ühes suunas koormaga, tagasi tühjalt). [9] Siit tulenevalt on paratamatus, et valitud keskväärtused ei pruugi ühegi konkreetse teelõigu jaoks olla üheselt adekvaatsed. Küll aga peaks tulemus riigi keskmisena olema objektiivne.

Raskesõidukite osakaal liikluses varieerub suures piiris, võrreldes näiteks Tallinna piiri ületavate riigimaanteedega liikluse koosseisu, leiame, et mõnel riigiteel on raskeliikluse osakaal alla 3%, kui teisel on see 25% (Nagu selgub 2024. aasta kevadel kaitstavas TTÜ magistritöös "Katendikataloogi koostamine Tallinna tüüpkatendite baasil", mille autoriks on Verner

Martisen). Kahtlemata on erinev ka raskeliikluse enda struktuur. Suurim raskeliikluse osakaal on trassil, mis ühendab Muuga sadamat Ikla piiripunktiga (Via Baltica)[10].

KAP aluseks olnud juhises VSN 46-83 on paarisrattaga arvestatud põhimõtteliselt kahes kohas – esiteks siirdetegurite koosseisus, mis määrab arvutuste aluseks võetud koormuse ning teiseks asfaldikihtide arvutamises tõmbele (asfaldi alakihi tõmbepinged), kus vaikeväärtusena loetakse paarisratast (tegur 0,85) ja erikoormuste (ühe rehviiga ratas) korral tegur 1,0. 1983 oli enamkoormatud telje koormuseks paarisratas, üksikratast kasutati kas kergveokitel (UAZ) või esiteljel, mis niigi väiksema koormusega. [3]



Joonis 1. Raskesõidukite rehvitüüpide liigitus [2]

385 mm rehvid (super single) on turule toodud alates 1980, kuid laiema leviku on need saavutanud käesoleval sajandil [11]. Võimalik, et ajal kui juhend koostati (enne 1983) ei olnud N.Liidus veel selliseid rehve ja laia üksikrehvi loeti erikoormuseks, samuti puudusid teaduslikud uuringud laia rehvi võimaliku mõju hindamiseks, sest esimesed teadaolevad uuringud on aastast 1977 [12]. Paraku on arengud olnud kiired ja 385 mm laia mustriiga super single-üksikrehv on Euroopas kujunenud poolhaagiste valdavaks [4]. Edasised arengud on suunanud pigem veel laiemate rehvide kasutusele, neid rakendatakse nii haagistel (415 mm) kui eriti veotelgedel (445 või 455 mm) [4].

2015. aasta uuringu alusel on koostatud alates 2017. aastast kehtivad siirdetegurid (Joonis 2), kus autorongi teguriks on 3,76. Need tegurid on kirjeldatud elastsete teekatendite projekteerimisjuhises. [2], [13]

Liik	Teljed	Siirdetegur
Keskmine veoauto (VK)	1+1	0,4
Kaheteljeline raske veoauto (VR2; 18 tonni)	1+1	2,66
Kaheteljeliste veoautode keskmine (VA2)	1+1	1,5
Kolmeteljeline raske veoauto (VR3; 26 tonni)	1+2	2,56
Neljeteljeline raske veoauto (VR4; 32 tonni)	2+2	4,33
Keskmine buss (BK2)	1+1	0,4
Kaheteljeline raske buss (BR2)	1+1	2,6
Kaheteljeliste busside keskmine (B2)	1+1	1,5
Kolmeteljeline raske buss (BR3)	1+2	2,6
6-12 meetri pikkuste sõidukite keskmine (VA/AB)		2,67
Sadulrong või autorong, 3 telge	3	2,56
Sadulrong või autorong, 4 telge (36t)	4	4,23
Sadulrong või autorong, 5 telge* (40t)	5	4,35
Sadulrong või autorong, 6 ja enam telge (44t)	6 ja enam	4,8
Viieteljeline konteineriveok (2+3; 44 tonni)	5	8
Kuueteljeline metsaveok (3+3; 48 tonni)	6	5,46
Seitsmeteljeline metsaveok (3+4; 52 tonni)	7	4,2
Üle 12 meetri pikkuste sõidukite keskmine (AR)		3,76

Joonis 2. Arvutusveokite teljekoormuse taandamise siirdetegurid [2]

1.1 Praktilised siirdeteguri arvutused

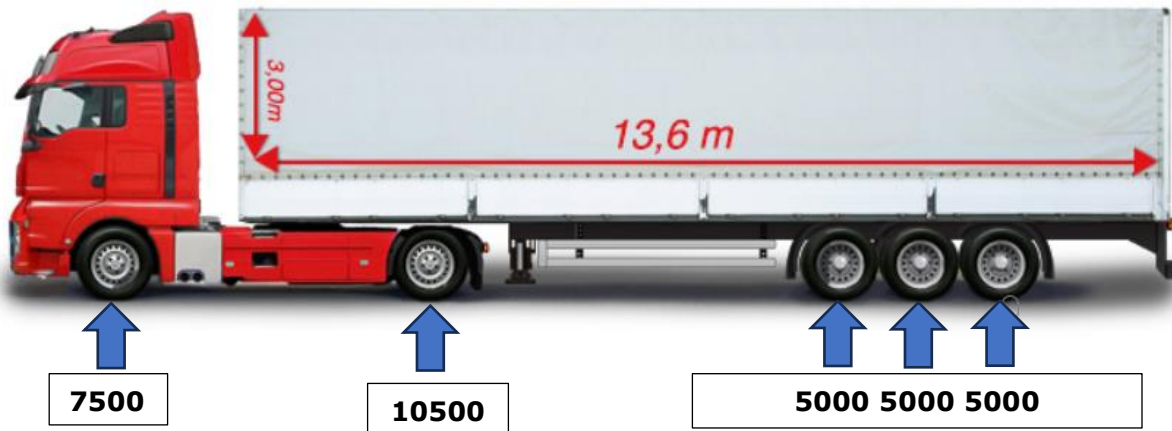
2023. aastal on põhjaliku uuringu raames püütud siirdetegureid arvutada tegelike kaalumistulemuste baasil otseselt (varasemad tuginesid kaalumisandmete sõidukiliigi keskmistel teljekoormustel). Erinevalt varasemast on astmefunktsiooni osas valitud astendaja väärtuseks 4,0 (Nii Vene algses kui Transpordiameti juhendites kasutati astendajat 4,4). Järgnevalt kirjeldatakse arvutuste loogikat. [9]

Võetakse ette kaalumisandmete logi (antud juhul Adavere ja Luige 2020. aasta andmed) ning arvutatakse igale teljele tema siirdetegur ja summeeritakse sõiduki telgedelt taandatud 10-tonnised normteljed (et hiljem leida igale sõidukiklassile keskmine tulemus). [9], [2]

- Üksikratastega telg (juhttelg) = $5,39 \times (\text{teljekoormus (kg)} / 10000)^4$;
- Paarisratastega telg = $1,49 \times (\text{teljekoormus (kg)} / 10000)^4$;
- Üksikratastega telg (mitte juhttelg) = $3,74 \times (\text{teljekoormus (kg)} / 10000)^4$.

Kõik arvutatud tulemused liidetakse ühe sõiduki piires kokku ning saadakse ühe konkreetse sõiduki siirdetegur. [2]

Viie-teljelise autorongi teljekoormuse arvestamine, kui normteljed moodustavad kokku 33 000 kg (Joonis 3).



Joonis 3. Viie teljeline autorong [14]. Iga normtelje peale on arvestatud kindel mass, et sooritada siirdeteguri arvutus.

Viie teljelise autorongi siirdeteguri arvutamine kui poolhaagisel üksikrattad:

$$\text{Siirdetegur} = 5,39 \times (1.\text{Teljemass})^4 + 1,49 \times (2.\text{Teljemass})^4 + 3,74 \times (3.\text{Teljemass})^4 + 3,74 \times (5.\text{Teljemass})^4 + 3,74 \times (5.\text{Teljemass})^4 = 4,22 \text{ [2]}.$$

$$\text{Siirdetegur} = 5,39 \times (7500/10000)^4 + 1,49 \times (10500/10000)^4 + 3,74 \times (5000/10000)^4 + 3,74 \times (5000/10000)^4 + 3,74 \times (5000/10000)^4 = 4,22.$$

Viie teljelise autorongi siirdeteguri arvutamine, kui poolhaagisel oleks paarisrattad.

$$\text{Siirdetegur} = 5,39 \times (7500/10000)^4 + 1,49 \times (10500/10000)^4 + 1,49 \times (5000/10000)^4 + 1,49 \times (5000/10000)^4 = 3,80.$$

Võrdlusest järeldub, et paarisrattastega kombinatsioon mõjub sama teljekoormuse juures teekonstruktsioonile 10% väiksema koormusena. Kui aga kasutada tegelikke kaalumistulemusi, võime saada oluliselt suurema hajuvuse ning ülekoormatud sõiduki mõju kattele on seda suurem. [9]

60t uuringus teostati analüüs Adavere ja Luige WIM mõõte-punktide 2020. aasta andmete põhjal uuesti ning saadi alternatiivsed võimalikud siirdetegurid (Joonis 4). [9]

	Kehtivad tegurid		2004	Detailse arvutuse tulem		Keskmiste teljekoormuste baasil	
	Eesti	Soome	Soome	Eesti	Soome	Eesti	Soome
VAAB	2,67	0,90	0,80	1,12	0,80	0,51	0,36
AR	3,76	3,20	2,90	4,29	2,86	2,82	1,88

Joonis 4. Siirdetegurite muutus vahetult kaalupunkide andmete baasil [9]

Antud info põhjal saab järeldada, et AR on olnud aja jooksul alahinnatud ning VAAB grupp pigem ülehinnatud (umbes 2 korda). Viimase osas on tõenäoline põhjus kaubikute suurem osakaal kui sajandivahetuse aegsetes loendustes, mis võib tuleneda ka enne 2007/2008 kasutatud loendustehnoloogiast [15].

Arvutatud on nii Eesti kui ka Soome normtelje järgi, kuid samade kaalumisanndmetega saame oluliselt erinevad tulemused kuna Soome normteljel eeldatakse 0,8 MPa rehvirõhku, Eestis 0,6 MPa, millest tulenevalt näivad Soome siirdetegurid väiksemad. Ka on siin ilusti näha, et keskmiste teljekoormuste baasilt teostatud arvutused annavad umbes poole väiksemad tulemused – põhjuseks on neljanda astme reegel, mille järgi ülekaalulise telje mõju otse siirdetegurile on oluliselt suurem kui seda kõigi samatüübiliste sõidukite teljekoormuste keskvaärtustest arvutatu. [9]

Võib tekkida põhjendatud küsimus miks üldse on KAP-is vaja üksik- ja paarisrattategurit kui niikuinii on nende omavaheline vahetult jämedalt arvesse võetud siirdetegurite sees. On mitmeid põhjuseid miks vastavad rattategurid on siiski adekvaatsed kasutamiseks.

Algne VSN 46-83 juhend näeb ette, et vastavat tegurit tuleb kasutada ning vale oleks algsetest seostest mööda vaadata (kuna kogu KAP arvutuse komplekt pärineb algsest juhendist siis ühte tegurit eirata ei ole mõistlik tegevus). [3], [13]

Siirdetegurite keskmine tähendab sisuliselt kogu Eesti keskmise baasilt arvutatut ning konkreetse projekteeritava teelõigu raames võib singli või paarisratta kasutus olulisel määral erineda Eesti keskmisest. [10], [13]

Kõige enam mõjutab üksik- ja paarisrattategur just asfaldi alakihi tõmbepingete väärtust ning seda taset muuta siirdetegurite baasilt oleks väga keeruline. Sisuliselt kui KAPis on valitud üksikrattas siis tekkivad tõmbepinged AC base kihi allosas on suuremad kui nad muidu oleks ning asfalt hakkab sõidujälgedest vajuma ning pragunema. Rootsi insenerid on seetõttu otsustanud kasutada asfaldi alakihi (AC base) vedelamat ehk suurema penetratsiooniga

bituumeniga (160/220) toodetud asfaltbetooni, mille puhul asfaldi läbivajumisel tekkivate tõmbepingete korral ei teki asfaldi alakihti pragu, mis edasi areneks üles, vaid bituumen annab järgi ja vähemalt teatud ulatuses koormuse kadumisel tänu elastsetele omadustele taastab kuju. [16] Eestis kasutatakse seni enamvähem igas kihis bituumenit 70/100, ülakihis ka polümeerbituumenit. Ehk oleks mõistlik see PMB paigutada just asfaldi alakihti, sest asfaldikihtidest peaks see kiht vastu pidama kõige kauem.

1.2 Rehvitüübi mõju siirdetegurile

Täna on siirdetegurite arvutuses kasutusel Taani eriveoste algoritmid 2002. Aastast (Joonis 5). Valemis n on teljegruppide arv, m_j on telgede arv grupis j ning A kuni D on erinevad tegurid, mis kirjeldavad konkreetset rehvitüüpi, telgede vahekaugust grupis ning vedrustuse tüüpi ja rehvirõhku. [2]

$$ESAL_{10} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{A_i B_{ij} C_i D_{ij}}{m_i} \left(\frac{p_{ij}}{5} \right)^4$$

Joonis 5. Taani eriveoste mõju hindamisel kasutatav valem [2]

Enamlevinud kolmeteljelisel poolhaagisel kasutatakse 385 mm laiu super-single rehve, jooniselt interpoleerides saame teguri väärtuseks ca 2,00 (Joonis 6). Tegemist on suhtelise teguriga, kus paarisratta mõju kattele on arvestatud rehvilaiusest sõltumatult 1,00. [2]

Rehvi laius mm	256	315	365	425	445
B _{ij}	3,99	2,91	2,19	1,68	1,25

Joonis 6. rehvi laiuse mõju siirdetegurile [2]

Portugalis Minho ülikoolis tehti uuring „Development of a Model for Equivalent Axle Load Factors“ siirdetegurite seoste kohta, mille tulemusi esitleti 2016. aasta jaanuaris toimunud konverentsil (Joonis 7). Töö käigus arvutati siirdeteguri valemi kordaja „k,“ milleks on tegeliku teljekoormuse ja normteljekoormuse suhte astendaja „a.“ [9] Lähiriikides on astendaja (alfa) väärtuseks üldjuhul 4 – 1983 normides kasutati 4,4 ja kruusateedel võidakse kasutada ka astendajat 3 (põhjusel, et teed on kergem remontida) [3], [17]. Betoonteedel on astendaja väärtus oluliselt suurem just seetõttu, et ülekoormusest tulenevat lagunemist on väga kallid remontida [3].

	Üksiktelg		Tandem		Tridem	
α	single	dual	single	dual	single	dual
3	3,915	1,000	0,833	0,160	0,341	0,062
4	6,339	1,000	0,666	0,074	0,180	0,019
5	10,397	1,000	0,543	0,034	0,098	0,006
6	17,264	1,000	0,450	0,016	0,054	0,002

Joonis 7. Koormuse teisendamine standardteljele [9]. Joonisel on kujutatud siirdeteguri kordaja k , milleks on tegeliku teljekoormuse ja suhte astendaja α . Üksiktelg, tandem ning tridem on vastavalt ühe-, kahe- ning kolme- teljelised telikud.

Antud uuringu tulemusel võime järeldada, et tegelik üksikratta mõju on paarisrattast 6-10 korda suurem. Peamiseks põhjuseks, miks tulemused on nii palju erinevad tulenevad asjaolust, et töö käigus modelleeriti asfaltkatte väsimuse teket ning selle tulemusel jõuti järeldusele, et üksikrattas mõjus kuni 10 korda raskemini eelnevalt arvatust ja selle tagajärjel suurenesid tõmbepinged asfaldi alakihis. Siin kohal tuleb aga arvestada, et läbi viidud uuring on teoreetiline ning antud teadmisi pole veel praktikas piisavalt tõestatud. [32]

2 KAP JA RATTATÜÜP

Praegu kasutuses olev programm põhineb elastsete teekatendite projekteerimise juhendil 2001-52 (ja selle modifikatsioonil 2017-003), mis omakorda põhineb 41 aastat tagasi loodud Nõukogude Liidu juhisel VSN 46-83 [2], [3], [13]. 2001. aastal Venemaal välja antud juhises (ODN, 2001) on mõndagi korrigeeritud, kuid arvutusalgoritmid ja põhirehkendus digitaliseeritud nomogrammidega on tänaseni säilinud [18]. Kaks suurima mõjuga uuendust käsitlesid koormusarvutuse valemit (millega muudeti logaritmseost koormuse ja kandevõime vahel tuginemaks summaarsel normtelje läbikute arvul senise 2015. aasta keskmise ööpäevase läbikute arvu asemel) ning komplitseeritud varutegurite reformi millega lisati varutegurid mitte ainult koormusarvutusele, vaid juba tee klassist tulenevatele piirväärtustele või koormustest arvutatud kandevõimele ehk pingete väärtustele. Eestis on aga otsustatud mitte rakendada hilisemaid uuendusi vaid kasutada võimalikult autentset algversiooni. [5], [6]

1993. aasta maailmapanga Venemaa projekti raames ütles Leo Rothenburg, järgmist [19]:

- "projekteerides tee 10-tonnisele teljele vastavalt SNiP ja VSN reeglitele, on katendi tegelik ressurss (arvutatuna lääneriikide tarkvaraga) alla 30% arvutuslikust;"
- "lubatud deformatsioonide ulatust tuleks muuta, leevendades nõudeid madala koormusega teedel ja tõstes nõudeid suurema koormusega teedel (just see, mida on märgitud ka Soome süsteemiga võrdlustes);"
- "asfaldi alakihis tõmbepingete arvutuse algoritm (nomogramm) on vigane. Asfaldikihtide lubatud tõmbepingete väärtused tuleb üle vaadata ja seostada korduvkoormuse mõjuga;"
- "paljukihilise süsteemi astmeline taandamine kahekihiliseks on ebatäpne ja tuleks asendada kolmekihiliste süsteemide arvutusega (kaasaegsed lahendid on kujunenud väga komplitseerituks ning seetõttu eelistatakse neid kasutada kataloogikatendite arvutusteks, mitte igapäevaseks projekteerimistegevuseks, kuhu sobivad pigem lihtsakoelisemad ja selgemad algoritmid);"
- "sidumata kihtide elastsusmooduli väärtused vajavad korrigeerimist et paremini arvestada kevadise sulamisperioodi ebasoodsaid tingimusi (see tundub Soome süsteemis paremini lahendatud);"
- "asfaldi ja sidumata segu projekteeritud paksused ei ole piisavad, et kaitsta konstruktsiooni alakihite ja aluspinnast koormuste mõju eest kevadisel sulamisperioodil."

2016. aasta kap arenduse lõpparuandes on öeldud järgmist: „Kuna senised rakendused on pigem nomogrammide kesksed ja arvutusvalemid ei kata kõiki arvutusi, lisaks erinevad nomogrammidega saadud tulemused kohati oluliselt esitatud valemite tulemustest, siis on ka KAP jaoks valitud arvutusmeetod digitaliseeritud nomogrammide kasutamisega, interpoleerides iga konkreetse juhtumi korral vajalikud väärtused risttabelitest. Seejuures on nomogrammidel määramis- ja muutumispiirkonnad, kuid et need on täpsemalt piiritlemata (nomogrammi põhiosa pidevjoontega, äärealad katkendjoontega ning teljelähedane piirkond määratlemata) siis ilmselt nii mõnigi anomaalia seondub valitud lähenemisega (käsitsi nomogrammide kasutamisel on inseneri otsustada, millist skeemi kasutada ja kus muuta katendi konstruktsiooni seetõttu, et valitud konstruktsioon ei lange nomogrammide tööpiirkonda). Samas, matemaatiliste algoritmide korrigeerimiseks ei ole piisavaid aluseid.“ [4]

2022. aasta Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamine lähtekohtade III etapi lõpparuandes (Talviste, Kendra) on analüüsitud muuhulgas järgnevat hüpoteesi: „Hüpotees 5 Erinevate analoogseid tulemusi andvate katendiarvutusprogrammide kasutuselevõtt sõltub otseselt välja pakutud ja valitud Eesti teede projekteerimise uutest baasalustest.“ [6]

Uue alusena kaalutakse Soome normidele tuginevat süsteemi. Soome katendi arvutamisel kasutatakse Odemark'i valemipõhist arvutuseeskirja [31]. Eesti KAP põhineb samal Odemark'i lahendil. Käesoleva uurimistöö tulemusena on näidatud, et nii Soome kui ka Eesti programmiga arvutatakse katte kandevõime pinnal sama või väga sarnaselt. Siiski vajab KAP olulist muudatust seoses Evaji leidmisega liikluskoormuse alusel. Kuna Eestis pole selle muudatuse jaoks läbi viidud teaduslikke uurimistöid, soovitame käesoleva uuringu tulemusena üle võtta vastav valem Soomest. Ettepanek Soome normidele üleminekuks võimaldab kasutada nende normidele vastavat tarkvara. KAP-i praegune versioon annab vananenud kandevõime tulemuse ega ole kasutatav. [6]

2.1 Probleem – üksikrattaga telgi on enam kui paarisrattaga

60- tonni töö [9] raames teostatud uuringu algandmete põhjal tehtud analüüsis selgus, et suurem osa raskeveokitelt teele tulenevast koormusest moodustavad mitte paarisrattad, vaid üksikrattad. Üksikrehvi laius jääb tavaliselt vahemikku 365-415 mm. Enamjaolt kasutavad üksikrattaid tänapäeval 3-teljelise telikuga (tridem) poolhaagised, kus ainsaks paarisrattastega teljeks on auto veotelg. Vedaval autorongil võib olla kaks või kolm telge, viimasel juhul võib lisatelg olla ka üksikrattastega. Alternatiivina on rehvitootjad välja töötanud

ka vedavale sillale üksikratta rehvitüübi, mille laius on 445-455 mm ning mille omadused on proovitud teha võimalikult sarnased paarisrattale, kuid neid on liikluses veel vähe. [4]

Üheks kitsaskohaks paarisratta puhul on tema sõltuvus kõrval olevast rehvist. Paarisratas töötab põhimõttel, et hajutada koormust laiema pinna peale, kuid kui ühe rehvi rõhk peaks olema väiksem, kui tema kõrval oleva rehvi oma, siis kaotab ta oma omadused ning koormab teed rohkem kui normaalolekus.

Üksikrattal on mitmeid eeliseid. On tõestatud, et üksikratta puhul on kütusekulu ligikaudu 6% väiksem kui paarisrattaid kasutades. Ka on üksikratastega telik kergem kui paarisratastega ning lisaks on üksikratas ka turvalisem. Paarisratta ühe rehvi rõhukadu võib põhjustada ebastabiilsusi sõiduki juhtimisel, mille tagajärjel võivad tekkida liiklusohtlikud olukorrad. Sama probleemi tõttu kuluvad ka rehvid ebaühtlaselt, mistõttu suurenevad hoolduskulud. Veel on välja toodud, et topelt rehvi vahel olev tühimik vajab pidevat kontrolli ning puhastust, samuti on raskem kontrollida rehvi rõhku ning sisemise rehvi vahetamisel tuleb ära võtta ka välimine. Paljud raskeveokid käivad töö käigus erinevates karjäärides, kus rehvide vahele satub nii kive, kui ka muda, mille mitte puhastamise tõttu võib puruneda auto rehvi või sõidu ajal kivi välja paiskumise korral ka mõni teine liiklev auto. [4], [21]

2.2 Tegelikud koormused kaalupunktides

Teed ja sillad on konstrueeritud kandma kindlaks määratud massi ja teljekoormusega sõidukeid. Projekteeritust suuremate koormuste puhul väheeb rajatise eluiga ning sellest tulenevalt on oluline, et liikluses olevad masinad mahuksid neile määratud massipiirangutesse. Üheks võimalikuks sõidukite kaalumise lahenduseks on weigh-in-motion (WIM) kaal, ehk tegu on teekattesse paigaldatud statsionaarse kaalupunktiga. Kaalumise saadud andmete põhjal on võimalik ennustada hetkel projekteeritavate teede eluea vähenemist ning seeläbi parandada potentsiaalseid kitsaskohti. [20]

Selliseid uuringuid on korduvalt tehtud Adavere ja Luige kaalupunktides. 60t uuringust saadud 2020. aasta poolaasta andmete põhjal tuleb välja, et üksikrattaga telgi esineb 2,6 korda rohkem, kui paarisrattaga telgi (Joonis 8). Lisaks selgub, et pooleaastase perioodi jooksul kaaluti 838 000 raskesõidukit, millest 11,2% olid trahviväärsete rikkumiste piirides. Hetkel kasutatavas katendiarvutuse programmis projekteerides võetakse arvesse paarisratast, kuid nende andmete põhjal võib järeldada, et enamuse koormusest tekib üksikratastelt. Samuti on märkimisväärne ka sõidukite seas esinev ülekaal. [9]

		Teljel olev rehvikombinatsioon				
		S- Üksikratas				
		D- Paarisratas				
		rattaskeem	autod tk	S kogus	D kogus	suhe
		S-D	215605	215605	215605	2,63
		S-D-D	41879	41879	83758	
		S-S-D-D	6042	12084	12084	
		S-D-D-S	997	1994	1994	
		S-D-S-S	13072	39216	13072	
		S-D-S-S-S	128515	514060	128515	
		S-D-S-S-S	28926	115704	28926	
		S-D-S-S-S	211929	847716	211929	
		S-D-S-S-S	18264	73056	18264	
		S-D-S-S-S	21220	106100	21220	
		S-D-S-S-S	14880	74400	14880	
		S-D-D-S-S	4887	19548	9774	
		S-D-D-S-D-D-D	2172	4344	10860	
		S-D-D-D-D-D-D	2011	2011	12066	
		S-D-D-S-D-D-D-D	435	870	2610	
		Kokku	710834	2068587	785557	

Joonis 8. Veoautode eeldatud rehvikombinatsioonid vastavalt Adavere ja Luige kaalupunktides saadud andmetele [9]

3 GAPMAN JA MUUGA SADAMA TEE

Gapman on Eestis toodetav (Englo OÜ) profilomeeter - seade, mis on loodud erinevate pindade profiili mõõtmiseks. Peamiselt leiab see kasutust olemasolevate teede profiili parameetreid hinnates. Gapmani abil on võimalik arvutada keskmist kaldenurka ning teele tekkinud roopa sügavust, kui ka rahvusvahelist tee tasasuse indeksit (IRI). [22]



Joonis 9. Profilomeeter „Gapman“ [22]

Seade koosneb kahest peamisest elemendist. Esimene neist on juhtpult, mille abil juhitakse mõõteprotsessi ja kuhu kuvatakse saadud tulemused. Teine oluline element on andurmoodul, mis toetub kolmele rattale ning millega määratakse mõõdetava profiili pikkus, seal paikneva roopa sügavus ja laius. Lisaks on Gapmani sisse ehitatud GPS-moodul, mis määrab kindlaks katsepunkti koordinaadid. [22]

Katse läbiviimiseks piisab ühest inimesest. Kõigepealt tuleb Gapman kalibreerida ning seejärel võib sooritada katse. Selleks tuleb valida mõõtmise algpunkt ning liikuda seadet enda ees rahulikult lükates kuniks jõutakse sihtpunkti, kus katse lõpetatakse. Tavaliselt sooritatakse katse ühest teekatte servast teise, et saada tulemuseks tee laius ning roopa asukohad, koos sügavusega. [22] Kui soovime hinnata sõiduradade tasasust eraldi ja neid võrrelda, on lihtsaim viis teha sõiduradade vahel kattermarkeeringu kohal hetkeline vahepeatus. Erinevalt enamlevinud lati ja kiilu kasutamisest on selle seadmega mõõtmine kiirem ja oluliselt ohutum. Ka on tulemused otse digitaalsed edasiseks analüüsiks, kahaneb vigade võimalus.

3.1 Mõõtmised

Lõputöö raames tehtud mõõtmised viidi läbi tugimaanteel nr 94 (Muuga sadama tee) 2.-3. kilomeetril (Joonis 10).



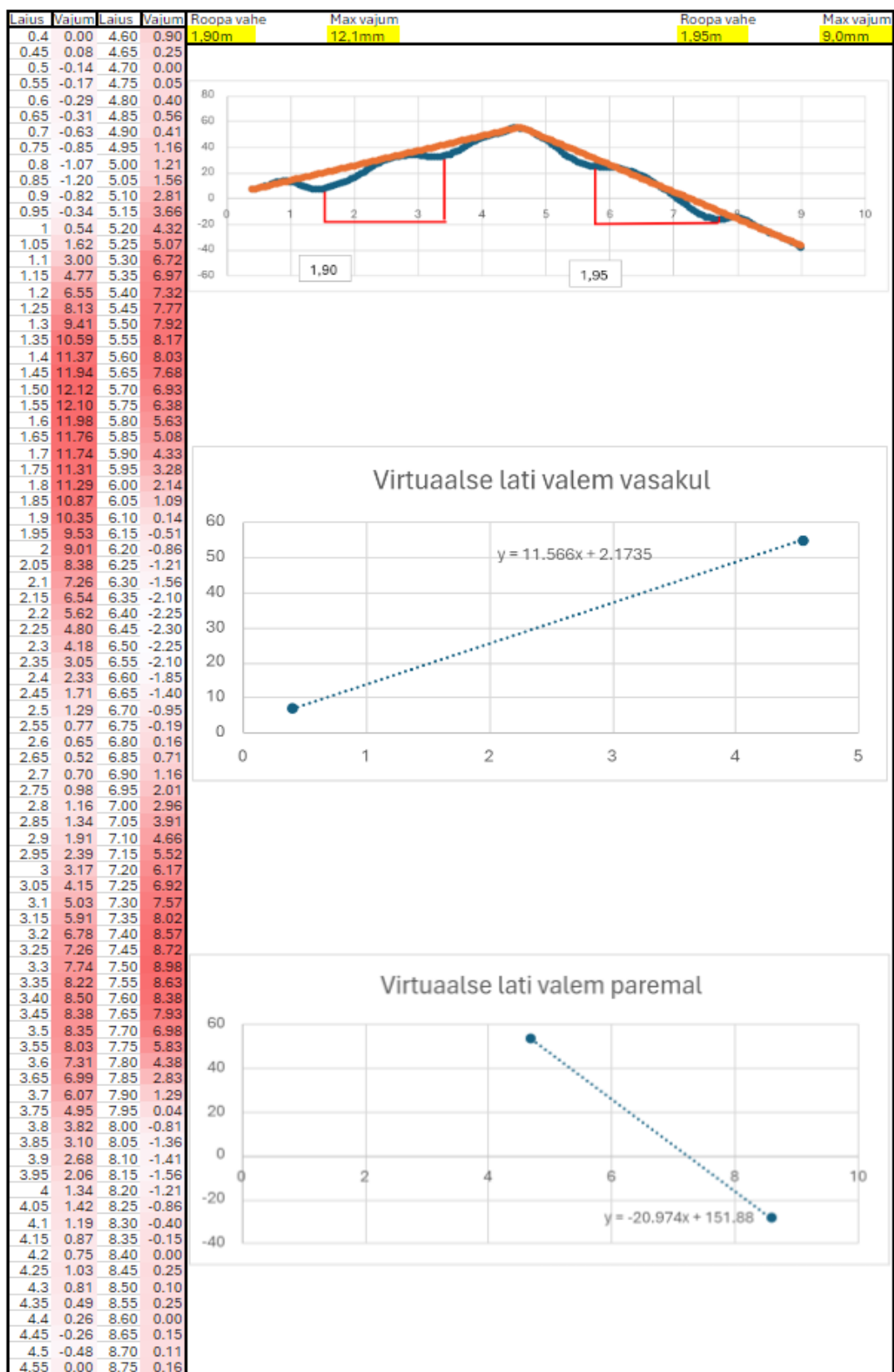
Joonis 10. Katsetuste läbiviimise asukoht kaardil [25]

Asukoha valikul lähtuti asjaolust, et antud teelõigu liiklussagedusest moodustavad autorongid vähemalt 15% (Joonis 11). [23] Kõik katsed sooritati ühel kuupäeval, öisel ajal vältimaks liiklusohtlike olukordade tekkimist. Koondtulemus on välja toodud (Joonis 12).



Joonis 11. Gapmaniga mõõdetud kohad Muuga sadama teel [24]

Saadud tulemus koosneb teepikkusest ja teepikkusühikul olevast suhtelisest kõrgusest (Joonis 12, Lisa 1-16). Teisisõnu näitab seade mingis kauguspunktis maapinna kõrgust (joonisel märgitud „vajum“) valitud alguspunkti (joonisel märgitud „Laius“) suhtes. Roopa sügavuse saamiseks on kasutatud virtuaalset latti (joonisel oranž joon) tee profiilil. Leitud on katse-eksitusmeetodil lineaarfunktsioon (joonisel „virtuaalse lati valem“) mis kujutab endast latti. Võrreldes omavahel leitud lati koordinaate ja Gapmani poolt mõõdetud koordinaate. Saab arvutada nende vahe ning antud juhul see kujutabki endast roopa sügavust (joonisel „vajum“ lahter). Mida punasem on lahter, seda sügavam on vajum. Roopa sügavus on arvutatud kasutades Exceli Max() ja Vlookup() funktsioone. Leitakse mingis kaugusvahemikus maksimaalsed roopa sügavused (joonisel „max vajum“).



Joonis 12. Muuga sadama tee vajumi diagramm

3.2 Muuga sadama tee vajumite analüüs

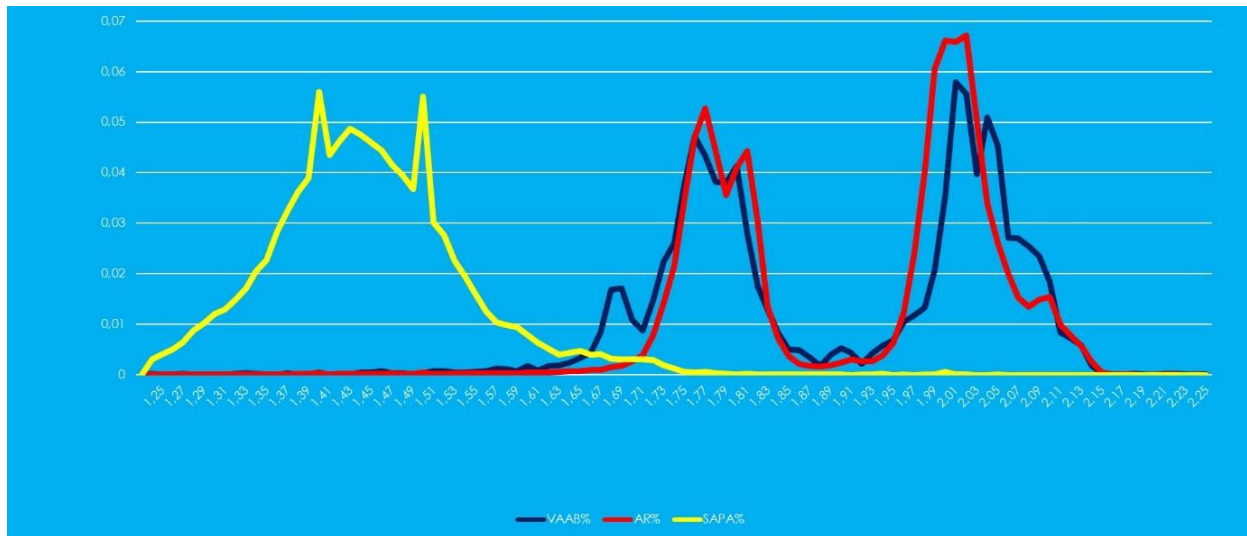
Muuga sadama teel saadud tulemused on koondatud tabelisse, kus on näha suurimad vajumid, ehk roopa kõige sügavam punkt ning seda mõlemal sõidusuunal (Joonis 13). Samuti on välja toodud kahe roopa vahelised laiused ning sarnaselt eelnevale on ka need liigitatud kahte sõidusuunda.

Tugimaantee nr 94 (Muuga sadama tee)				
Katse	Suurim vajum (mm)		Kahe roopa vahe (m)	
	Vasak sõidusuund	Parem sõidusuund	Vasak sõidusuund	Parem sõidusuund
1	12.1225	8.975	1.9	1.95
2	10.3719	9.9483	1.9	2
3	13.8165	16.8688	1.9	1.95
4	9.9969	8.0492	1.7	2

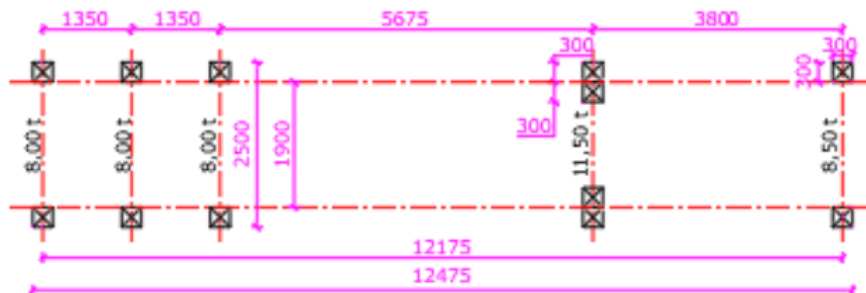
Joonis 13. Tugimaantee nr 94 vajumid

Vajumi sügavus tugimaanteel nr 94 (Muuga sadama tee) on keskmiselt 11,26 mm, mis on normidele vastav ehk alla 20 mm [26]. Kuigi tegu pole pole millegiga mis oleks üle lubatud piiride on antud roopaid juba autoga sõites tunda ning vihmaga ka väga lihtne näha. Kuigi tulemus on hea, siis on igasuguse olemasoleva roopa puhul suur tõenäosus, et vajumi arengu kiirus suureneb. Seda põhjusel, et üldjuhul roobast vältides ollakse kas liiga ühes või teises teeservas ning roopa ääre peal sõites on sõidukeid ebameeldiv juhtida. Teiseks, ei voola vesi roopast ära ja märg kate kulub kiiremini. Lisaks suurendab veekiht kattel vesiliu riski, mida sügavam roobas, seda madalamal kiirusel saab vesiliug tekkida.

Mõõtmistest selgub, et kahe roopa vahe keskmiseks tulemuseks 1.91 m, millest saab järeldada, et antud roopad on tekkinud veoauto koormusest tingituna. Lisaks võime ka eeldada, et tegu on olnud üksikrehviga, võttes arvesse antud roopa laiuseid oleks topeltrehvi puhul olnud tõenäoliselt roopa laius suurem(Joonis 15). Ka selgus A.Pozarski MSc (TTU 2017) tööst, kus analüüsiti muuhulgas samal Muuga sadama tee lõigul ühel suunal paiknenud kaalupunkti andmeid 2010 aastast, et paarisratta korral peaks jäljevahe olema ca 170-180 cm, kui üksikrattal on see 200 cm lähialas (Joonis 14). [27]



Joonis 14. Rattavahed teljel 2010 Muuga sadama kaalupunktis [27]. Vertikaalteljel on kujutatud vajumi sügavust ning horisontaal teljel sõiduki telje laius. Joonisel on näha ühe sõidukiliigi all erinevaid tulemusi. See tuleneb sellest, et autod erinevad tihti nii parameetritelt, kui ka rattavalemilt.

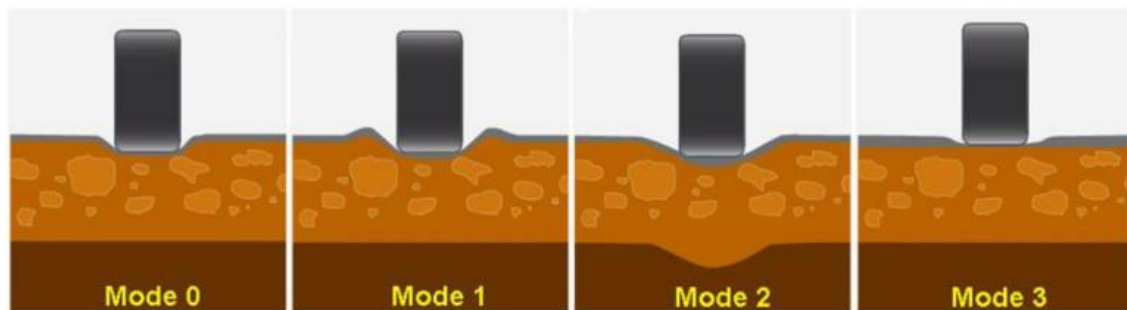


Joonis 15. Viie teljelise autorongi rattaskeem [28]

3.3 Roopa tekke põhjused

Roobaste sõiduteele tekkimise põhjuseid on peamiselt neli (Joonis 16). Esimene põhjus on tuleneb katte järeltihenemisest ehk tihenemisest, mis toimub peale ehitustegevuse lõppu, kui konstruktsioon tiheneb liiklusest tuleneva koormuse tõttu edasi. Kõige tõenäolisem on sellist versiooni kohata teedel, kus on mõlemal küljel näiteks pörkebarjäär, mistõttu sõidetakse väga kindlalt sõidutee keskel, mis omakorda koormab ühte kindlat korduvalt rohkem kui tavaolukorras. Teine variant on autojuhtidele kõige ebameeldivam ning see tekib peamiselt, kas liigniiskusest katte ülakehtides või sealsest ebapiisavast nihkekindlusest (asfaldi ebapiisav nihkekindlus võib tuleneda tellija soovist hoida väga kõrget bituumeniprotsenti asfaldis või ka

suhteliselt peeneteralisemast asfaldisegust mida eelistaks ehitaja kuna peeneteralisem segu on paremini töödeldav ja risk trahvi saamiseks liigse poorsuse eest väiksem). Tihti tuleb kulumiskiht paigaldada killustiku peale ning kui sealsed nihkepinged on ületatud hakkab killustik vaaludesse liikuma ning selle tõttu vajub ka asfalt, mille tagajärjel tekibki roobas. Kolmandaks põhjuseks on kogu konstruktsiooni vajumine sõidujäljes (aladimensioneeritud alus) ning selle peatamiseks tuleb üldjuhul välja vahetada kogu konstruktsioon. Viimaseks on kulumine autode naastrehvide tõttu. Sellele on omane roobaste väiksem vahekaugus (ca 140-150 cm), sest naastrehvid on kasutusel sõiduautodel. [2], [29]



Joonis 16. Erinevad roopa tekke põhjused [29]

Muuga sadama tee puhul on tõenäoliselt tegemist kas esimese (järeltihenemine) või kolmanda (aladimensioneerimine) versiooniga. Kuna tulemustest oli näha, et keskmine roopa vahe oli 1.91 m, siis saame välistada versiooni neli, sest naastrehve veoautodel ei esine. Samuti on roopa profiilist näha, et roopa servad pole surutud ülespoole vaalu ning vajum on ühtlane alla poole, mis tähendab, et ka variant kaks (asfaldi nihkepinged) on antud olukorras välistatud. Selleks, et saada teada tegelik tekkepõhjus oleks vaja sooritada lisauuringuid. Siiski on tõenäoline, et järeltihenemise risk on väiksem kuna asfaldi poorsust kontrollitakse riigiteede vastuvõtuprotseduuris ja liigselt poorse segu korral on ette nähtud trahvid. Poorsus ülakihis aga põhjustab katte kiire lagunemise, mida ei ole täheldatud. Seega on üks tõenäoline põhjus aladimensioneerimine

4 RIIGITEE NR 4 TALLINN-PÄRNU-IKLA

KATENDIARVUTUSE ANALÜÜS

Riigitee nr 4 näol on tegemist viimaste aastate ühe suurima teelõigu ehitusega. Sellest tulenevalt on päevakajaline analüüsida projekteeritud katendiarvutust. Praegune katend on arvutatud paarisratta koormusele, kuid eelnevast uuringust selgus, et suurem koormus teele tekib üksikrattast. Töö algandmeteks võeti riigiteel nr 4 projekteeritud kõigi kuue katendi tüübi katendiarvutus ning võrreldi AC base kihis tekkinud tõmbepingete varu erinevusi (Joonis 17). Võrreldavate katendi tüüpide konstruktsioonide peamine erinevus tuleneb projekteerimisel arvutatud koormussagedusest. [30]

Pärnu-Uulu km 133,5-141,2		
Paaris- ja üksikratta koormusest tingitud tõmbepingete erinevus AC base kihis		
	Paarisrattas	Üksikrattas
Katendi tüüp	Varu %	Varu%
I	7.5	-8.9
II	4	-13
III	23.1	9.5
IV	36.6	25.4
V	40.1	29.5
VI	42.8	32.7

Joonis 17. Paaris- ja üksikratta koormusest tingitud tõmbepingete erinevus AC base kihis
(Lisa 17- Lisa 28)

Lõputöö käigus koostatud võrdlevas tabelis on näha, et üksikratta puhul on saadud tõmbepingete varu väiksem kui paarisrattaga arvutatul. Kuuest konstruktsioonist kaks on üksikratta arvutuse puhul miinuses, mis tähendab, et need pole sobivad antud koormusele (Joonis 17). Lisaks on esimese kahe tüübi rattavalemi vahest tulenev erinevus tunduvalt suurem kui ülejäänud nelljal. Sellest võib järeldada, et suurema maantee klassi teedele mõjub üksikratta koormus tugevamini, kui madalamatele, sest esimesed kaks konstruktsiooni on maante klass 1 ning üle jäänud on kolm või suuremad.

Teeregistri 2023. aasta liiklusloenduse põhjal moodustasid Pärnu-Uulu maantee lõigul aasta keskmisest ööpäevasest liiklussagedusest 18% autorongid, 87% raskeliiklusest on autorongid (Joonis 20). Eesti riigiteede keskmine raskeliikluse osakaal on 10%, autorongide osakaal kokku 7,1% ja autorongide osakaal raskeliiklusest on 71% (Joonis 18). [10]

	meetrid	SAPA	VAAB	AR	AKÖL	SAPA%	Raske%	AR%	AR/raskeliiklusest
Põhi	1603555	5007	195	559	5761	126,9%	-26,9%	9,7%	74,1%
Tugi	2404667	1564	43	95	1702	91,9%	8,1%	5,6%	69,0%
Kõrval	12531402	332	8	11	351	94,6%	5,4%	3,0%	56,7%
Kokku	16539624	964	31	76	1072	90,0%	10,0%		70,9%
Kokku %		90,0%	2,9%	7,1%					70,9%

Joonis 18. Eesti riigiteede keskmine liikluse osakaal sõidukitüübi kohta [10]

Algus	Lõpp	SAPA	VAAB	AR	AKÖL	SAPA %	Raske%	AR%	AR/raskeliiklusest
133337	141540	9193	324	2146	11663	80%	20,0%	18%	87%

Joonis 19. Pärnu-Uulu põhimaante keskmine liikluse osakaal sõiduki tüübi kohta [10]

Samuti on oluline arvestada, et ka liiklussagedust ei saa vastavalt maanteeklassile alati üldistada. Näiteks on Eesti põhimaanteedel vastavalt liiklussagedusele autorongide osakaal raskeliiklusest 63-77% (Joonis 20). Kuigi raskeliiklus moodustab ainult 11-14%, siis on oluline arvestada asjaoluga, et nendest enamus on autorongid, millel on valdavalt esindatud üksikrattad (Joonis 20).

Põhi	meetrid	SAPA	VAAB	AR	AKÖL	SAPA %	Raske%	AR%	AR/raskeliiklusest
14500	83283	18018	844	1455	20317	88,7%	11,3%	7,2%	63,3%
6000	488309	7754	295	941	8991	86,2%	13,8%	10,5%	76,1%
3000	492118	3615	139	437	4191	86,3%	13,7%	10,4%	75,9%
500	539845	1783	56	186	2025	88,1%	11,9%	9,2%	77,0%

Joonis 20. Eesti põhimaanteede keskmine liikluse osakaal sõiduki tüübi kohta [10]

Eeldades Adavere ja Luige kaalupunktides kogutud andmete põhjal, et üksikratta osakaal on 2,6 korda suurem kui paarisrattal, siis on tõenäoline, et andmete puudumise tõttu on Riigitee nr 4 lõigul projekteeritud rattatüüp valesti. Elastsete teekatendite projekteerimisjuhises on välja toodud, et rattateguri valimisel tuleb valida üksikrattad, kui liiklusvoos on autorongide osakaal kõrge ning kasutusel valdavalt super-single rehvitüüp Paraku on jäänud määratlemata „kõrge“ piir. Lähtudes sellest, et veoautode üksikratta osakaal ongi kordades suurem, kui

paarisrataste, siis arvestades Pärnu-Uulu teelõigu katendiarvutusel saadud üksikratta tulemusi on võimalik, et ka eeldatav eluiga on seetõttu langenud. [9], [10], [13]

5 MAKSUMUSE VÕRDLUS KUI KASUTADA PAARIS- VÕI ÜKSIKRATTATEGURIT

Tabelis on arvutatud maksumus võttes eelduseks, et ehitame kogu eesti teedevõrgu ühe hetkega üles ning mis see maksaks. Igal teeklassil on oma kindel konstruktsioonitüüp (Joonis 24-27). Eeldatud on ka, et igal materjalil on oma kindel m³ hind (Joonis 23) ja et tee muldel on sõltuvalt teeklassist kindlad omadused (katte laius, mulde laius, nõlvus) (Joonis 22).

Koormussagedus (Q) on leitud Teeregistri andmete baasilt. Esiteks arvestati, et liiklus enam ei kasva ehk võeti konstant, teiseks võeti VAAB arv, mis korrutati siirdeteguriga 2,67 ning AR arv, mis korrutati siirdeteguriga 3,76. Tulemus korrutati rajateguriga ning ning saadi normtelgede arv enamkoormatud rajal. Kolmandaks korrutati see 7300-ga (20 aastat ja 365 päeva) ning jagati constant 5000-ga, mille tulemusel saadi tinglik koormussagedus 2015. aastal. See on oluline, sest KAP töötab 2015. aasta numbritel. [10], [2]

Konstruktsioonides kasutatavad materjalid on välja toodud elastsusmoodulitena (Joonis 21). Iga number (elastsusmoodul) tähistab konstruktsiooni tüübis kindlat materjali (Joonis 24-27).

Katendiarvutus programmi materjalide nimetused	
100	Peenliiv
105	Ühtlaseterine liiv
240	Pae- või kruuskillustik (LA≥35)
280	Tardkivikillustik
1400	Kuum poorne asfaltbetoon (ACbase)
2400	Tihe kuum asfaltbetoon (ACsurf; bin)
3200	Killustikmastiksasfalt (SMA)

Joonis 21. KAP-is dimensioneerimisel kasutatavad materjalid ja nende elastsusmoodulid

[13]

Liiklussagedus	km	katte laius	mulde laius	nõlvsus
14500+	84	21	22,8	1:3
6000-14500	578	13,7	15	1:3
3000-6000	832	9	10	1:2
500-3000	4245	9	10	1:2

Joonis 22. Eeldatud parameetrid igale teeklassile [9]

	Liiv	Liiv	Killustik	Killustik	Asfalt
Ühikhind {€/m ³ ;s/cm/m ² }	18	20	33	70	175
Materjali kirjeldus	Tm_90, f15	Tm_105, f7	E240, LA35	E280, LA<35	Base, Bin, SMA

Joonis 23. Eeldatud ühikhindade tabel. [9]

KAP		aluspinnas A			Double					
klass	Q		E	100	105	240	280	1400	2400	3200
1	5339		319.3		45		35	7	6	5
2	3297		293.9		30		45	8	6	
3	1445		253.2		42	17	20	6	4	
4	316		196.5	20		27			7	

Joonis 24. Konstruktsiooni tüübid kui aluspinnaseks on A-grupi pinnas ja kasutatakse rattategurina paarisrattategurit (0,85) [10]

KAP		aluspinnas D			Double					
klass	Q		E	100	105	240	280	1400	2400	3200
1	5339		319.3		59		45	7	5	5
2	3297		293.9		56		45	8	6	
3	1445		253.2		50	21	20	6	4	
4	316		196.5	31		31			7	

Joonis 25. Konstruktsiooni tüübid kui aluspinnaseks on D-grupi pinnas ja kasutatakse rattategurina paarisrattategurit (0,85) [10]

KAP		aluspinna A		Single						
klass	Q		E	100	105	240	280	1400	2400	3200
1	5339		319.3		45		35	8	6	5
2	3297		293.9		30		45	9	6	
3	1445		253.2		42	17	20	6	4	
4	316		196.5	20		27			7	

Joonis 26. Konstruktsiooni tüübid kui aluspinnaseks on A-grupi pinnas ja kasutatakse rattategurina üksikrattategurit (1,0) [10]

KAP		aluspinna D		Single						
klass	Q		E	100	105	240	280	1400	2400	3200
1	5339		319.3		59		45	8	6	5
2	3297		293.9		56		45	9	6	
3	1445		253.2		50	21	20	6	4	
4	316		196.5	31		31			7	

Joonis 27. Konstruktsiooni tüübid kui aluspinnaseks on D-grupi pinnas ja kasutatakse rattategurina üksikrattategurit (1,0) [10]

Arvutust alustatakse mahu arvutusest. Kõigepealt tüüpse konstruktsiooni ristlõike pindala (arvestades nõlvuseid jms konkreetsele tee klassile omaseid parameetreid) ja seejärel pikkusega korrutades saame kokku mahu. Seejärel eelnevalt kindlaks määratud m³ hinnaga korrutades saame kui palju maksab iga materjal eraldi ja seejärel kõik maksumused kokku liites saame teada kogumaksumuse (Joonis 28-31). Kuna ei ole teada kuidas jagunevad teekonstruktsiooni all aluspinnased siis on eeldatud et 50% kogumahust on A-grupi aluspinnasega (kerge saviliiv) ja teine 50% D-grupi aluspinnasega (raske tolmne liivsavi). Kogumaksumus on arvutatud eeldades, et projekteerimisel on arvestatud üksikratastega ning teine kogumaksumus on arvutatud eeldades, et projekteerimisel on arvestatud paarisratastega (Joonis 31).

Üksikrattale projekteerides on asfaldi maksumus 18 148 000 eurot kallim kui topeltrattale (Joonis 28).

D (topeltrattad)			S (üksikrattad)		
KAP			KAP		
	A	D	pinna	A	D
Ristlõike pindala (m ²)	3,75 1,90 0,89 0,63	3,54 1,90 0,89 0,63	Ristlõike pindala (m ²)	3,95 2,03 0,89 0,63	3,95 2,03 0,89 0,63
maht (m ³)	314896 1096960 740571 2653628	297544 1096960 740571 2653628	maht (m ³)	332230 1174448 740571 2653628	332230 1174448 740571 2653628
hind (€)	55106772 191968011 129599887 464384946	52070282 191968011 129599887 464384946	hind (€)	58140320 205528331 129599887 464384946	58140320 205528331 129599887 464384946
839 541 000 €			857 653 000 €		

Joonis 28. Topelt- ja üksikratta asfaldi maksumus.

Topelt- ja paarisratta arvutustes on liiva maksumuses on maksuvuse erinevuseks 0 eurot (Joonis29).

Liiva maksumus			Liiva maksumus		
	A	D		A	D
Ristlõike pindala (m ²)	11,00 5,13 4,69 2,32	14,18 9,14 5,50 3,53	Ristlõike pindala (m ²)	11,00 5,13 4,69 2,32	14,18 9,14 5,50 3,53
maht (m ³)	462248 1482144 1950114 4924346	595648 2640470 2288281 7487978	maht (m ³)	462248 1482144 1950114 4924346	595648 2640470 2288281 7487978
hind (€)	9244961 29642884 39002285 88638231	11912954 52809405 45765610 134783600	hind (€)	9244961 29642884 39002285 88638231	11912954 52809405 45765610 134783600
411 799 000 €			411 799 000 €		

Joonis 29. Topelt- ja üksikratta liiva maksumus.

Topelt- ja paarisratta arvutustes on paekillustiku maksumuse erinevuseks 0 eurot (Joonis 30).

Paekillustiku maksumus			
	A	D	
Ristlõike pindala (m ²)	1,70	2,01	
	2,88	3,14	
maht (m ³)	705872	837011	
	6109161	6672065	
hind (€)	23293780	27621376	
	201602307	220178130	
	472 659 000 €		

	A	D	
Ristlõike pindala (m ²)	1,70	2,01	
	2,88	3,14	
maht (m ³)	705872	837011	
	6109161	6672065	
hind (€)	23293780	27621376	
	201602307	220178130	
	472 695 000 €		

Joonis 30. Topelt- ja üksikratta paekillustiku maksumus

Topelt- ja paarisratta arvutustes on tardkivikillustiku maksumuse erinevuseks 0 eurot (Joonis 31).

Tardkivikillustiku maksumus			
	A	D	
Ristlõike pindala (m ²)	7,72	9,41	
	6,68	5,98	
	1,85	1,75	
maht (m ³)	324235	395321	
	1930688	1727868	
	768862	728921	
hind (€)	22696473	27672493	
	135148150	120950768	
	53820357	51024495	
	411 312 000 €		

	A	D	
Ristlõike pindala (m ²)	7,72	9,41	
	6,68	5,98	
	1,85	1,75	
maht (m ³)	324235	395321	
	1930688	1727868	
	768862	728921	
hind (€)	22696473	27672493	
	135148150	120950768	
	53820357	51024495	
	411 312 000 €		

D (paarisrattad) kokku	
2 135 311 000 €	

S (üksikrattad) kokku	
2 153 459 000 €	

Paaris- ja üksikrattaste erinevus maksumuses
18 148 000 €

Joonis 31. Topelt ja üksikratta tardkivikillustiku maksumus ning kogu teedevõrgu maksumus

Arvutuse tulemusena selgus, et üksikrattaga projekteerimise korral oleks maksumus 18 148 000 eurot kallim, kui paarisrattaga projekteerides (Joonis 31). Kuigi summa on märkimisväärselt suur, siis moodustab see tegelikkuses vaid 1% kogumaksumusest. Täpsemalt pärineb see 1% muutustest AC base kihist, mis on tingitud üksikrattast tekkinud tõmbepingete suurenemisest (Joonis 28). Märkimisväärne on ka see, et kallinemine tekib ainult 1 ja 2 klassi teedel (Joonis 28).

5.1 Konstruktsiooni kasutusea arvutuskäik

Konstruktsioonid on KAP-is dimensioneeritud A ja D aluspinnase puhul 1. ja 2. klassi maanteedele võttes aluseks mõlema teeklassi puhul neile vastavad teeregistri keskmised koormussagedused [10]. Järgnevalt on muudetud rattategur D rattateguriks S ja seejärel on muudetud koormussagedust, kuniks on saadud positiivne tulemus. Seejärel teades tegelikku koormussagedust ja alandatud koormussagedust S, kus tulemused on saadud positiivsed leitakse mõlemale koormussagedusele vastavad elastsusmoodulid, millest leiame normtelgede arvud kasutades teisendatud valemit, mis pärineb KAP-ist [2].

Edasi arvutatakse tõenäoline eluiga, kasutades selleks ristkorrutist ning eeldades, et tegeliku koormussageduse ehk D juures on konstruktsiooni eluiga 20a ja alandatud koormussageduse juures tundmatu ehk Z [13]. Selleks, et KAP-i valemit ($E_{\text{vajalik}} = 70 \times \log Q + 56$) kasutada on valem teisendatud nii, et koormussageduse asemel on kasutatud normtelgi ($E_{\text{vajalik}} = 30,401 \times \ln(x) + 217,07$) [2]. Tulemused on välja toodud (Joonis 33).

Arvutus põhineb KAP dimensioneerimis log valemil $y=30,401\ln(x)+217,07$.				
y= kandevoime (MPa) x=normtelgede arv				
Arvutusnäide 1.kl D-grupi aluspinnase puhul				
normteljed mis vastavad vajalikule	28 870 000	tk		
E vajalik arvutatud	319,3	MPa		D
E alandatud	312,75	MPa		S
E alandatud vastav normtelgede arv	23,27	mlj		($\text{EXP}((P120-217,07)/30,401)$)
E vajalikule vastav normtelgede arv	28,87	mlj		
teostame ristkorrutise	$\frac{28,87}{20}$	=	$\frac{23,27}{Z}$	
reaalne vastupidavus aastates ehk Z	16,12	a		
puudujääk aastates	3,88	a		

Joonis 32. Konstruktsiooni eluea arvutamine (Arvutusnäide 1 klassi D-grupi pinnase puhul)

5.2 Tulemuste analüüs

Lõputöö uurimuse tulemusena selgus, et topeltratta arvutust kasutades oleks rahaline sääst ca 1%, kuid arvestades, et tegelikkuses on tõenäoliselt üksikratta osakaal mitu korda suurem kaotatakse 1. ja 2. klassi maanteedel 20-30% elueast (Joonis 33). Samas moodustab arvestuslik võit kokku vaid x% riigiteede eeldatavast ressursist (kasutuseast), Sest 1. ja 2. klassi liiklusega teid on täna vaid 570 km kokku 16 500 kilomeetrist.

aluspinna	ok Q	mlj	E	a	a puudu	%
A	1kl D	5774	28 870 000	319.3	20	3.88
	1kl S	4655	23 275 000	312.8	16.12	
D	1kl D	5774	28 870 000	319.3	20	7.22
	1kl S	3690	18 450 000	305.7	12.78	
A	2kl D	2504	12 520 000	293.9	20	1.47
	2kl S	2320	11 600 000	291.6	18.53	
D	2kl D	2504	12 520 000	293.9	20	1.71
	2kl S	2290	11 450 000	291.2	18.29	

Joonis 33. KAP-is arvatud 1. ja 2. klassi teedel topeltratta ja üksikratta tulemuse võrdlemine konstruktsiooni elueas.

6 TULEMUSE VÖRDLEMINE KRP-GA

KRP puhul on tegemist tabelarvutustarkvaraga, mis on loodud MS Exceli põhjal ning, mille eesmärgiks on saavutada võimalikult sarnane kasutajaliides hetkel kasutusel oleva KAP-iga. Kuna Excel on ka kasutatav võrgupõhiselt nutiseadmetes võimaldab see programmi kasutada isegi objektil olles. [7]

Rakenduse alus ja funktsionaalsus põhinevad Soome projekteerimisnormil 38/2018 [8]. Peamisteks muutusteks on asfaltkihtide diferentseerimine, ehk asfaltkihid arvestatakse kõik 2500 MPa, mis on veidi erinev Soome normist. Kohandatud on ka dimensioneerimisloogikat. Algne astmeline dimensioneerimine on teisendatud naturaallogaritmiks, mis võimaldab täpsemat dimensioneerimist ning tänu millele hoidutakse kulukast üledimensioneerimisest kui koormus peaks sattuma koormusklassi madalamasse ossa. Programmi on lisatud ka eelnevalt töös kasutatud konstruktsiooni eluea kestuvse prognoos, mis aitab projekteerides näha ka suuremat pilti. KRP on saanud täienduse ka CO₂ emissioonide arvutamiseks. Kuigi hetkel veel on võimalik arvutada ainult tootmise, transpordi ja paigalduse emissioone, siis on tulevikus võimalik ka lisada hilisemaid faase, mis kataksid kogu ehitise elukaare tsükli. Viimaseks märkimisväärseks täienduseks on loodud lõimimisteguri arvutamiseks kalkulaator. Olukordades, kus on vaja saavutada etteantud Cu tasemega segu saab mitme segu kasutamise puhul kindlaks määrata õige segufaktori ja vastavad osakaalud. [7]

KRP programmis käsitletakse liivasid elastsusmooduli järgi (Joonis 37), mis tuleneb Soome juhiseist ning mõnevõrra erinev KAP-ist kus on lisaks antud veel täpsemad nimetused. Samuti ei ole tavapärases Soome Odemarki valemil põhinevas programmis käsitletud killustiku elastsusmooduliga 240 MPa. Kuna Eestis kasutatakse suurel määral ka paekivikillustiku, siis on oluline sellega arvestada, et oleks võimalik kohandata programmi eesti tingimustele (Joonis 34). Elastusmoodul 2500 MPa käsitleb kõiki asfaldikihte üldistavalt (Joonis 34). [8]

KRP programmi materjalide nimetused	
50	Liiv
70	Liiv
240	Paekillustik
280	Tardkivikillustik
2500	Asfalt

Joonis 34. KRP-s dimensioneerimisel kasutatavad materjalid ja nende elastsusmoodulid [8]

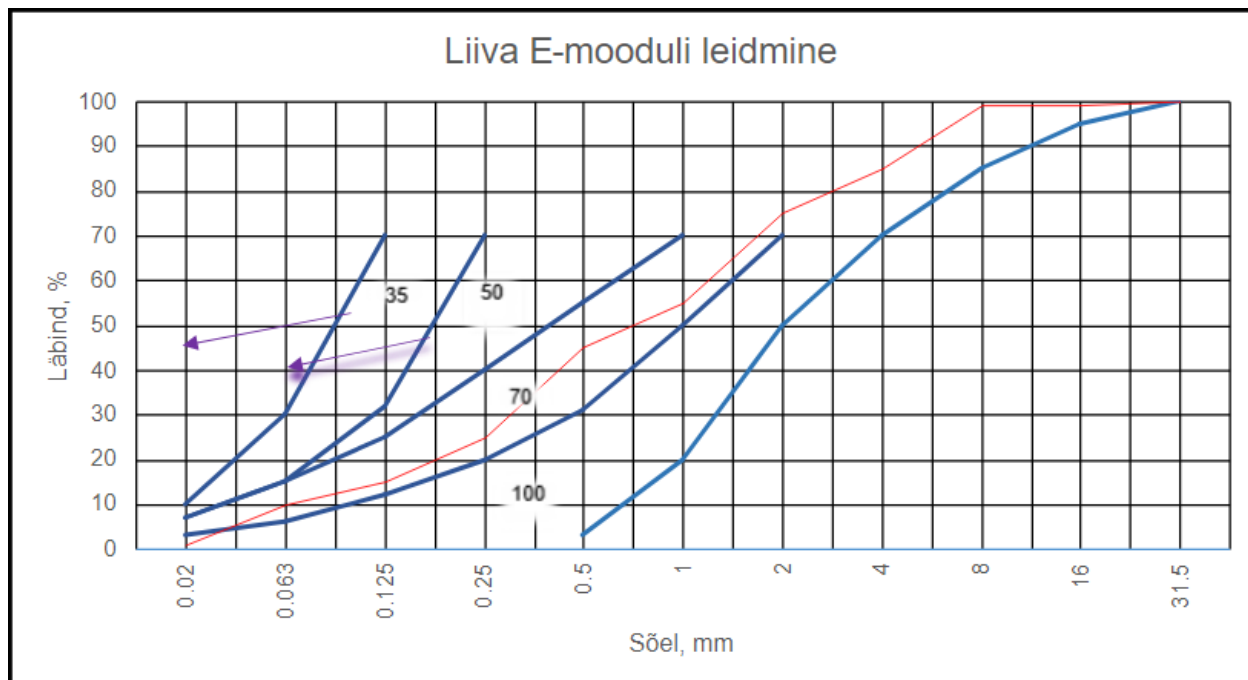
KRP üheks erinevuseks Eestis kasutatava KAP-iga on see, et siin ei käsitleta eraldi rattategureid, mis tõttu on on valitud konstruktsioone vaid kaks (Joonis 35-36). Arvutustes kasutatavad ühikhinnad on samad, mis KAP-i arvutuses (Joonis 23).

KRP aluspinnas 35 MPa							
klass		E	50	70	240	280	2500
1		437,3				50	18
2		399,9				50	16
3		336,3			35	20	13
4		229,7			57		7

Joonis 35. Konstruktsiooni tüübid kui aluspinnaseks on 35 MPa, mis on eelduslikult võrdväärne KAP-i A-grupi aluspinnasega. [10]

KRP aluspinnas 20 MPa							
klass		E	50	70	240	280	2500
1		437,3		23		50	18
2		399,9		23		50	16
3		336,3		23	35	20	13
4		229,7	33		57		7

Joonis 36. Konstruktsiooni tüübid kui aluspinnaseks on 20 MPa, mis on eelduslikult võrdväärne KAP-i D-grupi aluspinnasega. [10]



Joonis 37. Liiva E-mooduli leidmine Soome juhendi järgi [8]

	KRP vs KAP (single)
KRP	2 442 229 000 €
KAP	2 153 459 000 €
erinevus %	11,8

Joonis 38. KRP ja KAP (üksikratta tulemus) programmides saadud tulemuste võrdlus

Arvutuste tulemusena näeme, et KAP-is arvutatud üksikratta tulemus on 11,8% odavam, kui KRP programmiga saadud arvutus (Joonis 38). See tähendab, et täna kasutusel olev topeltratta arvutusvalemiga oleks vahe 1% suurem ehk 12,8%.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärk oli analüüsida teekonstruktsioonide projekteerimise käigus tehtavate rattatüübi valikute mõju lõpptulemusele, konstruktsiooni maksumusele ning võrrelda tulemusi Soome metoodikaga. Töös kasutatud algandmed pärinevad Transpordiameti tellitud ning T-Konsulti koostatud tööst (Raskemate ja pikemate veoste mõju arvutamine riigideete taristule). [9]

Töös kirjeldatakse Katendiarvutuse metoodikale omaseid uuringuid ning võtmetähtsusega valemuid, mille alusel programmid arvutusi sooritavad.

Lõputöös uuriti paaris- ja üksikratta mõju erinevate liiklus- ja koormussageduste puhul katekdikonstruktsioonile ning maksumusele. Võrreldi KAP paaris- ja üksikratta arvutuste tulemusi KRP-ga. Viidi läbi uuringuid riigiteedel ning võrreldi varasemalt projekteeritud teekonstruktsioone KAP-is arvutusega, kus eeldati üksikratta kasutust. Lisaks uuriti kuidas on arvutatud hetkel kasutuses olevad siirdetegurid. Võrreldi liikluse struktuuri erinevates riigiteede kategooriates ja ka üksikrataste osakaalu Eesti liikluses.

Arvutused paaris- ja üksikratta konstruktsioonidele viidi läbi teeklassides 1-4. Tulemusena selgus, et üksikratta kasutusest tulenev kallinemine tekkis ainult 1. ja 2. teeklassides. Sellest saab järeldada, et väiksematel teeklassidel on topeltratta arvutuses piisav varu, et tagada ka kindlus üksikratastele, kuna autorongide osakaal madalamaliigilistel ja väiksema koormusega teedel on väiksem. Lisaks selgus, et KAP-i tulemused ei sõltu ainult teeklassist, vaid ka koormussagedusest. Mida kõrgem on teeklass, seda väiksemad on lubatud tõmbepinged ning seda suurem on ka rattateguri mõju.

Lõputööle seatud hüpotees pidas paika ainult osaliselt. Töö käigus selgus, et kogu Eesti teedevõrgu korraga üles ehitamise puhul on üksikrattale projekteerides tulemus tõesti kallim, kui paarisrattale, kuid seda ainult 1%. Kahe rattatüübi hinna erinevus tulenes AC base kihi paksusest. AC base kihi eesmärk on tagada eelkõige kandevõimet ning üksikrattast tuleneva suurema koormuse tõttu tõusis ka selle asfaldikihi paksus. Teekonstruktsiooni kallinemine üksikratta arvestamisest on marginaalne, võrreldes arvestuslike kuludega üleminekust teisele programmile, sest Soome metoodikat KAP-i üksikratta arvutusega võrreldes on hinnavahe 11,8%.

Siiski ei saa KAP kasutuse jätkamist pidada perspektiivseks tuginedes 2016 ja 2022 uuringute järeldustele nii otseste kui kaudsete vigade tõttu KAP algoritmides ja loogikas.

Uurimise käigus viidi läbi ka katendi eluea analüüs mille tulemusel selgus, et paarisratta arvutuse tulemusena säästetakse 1% rahas, kuid kaotatakse tõenäoliselt 20-30% konstruktsiooni elueas – seda siiski vaid väga väikesel osal riigiteedest (3,5%).

Praegune katendiarvutuse metoodika on välja töötatud ajal, kui teedel liikuvad sõidukid ning nende rehvid olid tänapäeval kasutatavast paljuski erinevad. Selleks, et saada teada, kas KAP-i üksikrattale projekteeritud teed oleks ka praktikas piisavalt tugevad, et tagada teede pikem eluiga, tuleks teha veel põhjalikumaid uuringuid ja analüüsida tegelike tuvastatud defektide põhjuseid.

SUMMARY

The aim of this thesis "*Analysis of Pavement Design*" was to analyze the impact of the wheel type choices made during the design of road structures on the final result, the cost of the construction, and to compare the results with the Finnish methodology. The original data used in the work comes from the work commissioned by the Estonian Transport Administration (Transpordiamet) and prepared by T-Konsult (Calculation of the impact of heavier and longer loads on the infrastructure of state roads). [9]

The thesis describes the studies specific to the pavement calculation methodology KAP and the key formulas on the basis of which the programs perform calculations.

In the thesis, the effect of a twin and a single wheel on the pavement structure and cost in different traffic and load frequencies was studied. The results of the calculation of twin and single wheels in the pavement calculation program KAP based on Estonian guideline were compared with the calculations made with the pavement calculation program KRP that is based on Finnish guideline. Studies were carried out on state roads and previously designed road structures were compared in KAP program with a calculation assuming the use of a single wheel. In addition, the author studied how the transition factors currently in use have been calculated. The structure of traffic in different categories of state roads, as well as the share of single wheels in Estonian traffic were compared.

Calculations for twin and single wheel structures were carried out in road classes 1-4. As a result, it turned out that the increase in cost due to the use of a single wheel occurred only in the 1st and 2nd road classes. It can be concluded from this that smaller road classes have sufficient margin in the calculation of the twin wheel to ensure also the safety of single wheels, as the share of trailer trucks on lower-type and less-loaded roads is smaller. In addition, it turned out that the results of KAP calculations depend not only on the road class, but also on the load frequency. The higher the road class, the lower the permissible tensile stresses and the greater the effect of the wheel factor.

The hypothesis set for the thesis was only partially correct. In the course of the work, it turned out that in the case of building the entire Estonian road network at once, when designing a single wheel, the result is really more expensive than for a twin wheel, but only 1%. The difference in price between the two wheel types was due to the thickness of the AC base layer. The purpose of the AC base layer is first and foremost to ensure load-bearing capacity, and due to the increased load from a single wheel, the thickness of its asphalt layer also increased.

The increase in the cost of road construction compared to the calculation of a single wheel is marginal compared to the estimated costs of switching to another program, because the price difference when comparing the Finnish methods to KAP for a single wheel is 11.8%.

However, the continued use of KAP cannot be considered prospective based on the findings of the 2016 and 2022 studies due to both direct and indirect errors in KAP algorithms and logic.

In the course of the research, an analysis of the lifespan of the pavement was also carried out, as a result of which it turned out that as a result of the calculation of the twin wheel, 1% of money is saved, but 20-30% is likely to be lost in the lifetime of the structure – however, this is only in a very small part of the state roads (3.5%).

The current pavement calculation methodology was developed at a time when vehicles on the road and their tires were very different from those used today. In order to find out whether the roads designed by KAP for the single wheel would also be strong enough in practice to ensure a longer life of the roads, even more in-depth studies should be carried out and the causes of the actual defects detected should be analysed.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Transpordiamet, „Riigiteede teehoiukava,” Transpordiamet, 22. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://transpordiamet.ee/teehoiukava#ehitamine> [Kasutatud 1. aprill 2024].
- [2] A. Kendra, „Elastsete katendite projekteerimisjuhendi 2001- 52 täiendamine siirdetegurite osas nr 2015-8,” Tallinn: Maanteeamet, 2015. [Võrgumaterjal] Available: <https://transpordiamet.ee/media/3194/download> [Kasutatud 11. märts].
- [3] VSN 46-83, „Инструкция для проектирования дорог с покрытием,” Moskva, 1983. [Võrgumaterjal]. https://znaytovar.ru/gost/2/VSN_4683_Instrukciya_po_proekt.html [Kasutatud 6. märts 2024].
- [4] A. Kendra, H. Rõuk, A. Aavik, K. Jürgenson, S. Sillamäe, O. Ojapõld, R. Renter, A. Pozarski. „Elastsete teekatendite arvutusmetoodika arendamine,” Tallinn: Maanteeamet, 2016. [Võrgumaterjal]. <https://transpordiamet.ee/media/3173/download> [Kasutatud 11. märts 2024].
- [5] P. Talviste, „Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamine lähtekohtade alusuuring II etapp vahearuanne,” Tallinn: IPT Projektijuhtimine OÜ, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://transpordiamet.ee/media/16812/download> [Kasutatud 19. aprill 2024].
- [6] P. Talviste, „Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamine lähtekohtade alusuuring III etapp lõpparuanne,” Tallinn: IPT Projekteerimine OÜ, 2022. [Võrgumaterjal]. <https://transpordiamet.ee/media/16808/download> [Kasutatud 27. aprill 2024].
- [7] S. Talpas-Taltsepp, „Eestis kasutusel oleva katendiarvutusmetoodika probleemid ning alternatiivse programmi realiseerimine kasutades Soome metoodikat,” Tallinn, 2024.
- [8] Soome transpordiamet, „Teekonstruktsioonide projekteerimine: Soome Transpordiameti juhend 38/2018,” Helsingi, 2018. [Võrgumaterjal]. <https://transpordiamet.ee/media/2783/download> [Kasutatud 15. märts 2024].
- [9] A. Kendra, J. Idnurm, A. Küüt, J. Laanes, S. Talpas-Taltsepp, „ 60-tonni uuring: Raskemate ja pikemate veoste mõju arvutamine riigiteede taristule,” Tallinn: T-Konsult, 2023.

- [10] Transpordiamet, „2023. aasta riigiteede liiklussagedus andmed,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2024-04/2023.%20aasta%20riigiteede%20liiklussageduste%20andmed.xlsx> [Kasutatud 5. aprill 2024].
- [11] A. M Abu Abdo, „EFFECTS OF DUAL VERSUS SUPER SINGLE TRUCK TIRE ON FLEXIBLE PAVEMENT PERFORMANCE; A MECHANISTIC APPROACH,” Ras AI Khaimah, 2017 [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/318777607_Effects_of_dual_versus_super_single_truck_tire_on_flexible_pavement_performance_a_mechanistic_approach [Kasutatud 22. märts 2024].
- [12] R. Salgado, D. Kim, „EFFECTS OF HEAVIER TRUCK LOADINGS AND SUPER-SINGLE TIRES ON SUBGRADES,” Indiana: Purdue Ülikool, 2002 [Võrgumaterjal]. Available: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1547&context=jtrp> [Kasutatud 22. märts 2024].
- [13] Transpordiamet, „Elastsete teekatendite projekteerimise juhend,” Tallinn: Transpordiamet, 2023. [Võrgumaterjal]. <https://transpordiamet.ee/media/19533/download> [Kasutatud 4. märts 2024].
- [14] Secnic Transport, „our fleet,” [Võrgumaterjal]. <https://secnik.eu/en/our-fleet/> [kasutatud 15.aprill 2024].
- [15] AS Teede Tehnokeskus, „Liiklusloenduse tulemused 2009. aastal,” Tallinn: Maanteeamet, 2010. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.transpordiamet.ee/liiklussageduse-statistika#item-15> [Kasutatud 19. märts 2024].
- [16] L. Kaal, A. Kendra, P. Talviste, J. Taro, T. Kaal, „Optimaalse teekonstruktsiooni koostamise metoodika väljatöötamine: I etapp,” Tallinn: ERC Konsultatsiooni OÜ, 2016. [Võrgumaterjal]. <https://transpordiamet.ee/media/3171/download> [Kasutatud 30. märts 2024].
- [17] Majandus- ja taristuminister, „Tee projekteerimise normid: Lisa,” 5. august 2015. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.riigiteataja.ee/akti/isa/1070/8201/5014/MKM_m106_lisa.pdf# [Kasutatud 19. märts 2024].

- [18] ODN 218.046-01, „Vene Föderatsiooni juhend,” Moskva, 2001. [Võrgumaterjal]. Available: https://znaytovar.ru/gost/2/ODN_21804601_Proektirovanie_ne.html [Kasutatud 21. märts 2024].
- [19] L. Rothenburg, „Russia Highway Rehabilitation and Maintenance Project: Review of Design Standards,” Kanada: University of Waterloo, 1993.
- [20] Teede Tehnokeskus, „Sõidukite kaalumine,” Tallinn: AS Teede Tehnokeskus. [Võrgumaterjal]. Available: <https://teed.ee/teenused/teeinfosusteemid/its/kaalumispunktid/> [Kasutatud 27. märts 2024].
- [21] O. Franzese, H. E. (Bill)Knee, L. Slezak, „Effect of Wide-Based Single Tires on Fuel Efficiency of Class 8 Combination Trucks,” Transportation Research Record, 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <https://doi.org/10.3141/2191-01> [Kasutatud 17. aprill 2024].
- [22] Englo, „ Ratastel Tee Tasasuse ja Profiili Mõõteseade,” Tallinn: Englo OÜ. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.englo.eu/et/products-estonian/gapman> [Kasutatud 14. aprill 2024].
- [23] Transpordiamet, „Teeregister,” Transpordiamet. [Võrgumaterjal]. Available: <https://teeregister.mnt.ee/reet/search> [Kasutatud 19. märts 2024].
- [24] Maa-amet, „Fotoladu,” Maa-amet. [Võrgumaterjal]. Available: <https://fotoladu.maaamet.ee/?basemap=hybriidk&zlevel=13,24.98044,59.46620&overlay=aasta&valik=2019&etak=24.97992,59.46632> [Kasutatud 19. märts 2024].
- [25] Maa-amet, „Maainfo,” Maa-amet. [Võrgumaterjal]. Available: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo> [Kasutatud 19. märts2024].
- [26] Majandus- ja kommunikatsiooniminister, „Tee seisundinõuded,” Riigi Teataja, 2003. [Võrgumaterjal]. <https://www.riigiteataja.ee/akt/230084> [Kasutatud 24. märts].
- [27] A. Požarski, „Sõidukite siirdetegurite analüüs Adavere ja Luige kaalupunktide andmetel,” Tallinn: 2017.
- [28] A. Funk, „Riigitee 14178 Pikknurme-Härjanurme km 10,942 asuva Kaatvere silla rekonstrueerimise põhiprojekt, „ Tallinn: Stricto Project OÜ, 2022. [Võrgumaterjal] Available: <https://transpordiamet.ee/media/16905/download> [Kasutatud 17. aprill 2024].

- [29] P. Varin, T. Saarenketo, „Effect of axle and tyre configurations on pavement durability – a prestudy,” Soome: The ROADEx Network, 2014. [Võrgumaterjal] Available: https://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/10/ROADEx_Axle_Tyre_Prestudy_15102014%20Final.pdf [Kasutatud 26. märts 2024].
- [30] Riigihanke Register, „Riigitee nr 4 Tallinn–Pärnu–Ikla km 133,4-143 Pärnu–Uulu 2+2 teelõigu ehitus,” Transpordiamet, 2022. [Võrgumaterjal] Available: <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/4002328/general-info> [Kasutatud 30. märts 2024].
- [31] N. Odemark, „Undersökning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin,” Rootsi: 1949.
- [32] J. C. Pais, P. Pereira, „Development of a Model for Equivalent Axle Load Factors,” University of Minho, 2016. [Võrgumaterjal] Available: https://www.researchgate.net/publication/307574598_Development_of_a_Model_for_Equivalent_Axle_Load_Factors [Kasutatud 28. märts 2024].

Lisa 1. Gapman: Katse I 1/4

1	Mõõteseade: GAPMAN		
2	Seerianumber: 0040818		
3	Katse aeg: 17.03.2024 04:07:19		
4	Koordinaadid: 59.4653681 24.9799714		
5			
6	Teepikkus	Kõrgus (mm)	
7	0	0	
8	0,05	1,3	
9	0,1	2,2	
10	0,15	3	
11	0,2	3,7	
12	0,25	4,6	
13	0,3	5,2	
14	0,35	5,9	
15	0,4	6,8	
16	0,45	7,3	
17	0,5	8,1	
18	0,55	8,7	
19	0,6	9,4	
20	0,65	10	
21	0,7	10,9	
22	0,75	11,7	
23	0,8	12,5	
24	0,85	13,2	
25	0,9	13,4	
26	0,95	13,5	
27	1	13,2	
28	1,05	12,7	
29	1,1	11,9	
30	1,15	10,7	
31	1,2	9,5	
32	1,25	8,5	
33	1,3	7,8	
34	1,35	7,2	
35	1,4	7	
36	1,45	7	
37	1,5	7,4	
38	1,55	8	
39	1,6	8,7	
40	1,65	9,5	
41	1,7	10,1	
42	1,75	11,1	
43	1,8	11,7	
44	1,85	12,7	
45	1,9	13,8	
46	1,95	15,2	
47	2	16,3	
48	2,05	17,5	

Lisa 2. Gapman: Katse I 2/4

49	2,1	19,2		
50	2,15	20,5		
51	2,2	22		
52	2,25	23,4		
53	2,3	24,6		
54	2,35	26,3		
55	2,4	27,6		
56	2,45	28,8		
57	2,5	29,8		
58	2,55	30,9		
59	2,6	31,6		
60	2,65	32,3		
61	2,7	32,7		
62	2,75	33		
63	2,8	33,4		
64	2,85	33,8		
65	2,9	33,8		
66	2,95	33,9		
67	3	33,7		
68	3,05	33,3		
69	3,1	33		
70	3,15	32,7		
71	3,2	32,4		
72	3,25	32,5		
73	3,3	32,6		
74	3,35	32,7		
75	3,4	33		
76	3,45	33,7		
77	3,5	34,3		
78	3,55	35,2		
79	3,6	36,5		
80	3,65	37,4		
81	3,7	38,9		
82	3,75	40,6		
83	3,8	42,3		
84	3,85	43,6		
85	3,9	44,6		
86	3,95	45,8		
87	4	47,1		
88	4,05	47,6		
89	4,1	48,4		
90	4,15	49,3		
91	4,2	50		
92	4,25	50,3		
93	4,3	51,1		
94	4,35	52		
95	4,4	52,8		
96	4,45	53,9		
97	4,5	54,7		

Lisa 3. Gapman: Katse I 3/4

98	4,55	54,8		
99				
100				
101				
102	4,6	54,5		
103	4,65	54,1		
104	4,7	53,3		
105	4,75	52,2		
106	4,8	50,8		
107	4,85	49,6		
108	4,9	48,7		
109	4,95	46,9		
110	5	45,8		
111	5,05	44,4		
112	5,1	42,1		
113	5,15	40,2		
114	5,2	38,5		
115	5,25	36,7		
116	5,3	34		
117	5,35	32,7		
118	5,4	31,3		
119	5,45	29,8		
120	5,5	28,6		
121	5,55	27,3		
122	5,6	26,4		
123	5,65	25,7		
124	5,7	25,4		
125	5,75	24,9		
126	5,8	24,6		
127	5,85	24,1		
128	5,9	23,8		
129	5,95	23,8		
130	6	23,9		
131	6,05	23,9		
132	6,1	23,8		
133	6,15	23,4		
134	6,2	22,7		
135	6,25	22		
136	6,3	21,3		
137	6,35	20,8		
138	6,4	19,9		
139	6,45	18,9		
140	6,5	17,8		
141	6,55	16,6		
142	6,6	15,3		
143	6,65	13,8		
144	6,7	12,3		
145	6,75	10,5		
146	6,8	9,1		

Lisa 4. Gapman: Katse I 4/4

147	6,85	7,5	
148	6,9	6	
149	6,95	4,1	
150	7	2,1	
151	7,05	0,1	
152	7,1	-1,7	
153	7,15	-3,6	
154	7,2	-5,3	
155	7,25	-7,1	
156	7,3	-8,8	
157	7,35	-10,3	
158	7,4	-11,9	
159	7,45	-13,1	
160	7,5	-14,4	
161	7,55	-15,1	
162	7,6	-15,9	
163	7,65	-16,5	
164	7,7	-16,6	
165	7,75	-16,5	
166	7,8	-16,1	
167	7,85	-15,6	
168	7,9	-15,1	
169	7,95	-14,9	
170	8	-15,1	
171	8,05	-15,6	
172	8,1	-16,6	
173	8,15	-17,5	
174	8,2	-18,9	
175	8,25	-20,3	
176	8,3	-21,8	
177	8,35	-23,1	
178	8,4	-24,3	
179	8,45	-25,6	
180	8,5	-26,5	
181	8,55	-27,7	
182	8,6	-28,5	
183	8,65	-29,7	
184	8,7	-30,7	
185	8,75	-31,8	
186	8,8	-32,7	
187	8,85	-33,8	
188	8,9	-35,1	
189	8,95	-36,5	
190	9	-38,3	
191	9,05	-40,8	

Lisa 5. Gapman: Katse II 1/4

1	Mõõtesead: GAPMAN		
2	Seerianumber: 0040818		
3	Katse aeg: 17.03.2024 04:09:06		
4	Koordinaadid: 59.4655642 24.9799923		
5			
6	Teepikkus	Kõrgus (mm)	
7	0	0	
8	0,05	0,9	
9	0,1	1,7	
10	0,15	2,4	
11	0,2	3	
12	0,25	3,7	
13	0,3	4,4	
14	0,35	5,1	
15	0,4	5,9	
16	0,45	6,6	
17	0,5	7,2	
18	0,55	8,1	
19	0,6	8,8	
20	0,65	9,2	
21	0,7	9,9	
22	0,75	10,6	
23	0,8	11,6	
24	0,85	12,4	
25	0,9	13,2	
26	0,95	13,6	
27	1	13,6	
28	1,05	13,5	
29	1,1	13,3	
30	1,15	12,7	
31	1,2	11,7	
32	1,25	10,7	
33	1,3	10,2	
34	1,35	9,9	
35	1,4	9,9	
36	1,45	10	
37	1,5	10,2	
38	1,55	10,7	
39	1,6	11,2	
40	1,65	11,9	
41	1,7	12,7	
42	1,75	13,7	
43	1,8	14,9	
44	1,85	16,1	
45	1,9	17,1	
46	1,95	18,3	
47	2	19,2	
48	2,05	20,3	
49	2,1	21,5	

Lisa 6. Gapman: Katse II 2/4

50	2,15	22,7			
51	2,2	24,1			
52	2,25	25,2			
53	2,3	26,3			
54	2,35	27,5			
55	2,4	29			
56	2,45	30,2			
57	2,5	31,2			
58	2,55	32,3			
59	2,6	33,1			
60	2,65	33,9			
61	2,7	34,9			
62	2,75	35,6			
63	2,8	36,2			
64	2,85	36,7			
65	2,9	36,8			
66	2,95	36,9			
67	3	36,6			
68	3,05	36,5			
69	3,1	36,1			
70	3,15	35,8			
71	3,2	35,5			
72	3,25	35,3			
73	3,3	35,3			
74	3,35	35,4			
75	3,4	35,5			
76	3,45	35,6			
77	3,5	36,1			
78	3,55	37			
79	3,6	38			
80	3,65	39,2			
81	3,7	40,5			
82	3,75	41,9			
83	3,8	43,4			
84	3,85	45,2			
85	3,9	46,7			
86	3,95	48,5			
87	4	49,9			
88	4,05	51,4			
89	4,1	52,4			
90	4,15	53,7			
91	4,2	54,8			
92	4,25	55,5			
93	4,3	56,2			
94	4,35	56,7			
95	4,4	57			
96	4,45	57,8			
97	4,5	58,8			
98	4,55	60,1			

Lisa 7. Gapman: Katse II 3/4

99	4,6	60,9		
100	4,65	61,1		
101	4,7	61,7		
102	4,75	62,5		
103	4,8	63,1		
104	4,85	63,6		
105	4,9	63,8		
106	4,95	63,5		
107	5	62,3		
108	5,05	60,5		
109	5,1	59,5		
110	5,15	58,3		
111	5,2	57,5		
112	5,25	56,3		
113	5,3	55,5		
114	5,35	54,2		
115	5,4	52,8		
116	5,45	51,3		
117	5,5	49,7		
118	5,55	48,2		
119	5,6	46,9		
120	5,65	45		
121	5,7	43,4		
122	5,75	42		
123	5,8	40,6		
124	5,85	39,1		
125	5,9	37,8		
126	5,95	36,7		
127	6	35,9		
128	6,05	35,2		
129	6,1	34,8		
130	6,15	34,3		
131	6,2	34,3		
132	6,25	34,2		
133	6,3	34,1		
134	6,35	34,1		
135	6,4	34,1		
136	6,45	34,1		
137	6,5	33,9		
138	6,55	33,9		
139	6,6	33,5		
140	6,65	33,1		
141	6,7	32,6		
142	6,75	31,9		
143	6,8	31,1		
144	6,85	30,1		
145	6,9	29,2		
146	6,95	28,4		
147	7	27		

Lisa 8. Gapman: Katse II 4/4

148	7,05	25,8		
149	7,1	24,5		
150	7,15	23,4		
151	7,2	21,9		
152	7,25	20,5		
153	7,3	19,2		
154	7,35	18,1		
155	7,4	16,6		
156	7,45	15,2		
157	7,5	13,6		
158	7,55	12,2		
159	7,6	10,9		
160	7,65	9,2		
161	7,7	7,6		
162	7,75	6,1		
163	7,8	4,7		
164	7,85	3,3		
165	7,9	2		
166	7,95	1,1		
167	8	0,3		
168	8,05	0		
169	8,1	0		
170	8,15	0,3		
171	8,2	0,7		
172	8,25	1,3		
173	8,3	1,7		
174	8,35	2		
175	8,4	2,2		
176	8,45	2,1		
177	8,5	1,8		
178	8,55	1,2		
179	8,6	0,3		
180	8,65	-0,4		
181	8,7	-1,3		
182	8,75	-2,3		
183	8,8	-3,3		
184	8,85	-4,1		
185	8,9	-4,9		
186	8,95	-5,8		
187	9	-6,5		
188	9,05	-7,1		
189	9,1	-7,7		
190	9,15	-8,4		
191	9,2	-9,3		
192	9,25	-10		
193	9,3	-10,9		
194	9,35	-11,8		
195	9,4	-12,8		

Lisa 9. Gapman: Katse III 1/5

1	Mõõtesead: GAPMAN			
2	Seerianumber: 0040818			
3	Katse aeg: 17.03.2024 04:10:24			
4	Koordinaadid: 59.4658265 24.9800223			
5				
6	Teepikkus	Kõrgus (mm)		
7	0	0		
8	0,05	0,8		
9	0,1	1,3		
10	0,15	1,8		
11	0,2	2,1		
12	0,25	2,6		
13	0,3	3		
14	0,35	3,3		
15	0,4	3,7		
16	0,45	3,8		
17	0,5	4		
18	0,55	4,7		
19	0,6	5,2		
20	0,65	5,8		
21	0,7	6,5		
22	0,75	7,3		
23	0,8	7,9		
24	0,85	8,7		
25	0,9	9,2		
26	0,95	9,6		
27	1	9,7		
28	1,05	9,3		
29	1,1	8,4		
30	1,15	7		
31	1,2	6		
32	1,25	4,7		
33	1,3	3,9		
34	1,35	3,5		
35	1,4	3,5		
36	1,45	3,8		
37	1,5	4,2		
38	1,55	4,7		
39	1,6	5,4		
40	1,65	6,2		
41	1,7	7,1		
42	1,75	7,7		
43	1,8	8,7		
44	1,85	9,8		
45	1,9	11,2		
46	1,95	12,2		
47	2	13,4		
48	2,05	14,7		
49	2,1	15,9		

Lisa 10. Gapman: Katse III 2/5

50	2,15	17		
51	2,2	17,9		
52	2,25	18,8		
53	2,3	19,7		
54	2,35	20,2		
55	2,4	20,9		
56	2,45	21,6		
57	2,5	22,2		
58	2,55	22,8		
59	2,6	23,4		
60	2,65	23,8		
61	2,7	24		
62	2,75	24,4		
63	2,8	24,6		
64	2,85	24,7		
65	2,9	24,6		
66	2,95	24,4		
67	3	24,3		
68	3,05	23,9		
69	3,1	23,5		
70	3,15	22,8		
71	3,2	22,2		
72	3,25	22		
73	3,3	21,5		
74	3,35	21,5		
75	3,4	21,7		
76	3,45	22		
77	3,5	22,7		
78	3,55	23,6		
79	3,6	24,5		
80	3,65	25,9		
81	3,7	27,4		
82	3,75	29,2		
83	3,8	30,5		
84	3,85	32,3		
85	3,9	33,7		
86	3,95	35,1		
87	4	36,4		
88	4,05	37,5		
89	4,1	38,8		
90	4,15	39,6		
91	4,2	40,7		
92	4,25	41,4		
93	4,3	42,1		
94	4,35	42,8		
95	4,4	43,7		
96	4,45	44,8		
97	4,5	46,1		
98	4,55	47,4		

Lisa 11. Gapman: Katse III 3/5

99	4,6	48,4		
100	4,65	48,9		
101	4,7	48,9		
102	4,75	49,4		
103	4,8	49,9		
104	4,85	50,2		
105	4,9	50,7		
106	4,95	51,2		
107	5	51,4		
108	5,05	51,8		
109	5,1	52,6		
110	5,15	53,7		
111	5,2	54,6		
112	5,25	54,7		
113	5,3	54,5		
114	5,35	54,1		
115	5,4	53,3		
116	5,45	52,5		
117	5,5	51,8		
118	5,55	50,9		
119	5,6	49,9		
120	5,65	49,3		
121	5,7	48,5		
122	5,75	47,4		
123	5,8	46,4		
124	5,85	45,6		
125	5,9	44,6		
126	5,95	42,8		
127	6	41,8		
128	6,05	41		
129	6,1	40,4		
130	6,15	39,6		
131	6,2	38,7		
132	6,25	37,2		
133	6,3	36		
134	6,35	35,1		
135	6,4	33,9		
136	6,45	32,4		
137	6,5	30,9		
138	6,55	29,5		
139	6,6	28		
140	6,65	26,3		
141	6,7	24,4		
142	6,75	22,3		
143	6,8	19,5		
144	6,85	18,1		
145	6,9	16,2		
146	6,95	14,5		
147	7	12,7		

Lisa 12. Gapman: Katse III 4/5

148	7,05	11,2		
149	7,1	10,3		
150	7,15	9,4		
151	7,2	8,7		
152	7,25	8,3		
153	7,3	8		
154	7,35	7,7		
155	7,4	7,6		
156	7,45	7,4		
157	7,5	6,9		
158	7,55	6,6		
159	7,6	6,2		
160	7,65	5,9		
161	7,7	5,2		
162	7,75	5,1		
163	7,8	4,6		
164	7,85	4		
165	7,9	3,3		
166	7,95	2,9		
167	8	2,3		
168	8,05	1,2		
169	8,1	0,3		
170	8,15	-1,1		
171	8,2	-2,2		
172	8,25	-3,6		
173	8,3	-5		
174	8,35	-6,9		
175	8,4	-8,3		
176	8,45	-10,1		
177	8,5	-12,2		
178	8,55	-13,9		
179	8,6	-15,5		
180	8,65	-17,2		
181	8,7	-18,8		
182	8,75	-20,4		
183	8,8	-21,8		
184	8,85	-23,2		
185	8,9	-24,8		
186	8,95	-25,8		
187	9	-27		
188	9,05	-27,8		
189	9,1	-28,7		
190	9,15	-29,2		
191	9,2	-29,5		
192	9,25	-29,5		
193	9,3	-29,5		
194	9,35	-29,4		
195	9,4	-29,3		

Lisa 13. Gapman: Katse III 5/5

196	9,45	-29,3		
197	9,5	-30,1		
198	9,55	-30,7		
199	9,6	-31		
200	9,65	-31,6		
201	9,7	-32		
202	9,75	-32,7		
203	9,8	-33,4		
204	9,85	-34,1		
205	9,9	-34,8		
206	9,95	-35,7		
207	10	-36,5		
208	10,05	-37,4		
209	10,1	-38,3		
210	10,15	-39,3		
211	10,2	-40,7		
212	10,25	-41,6		
213	10,3	-42,6		
214	10,35	-43,8		
215	10,4	-45,1		
216	10,45	-46,5		
217	10,5	-47,8		
218	10,55	-49,2		
219	10,6	-50,8		

Lisa 14. Gapman: Katse IV 1/3

1	Mõõtesead: GAPMAN		
2	Seerianumber: 0040818		
3	Katse aeg: 17.03.2024 04:15:01		
4	Koordinaadid: 59.4674200 24.9799618		
5			
6	Teepikkus	Kõrgus (mm)	
7	0	0	
8	0,05	1,1	
9	0,1	3,1	
10	0,15	4,2	
11	0,2	5,3	
12	0,25	6,1	
13	0,3	6,9	
14	0,35	7,6	
15	0,4	8,2	
16	0,45	8,6	
17	0,5	9,4	
18	0,55	10,2	
19	0,6	11,4	
20	0,65	12,5	
21	0,7	14	
22	0,75	15,3	
23	0,8	16,3	
24	0,85	16,5	
25	0,9	16,9	
26	0,95	17,4	
27	1	18,1	
28	1,05	19,3	
29	1,1	20,2	
30	1,15	21,2	
31	1,2	22,2	
32	1,25	22,3	
33	1,3	22,3	
34	1,35	21,7	
35	1,4	20,2	
36	1,45	19,7	
37	1,5	19,3	
38	1,55	19,6	
39	1,6	19,9	
40	1,65	20,1	
41	1,7	20,2	
42	1,75	20,4	
43	1,8	21	
44	1,85	21,8	
45	1,9	22,3	
46	1,95	23,1	
47	2	24	
48	2,05	24,6	
49	2,1	26	

Lisa 15. Gapman: Katse IV 2/3

50	2,15	26,6		
51	2,2	27,8		
52	2,25	29,1		
53	2,3	29,9		
54	2,35	31,8		
55	2,4	33,3		
56	2,45	35,2		
57	2,5	36,2		
58	2,55	37,7		
59	2,6	39,2		
60	2,65	40,3		
61	2,7	42,1		
62	2,75	42,9		
63	2,8	44		
64	2,85	45,1		
65	2,9	46,2		
66	2,95	47,2		
67	3	48,2		
68	3,05	49,2		
69	3,1	50,2		
70	3,15	50,9		
71	3,2	51,1		
72	3,25	50,8		
73	3,3	50,8		
74	3,35	50,7		
75	3,4	50,5		
76	3,45	50,3		
77	3,5	50,2		
78	3,55	50		
79	3,6	49,9		
80	3,65	49,9		
81	3,7	50		
82	3,75	50,4		
83	3,8	51,2		
84	3,85	52,1		
85	3,9	53,3		
86	3,95	54,5		
87	4	56,2		
88	4,05	57,8		
89	4,1	59		
90	4,15	60,7		
91	4,2	62,3		
92	4,25	63,8		
93	4,3	65,3		
94	4,35	66,8		
95	4,4	68,2		
96	4,45	69		
97	4,5	70,2		
98	4,55	71,6		

Lisa 16. Gapman: Katse IV 3/3

99	4,6	72,6		
100	4,65	73,5		
101	4,7	74,2		
102	4,75	75,4		
103	4,8	76,5		
104	4,85	77,5		
105	4,9	78,4		
106	4,95	79,5		
107	5	80,4		
108	5,05	81,5		
109	5,1	82,3		
110	5,15	83,3		
111	5,2	84,2		
112	5,25	85,2		
113	5,3	86,4		
114	5,35	87,4		
115	5,4	88,4		

Lisa 17. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp I (paarisratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline näidiskatend

Koormussagedus: 6535 normtelge ööp/rajale

Maantee klass: 1

Teekatendi liik: Püsikatend

Tugevustegur: 1.03

Töökindlustegur: 0.98

Normhålbetegur 1.71

Pinnas: FSa - Peenliiv

Katendi omadused ei sõltu niiskuspakkonnast

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: 0

Arvutusliku koormuse liik: Veoauto A

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Erisurve kattede: 0.6 MPa

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisratas

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0.9

Lisainfo: Arvutuskoht PK...+...

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast- susmoodul E_{elk}	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks painedele	Arvutatud tõmbe- pinged R_{max}	Lubata- vad tõmbe- pinged R_{lub}	Sise- hõõrde- nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	3.0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	9.0	1400	800	2200	0.7942	0.8583			
4	Tard- või paekivikillustik (LA <35)	20.0	280							
5	Paekillustik (LA ≥ 35)	30.0	240							
6	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	35.0	105					38.0	0,005	5.0
ALUS	FSa - Peenliiv		100.0					38.0	0.005	5.0

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus- moodul Mpa	Vajalik elastsus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{grv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			9.6%	364.71	323.07	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	3.0					364.71		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0					338.12		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	9.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			7.5%	282.32		
4	Tard- või paekivikillustik (LA <35)	20.0					203.18		
5	Paekillustik (LA≥35)	30.0					162.15		
6	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	35.0	Nihkepinged	0.0034	0.0073	53.0%	101.51		

FSa - Peenliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0.0018	0.0073	124.2%			-
Katendi kogupaksus	102.0					Parandustegur Δ		

Lisa 18. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp I (üksikratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline näidiskatend

Koormussagedus: 6535 normtelge ööp/raja

Maantee klass: 1

Teekatendi liik: Püsikatend

Tugevustegur: 1.03

Töökindlustegur: 0.98

Normhålbetegur 1.71

Pinnas: F5a - Peenliiv

Katendi omadused ei sõltu niiskuspäikkonnast

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: 0

Arvutusliku koormuse liik: Veoauto A

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Erisurve kattele: 0.6 MPa

Koormus: Dünaamiline, 1,00 üksikratas

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0.9

Lisainfo: Arvutuskoht PK...+...

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast- susmoodul E_{elk}	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks nihele	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbepinged R_{max}	Lubata- vad tõmbepinged R_{lub}	Sise- hõõrde- nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastiksfalt - SMA	3.0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	9.0	1400	800	2200	0.9344	0.8583			
4	Tard- või paekivikillustik (LA <35)	20.0	280							
5	Paekillustik (LA235)	30.0	240							
6	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	35.0	105					38.0	0.005	5.0
ALUS	F5a - Peenliiv		100.0					38.0	0.005	5.0

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastus- moodul Mpa	Vajalik elastus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastusmoodul			9.6%	364.71	323.07	
1	Killustikmastiksfalt - SMA	3.0					364.71		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0					338.12		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	9.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			-8.9%	282.32		
4	Tard- või paekivikillustik (LA <35)	20.0					203.18		
5	Paekillustik (LA≥35)	30.0					162.15		
6	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	35.0	Nihkepinged	0.0034	0.0073	53.0%	101.51		

F5a - Peenliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0.0018	0.0073	124.2%			-
Katendi kogupaksus	102.0					Parandustegur Δ		

Lisa 19. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp II (paarisratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0

Juhendi (2017) näide - 7-kihiline nädiskatend

Koormussagedus: 6535 normtelge ööp/rajaale

Maantee klass: 1

Teekatendi liik: Püskatend

Tugevustegur: 1.03

Töökindlustegur: 0.98

Normhätbetegur 1.71

Pinnas: CclSa - Jäme kerge saviliiv

Katendi omadused ei sõltu niiskuspakkonnast

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: 0

Arvutusliku koormuse liik: Veoauto A

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Erisurve kattele: 0.6 MPa

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisratas

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

Lisainfo: Arvutuskoht PK...+...

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast- susmoodul E_{sk}	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbe- pinged R_{max}	Lubata- vad tõmbe- pinged R_{lub}	Sise- hõõrde- nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	3.0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	9.0	1400	800	2200	0.8240	0.8583			
4	Tard- või paekivikillustik (LA <35)	15.0	280							
5	Paekillustik (LA235)	30.0	240							
6	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	35.0	105					38.0	0.005	5.0
7	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	50.0	90					36.0	0.004	4.0
ALUS	CclSa - Jäme kerge saviliiv		65.0					40.0	0.005	3.0

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus- moodul Mpa	Vajalik elastsus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t_{arv}	t_{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			3.5%	344.26	323.07	
1	Killustikmastiksfalt - SMA	3.0					344.26		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0					316.71		

3	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	9.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			4.0%	264.86		
4	Tard- või paekivikillustik (LA <35)	15.0					188.23		
5	Paekillustik (LA235)	30.0					155.83		
6	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	35.0	Nihkepinged	0.0043	0.0073	40.5%	93.01		
7	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	50.0	Nihkepinged	-0.0009	0.0047	119.4%	80.47		
	CclSa - Jäme kerge saviliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0.0085	0.0044	295.3%			-
	Katendi kogupaksus	147.0					Parandustegur Δ		

Lisa 20. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp II (üksikratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline näidiskatend

Koormussagedus: 6535 normtelge ööp/rajale

Pinnas: CclSa - Jäme kerge saviliiv

Arvutusliku koormuse liik: V

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1.03

Katendi omadused ei sõltu niiskuspäikkonnast

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püsikatend

Töökindlustegur: 0.98

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: 0

Erisurve kattele: 0.6 MPa

Normhõlbetegur 1.71

Koormus: Dünaamiline, 1,0C

Lisainfo: Arvutuskoht PK...+...

Alumise asfaltkihi mat. tegu

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Kihi elast- susmoodul E_{ekv} arvutamiseks MPa	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks nihkele MPa	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks paindele MPa	Arvutatud tõmbe- pinged R_{max} MPa	Lubata- vad tõmbe- pinged R_{lub} MPa	Sise- hõõrde- nurk Kraad	Nidusus C
1	Killustikmastiksfalt - SMA	3.0	3200	1800	4500				
2	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0	2400	1200	3600				
3	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	9.0	1400	800	2200	0.9695	0.8583		
4	Tard- või paekivikillustik (LA <35)	15.0	280						
5	Paekillustik (LA ≥35)	30.0	240						
6	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	35.0	105					38.0	0.005
7	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	50.0	90					36.0	0.004
ALUS	CclSa - Jäme kerge saviliiv		65.0					40.0	0.005

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus- moodul Mpa	Vajalik elastsus- moodul MPa
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %		
				t _{arv}	t _{lub}			
			Üldine elastsusmoodul			3.5%	344.26	323.07

1	Killustikmastiksfalt - SMA	3.0					344.26	
2	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0					316.71	
3	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	9.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			-13.0%	264.86	
4	Tard- või paekivikillustik (LA <35)	15.0					188.23	
5	Paekillustik (LA ≥35)	30.0					155.83	
6	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	35.0	Nihkepinged	0.0043	0.0073	40.5%	93.01	
7	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	50.0	Nihkepinged	-0.0009	0.0047	119.4%	80.47	
	CclSa - Jäme kerge saviliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0.0085	0.0044	295.3%		
	Katendi kogupaksus	147.0					Parandustegur Δ	

Lisa 21. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp III (paarisratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline nädiskatend

Koormussagedus: 1494 normtelge ööp/raja

Maantee klass: 3

Teekatendi liik: Püsikatend

Tugevustegur: 0.95

Töökindlustegur: 0.9

Normhälbetegur 1.32

Pinna: CclSa - Jäme kerge saviliiv

Katendi omadused ei sõltu niiskuspakkonnast

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: 0

Arvutusliku koormuse liik: Veoauto A

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Erisurve kattele: 0.6 MPa

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisratas

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

Lisainfo: Arvutuskohd PK...+...

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast- susmoodul E_{skv}	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbep- pinged R_{max}	Lubata- vad tõmbep- pinged R_{lub}	Sise- hõõrde- nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0	2400	1200	3600					
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	10.0	1400	800	2200	0.9488	1.2339			
3	Paekillustik (LA235)	30.0	240							
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	60.0	105					38.0	0.005	5.0
5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	50.0	90					36.0	0.004	4.0
ALUS	CclSa - Jäme kerge saviliiv		65.0					40.0	0.005	3.0

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus- moodul Mpa	Vajalik elastsus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			8.6%	287.14	278.20	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0					287.14		
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	10.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			23.1%	240.80		
3	Paekillustik (LA235)	30.0					158.84		
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	60.0	Nihkepinged	0.0128	0.0114	-12.7%	97.18		

5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	50.0	Nihkepinged	-0.0011	0.0073	114.7%	80.47		
	CclSa - Jäme kerge saviliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0.0064	0.0068	193.8%			-
	Katendi kogupaksus	155.0					Parandustegur Δ		

Lisa 22. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp III (üksikratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline näidiskatend

Koormussagedus: 1494 normtelge ööp/raja

Maantee klass: 3

Teekatendi liik: Püskatend

Tugevustegur: 0.95

Töökindlustegur: 0.9

Normhälbetegur 1.32

Pinna: CclSa - Jäme kerge saviliiv

Katendi omadused ei sõltu niiskuspäikonnast

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: 0

Arvutusliku koormuse liik: Veoauto A

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Erisurve kattele: 0.6 MPa

Koormus: Dünaamiline, 1,00 üksikratas

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

Lisainfo: Arvutuskohat PK...+...

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Kihi elast- susmoodul E_{elast} arvutamiseks MPa	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks nihele MPa	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks painele MPa	Arvutatud tõmbep- pinged R_{max} MPa	Lubata- vad tõmbep- pinged R_{lub} MPa	Sise- hõõrde- nurk	Nidusus C	Kihtide seotistegur K3
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0	2400	1200	3600					
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	10.0	1400	800	2200	1.1163	1.2339			
3	Paekillustik (LA≥35)	30.0	240							
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	60.0	105					38.0	0.005	5.0
5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	50.0	90					36.0	0.004	4.0
ALUS	CclSa - Jäme kerge saviliiv		65.0					40.0	0.005	3.0

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastus- moodul Mpa	Vajalik elastus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{surf}	t _{lub}				
			Üldine elastusmoodul			8.6%	287.14	278.20	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	5.0					287.14		
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	10.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			9.5%	240.80		
3	Paekillustik (LA≥35)	30.0					158.84		
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	60.0	Nihkepinged	0.0128	0.0114	-12.7%	97.18		

5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	50.0	Nihkepinged	-0.0011	0.0073	114.7%	80.47		
	CclSa - Jäme kerge saviliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0.0064	0.0068	193.8%			-
	Katendi kogupaksus	155.0					Parandustegur Δ		

Lisa 23. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp IV (paarisratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline nädiskatend

Koormussagedus: 59.08 normtelge ööp/raja		Pinnas: A - kerge saviliiv	Arvutusliku koormuse liik: Veoauto A
Maantee klass: 4	Tugevustegur: 0.90	Niiskuspakkond: 2, niiske	Ratta jälje läbimõõt: 37 cm
Teekatendi liik: Püskatend	Töökindlustegur: 0.85	Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0.02	Erisurve kattele: 0.6 MPa
	Normhõlbetegur 1.32	L1.T3 p3+p5; -0.05+0.03=-0.02	Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisratas
Lisainfo: Arvutuskoht PK...+...			Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast- susmoodul E_{chi}	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks niiskele	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks painele	Arvutatud tõmbepinged R_{max}	Lubata- vad tõmbepinged R_{lub}	Sise- hõõrde- nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0	2400	1200	3600					
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	1400	800	2200	1.3846	2.1838			
3	Paekillustik (LA235)	25.0	240							
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	105					38.0	0.005	5.0
5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	90					36.0	0.004	4.0
ALUS	A - kerge saviliiv		47.0					35.0	0.012	1.5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastus- moodul Mpa	Vajalik elastus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Wary
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{snv}	t _{lub}				
			Üldine elastusmoodul			20.7%	195.47	180.00	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0					195.47		
2	kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			36.6%	174.58		
3	Paekillustik (LA≥35)	25.0					140.38		
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	Nihkepinged	0.0183	0.0201	8.9%	85.39		

5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	Nihkepinged	0.0072	0.0129	44.3%	70.84	
	A - kerge saviliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0.0011	0.0145	107.3%		0.724
	Katendi kogupaksus	100.0					Parandustegur Δ	0.000

Lisa 24. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp IV (üksikratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline nädiskatend

Koormussagedus: 59.08 normtelge ööp/rajaale

Maantee klass: 4

Teekatendi liik: Püsikatend

Tugevustegur: 0.90

Töökindlustegur: 0.85

Normhålbetegur 1.32

Pinnas: A - kerge saviliiv

Niiskupaikkond: 2, niiske

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0.02

L1.T3 p3+p5; -0,05+0,03=-0.02

Arvutusliku koormuse liik: Veoauto A

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Erisurve kattede: 0.6 MPa

Koormus: Dünaamiline, 1,00 üksikratas

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

Lisainfo: Arvutuskoht PK...+...

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast- susmoodul E_{elast}	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbe- pinged R_{max}	Lubata- vad tõmbe- pinged R_{lub}	Sise- hõõrde- nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0	2400	1200	3600					
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	1400	800	2200	1.6290	2.1838			
3	Paekillustik (LA≥35)	25.0	240							
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	105					38.0	0.005	5.0
5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	90					36.0	0.004	4.0
ALUS	A - kerge saviliiv		47.0					35.0	0.012	1.5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastus- moodul Mpa	Vajalik elastus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{surv}	t _{lub}				
			Üldine elastusmoodul			20.7%	195.47	180.00	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0					195.47		
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			25.4%	174.58		
3	Paekillustik (LA≥35)	25.0					140.38		
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	Nihkepinged	0.0183	0.0201	8.9%	85.39		

5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	Nihkepinged	0.0072	0.0129	44.3%	70.84		
	A - kerge saviliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0.0011	0.0145	107.3%			0.724
	Katendi kogupaksus	100.0					Parandustegur Δ		0.000

Lisa 25. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp V (paarisratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline nädiskatend

Koormussagedus: 59.08 normtelge ööp/rajaale

Maantee klass: 5

Teekatendi liik: Püsikatend

Tugevustegur: 0.85

Töökindlustegur: 0.8

Normhällbetegur 1.32

Pinnas: A - kerge saviliiv

Niiskuspakkond: 2, niiske

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0.02

L1.T3 p3+p5; -0,05+0,03=-0.02

Arvutusliku koormuse liik: Veeauto A

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Erisurve kattele: 0.6 MPa

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisratas

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

Lisainfo: Arvutuskoht PK...+...

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Kihi elast- susmoodul E_{skv} arvutamiseks MPa	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks niiskele MPa	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks painele MPa	Arvutatud tõmbep- pinged R_{max} MPa	Lubata- vad tõmbep- pinged R_{lub} MPa	Sise- hõõrde- nurk Kraad	Nidusus C	Kihtide seotistegur K3
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0	2400	1200	3600					
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	1400	800	2200	1.3846	2.3122			
3	Paekillustik (LA235)	25.0	240							
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	105					38.0	0.005	5.0
5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	90					36.0	0.004	4.0
ALUS	A - kerge saviliiv		47.0					35.0	0.012	1.5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus- moodul Mpa	Vajalik elastsus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{srv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			27.8%	195.47	180.00	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0					195.47		
2	kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			40.1%	174.58		
3	Paekillustik (LA235)	25.0					140.38		
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	Nihkepinged	0.0183	0.0213	14.0%	85.39		

5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	Nihkepinged	0.0072	0.0136	47.4%	70.84		
	A - kerge saviliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0.0011	0.0153	106.9%			0.724
	Katendi kogupaksus	100.0					Parandustegur Δ		0.000

Lisa 26. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp V (üksikratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline nädiskatend

Koormussagedus: 59.08 normtelge ööp/raiale
Maantee klass: 5
Teekatendi liik: Püsikatend

Tugevustegur: 0.85
Töökindlustegur: 0.8
Normhålbetegur: 1.32

Pinnas: A - kerge saviliiv
Niiskuspakkond: 2, niiske
Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0.02
L1.T3 p3+p5; -0,05+0,03=-0.02

Arvutusliku koormuse liik: Veoauto A
Ratta jälje läbimõõt: 37 cm
Erisurve kattele: 0.6 MPa
Koormus: Dünaamiline, 1,00 üksikratas
Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

Lisainfo: Arvutuskohi PK...+...

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast- susmoodul E_{elk}	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks nihele	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks painedele	Arvutatud tõmbe- pinged R_{max}	Lubata- vad tõmbe- pinged R_{lub}	Sise- hõõrde- nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0	2400	1200	3600					
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	1400	800	2200	1.6290	2.3122			
3	Paekillustik (LA235)	25.0	240							
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	105					38.0	0.005	5.0
5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	90					36.0	0.004	4.0
ALUS	A - kerge saviliiv		47.0					35.0	0.012	1.5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastus- moodul Mpa	Vajalik elastus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{srv}	t _{lub}				
			Üldine elastusmoodul			27.8%	195.47	180.00	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0					195.47		
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			29.5%	174.58		
3	Paekillustik (LA235)	25.0					140.38		
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	Nihkepinged	0.0183	0.0213	14.0%	85.39		

5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	Nihkepinged	0.0072	0.0136	47.4%	70.84		
	A - kerge saviliiv		Nihkepinged aluspinnasel	-0.0011	0.0153	106.9%			0.724
	Katendi kogupaksus	100.0					Parandustegur Δ		0.000

Lisa 27. Pärnu-Uulu katendiarvutus tüüp VI (paarisratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline nädiskatend

Koormussagedus: 59.08 normtelge ööp/rajaale
Maantee klass: 6
Teekatendi liik: Püskatend

Tugevustegur: 0.79
Töökindlustegur: 0.75
Normhålbetegur: 1.32

Pinna: D - tolme saviliiv, raske tolme saviliiv, tolme kerge liiv
Niiskuspakkond: 2, niiske
Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0.02
L1.T3 p3+p5; -0,05+0,03=-0.02

Arvutusliku koormuse liik: Veoauto A
Ratta jälje läbimõõt: 37 cm
Erisurve kattede: 0.6 MPa
Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisratas
Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

Lisainfo: Arvutuskoht PK...+...

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast- susmoodul E_{elast}	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks nihele	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks painedele	Arvutatud tõmbe- pinged R_{max}	Lubata- vad tõmbe- pinged R_{lub}	Sise- hõõrde- nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0	2400	1200	3600					
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	1400	800	2200	1.4224	2.4879			
3	Paekillustik (LA235)	25.0	240							
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	105					38.0	0.005	5.0
5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	90					36.0	0.004	4.0
ALUS	D - tolme saviliiv, raske tolme saviliiv, tolme kerge liivsavi	30.2						12.3	0.009	1.5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastus- moodul Mpa	Vajalik elastus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{surv}	t _{lub}				
			Üldine elastusmoodul			31.3%	186.68	180.00	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0					186.68		
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			42.8%	166.66		
3	Paekillustik (LA≥35)	25.0					133.94		
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	Nihkepinged	0.0175	0.0229	23.6%	78.58		

5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	Nihkepinged	0.0060	0.0146	59.0%	59.26	
	D - tolme saviliiv, raske tolme saviliiv, tolme ker		Nihkepinged aluspinnasel	0.0080	0.0124	35.2%		0.818
	Katendi kogupaksus	100.0					Parandustegur Δ	0.020

Lisa 28. Pärnu-Uulu katendarvutus tüüp VI (üksikratas)

KATENDI ARVUTUS - KAP v2.0 Juhendi (2017) näide - 7-kihiline nädiskatend

Koormussagedus: 59.08 normtelge ööp/rajale
Maantee klass: 6
Teekatendi liik: Püskikatend

Tugevustegur: 0.79
Töökindlustegur: 0.75
Normhålbetegur: 1.32

Pinnas: D - tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv: Arvutusliku koormuse liik: Veoauto A
Niiskuspakkond: 2, niiske
Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0.02
L1.T3 p3+p5; -0,05+0,03=-0.02

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm
Erisurve kattele: 0.6 MPa
Koormus: Dünaamiline, 1,00 üksikratas
Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

Lisainfo: Arvutuskoht PK...+...

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast- susmoodul E_{el}	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast- susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbe- pinged R_{max}	Lubata- vad tõmbe- pinged R_{lub}	Sise- hõõrde- nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0	2400	1200	3600					
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	1400	800	2200	1.6734	2.4879			
3	Paekillustik (LA235)	25.0	240							
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	105					38.0	0.005	5.0
5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	90					36.0	0.004	4.0
ALUS	D - tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liivsavi		30.2					12.3	0.009	1.5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus- moodul Mpa	Vajalik elastsus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			31.3%	186.68	180.00	
1	Tihe kuum asfaltbetoon - AC surf; AC bin	4.0					186.68		
2	Kuum poorne asfaltbetoon - AC base	6.0	Asfaltbetooni tõmbepinged			32.7%	166.66		
3	Paekillustik (LA235)	25.0					133.94		
4	Tm_105 [uMSa - ühtlaseterine keskliiv Cu 2...3]	25.0	Nihkepinged	0.0175	0.0229	23.6%	78.58		

5	Tm_90 [uFSa - ühtlaseterine peenliiv Cu 2...3]	40.0	Nihkepinged	0.0060	0.0146	59.0%	59.26		
	D - tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne ker		Nihkepinged aluspinnasel	0.0080	0.0124	35.2%			0.818
	Katendi kogupaksus	100.0					Parandustegur Δ		0.020