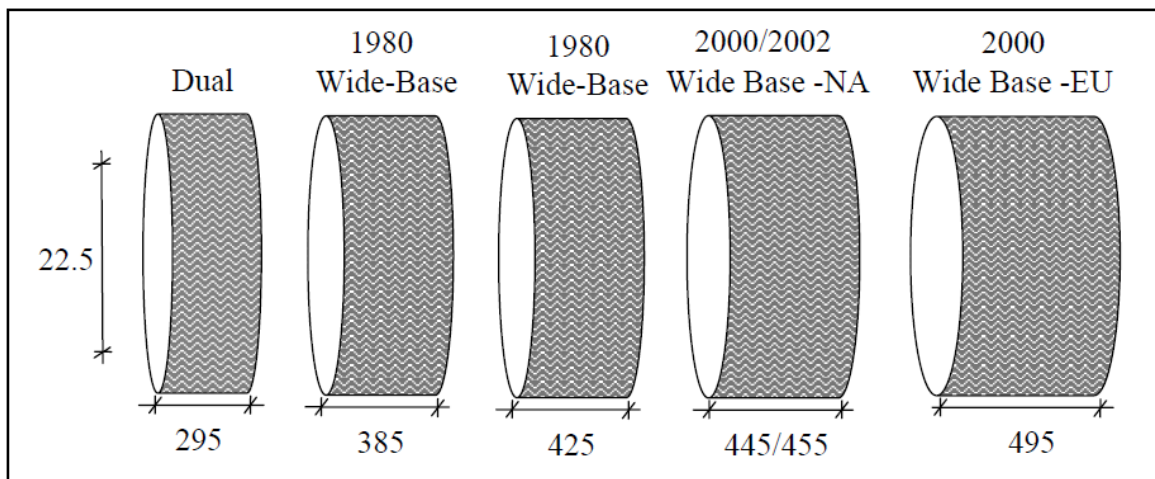




MAANTEEAMET

Elastsete katendite projekteerimisjuhendi 2001-52 täiendamine siirdetegurite osas

nr 2015-8



NA: Designed for North America, EU: Designed for the European Union

Tallinn 2015



MAANTEEAMET

**Elastsete katendite projekteerimisjuhise 2001-52
täiendamine siirdetegurite osas.**

Töö koostaja: Ain Kendra (käsunduslepingu alusel); juhendas: Taavi Tõnts

Tallinn 2015

Juhendi 2001-52 täiendamine siirdeteguri osas

SISUKORD

Lühendid ja terminid.....	5
1 Sissejuhatus.....	6
2 Lähteandmete analüüs (sõidukid, rehvid, liiklus)	9
3 Siirdeteguritest.....	15
3.1 Korkkiala-Tanttu – seos rehvirõhu, koormuse ja jäljediameetri vahel	18
3.2 Feng Wang – rehvirõhu mõju katendile, pinged erinevad jälje piires	21
3.3 Roadex projekti eeluuring rehvitüübi ja rehvisurve mõjudest	23
3.4 Siirdeteguri arvutamine (teiste rataste ja telgede mõju)	26
3.5 Nõutud kandevõime võrdlus (VSN vs ODN).....	27
3.6 Siirdetegurid Vene koolkonnas uuemate normide alusel.....	31
3.7 Siirdetegurid Soomes, Rootsis ja Taanis	32
4 Siirdeteguri arvutusalgoritmid	34
4.1 Vene koolkond	34
4.2 Taani eriveoste arvutus.....	34
4.2.1 Siirdeteguri komponendid	34
4.2.2 Siirdeteguri ja kontaktsurve muutuse võrdlus.....	36
4.3 Siirdetegurid Eestis levinud raskeveokitele	36
4.3.1 Metoodikast	36
4.3.2 Osalise koormuse mõju.....	37
4.3.3 Sooloveokid.....	38
4.3.4 Autorongid	38
4.3.5 Ülekoormuse ja ettenähtust suurema rehvirõhu mõju siirdetegurile.....	38
4.3.6 Erandina lubatud autorongid	39
4.4 Ettepanek	40
4.5 Ettepanekud ja arendusvajadused.....	41
4.5.1 Sõidukiliigituse vastavus loendusandmetele	41
4.5.2 Vajaliku elastsusmooduli arvutusalgoritm ja varutegurite süsteem	42
5 Korrigeeritud siirdetegurite mõju katendi maksumusele.....	43
5.1.1 Arvutuse alused.....	43
5.1.2 Järeldused	44
6 Katendikihtide ehituslike lubatud vigade mõju kandevõimele.....	45

6.1	Ehituslikud ebatäpsused	45
6.2	Kontrollarvutused lubatud hälvete piires	46
	Analüüsi alus – kehtivad nõuded	46
	KAP ja ressursi hindamise põhimõte.....	47
	Kontrollarvutused – lubatud hälved eraldi ja koos	47
6.3	Mitmetimõistetavused projekteerimismõistetes ja juhendites	49
	Kihi laius	49
	Asjakohased nõuded rekonstrueerimisel, filtratsioon ja külmakindlus.....	49
	Kihipaksuste piirväärtused ja nende kehtivusala.....	50
	Veetase kõrgemal kui 125 cm	51
	Alternatiivsed katendid	51
7	Järeldused	52
8	Kasutatud kirjandus	53
	Lisa 1. 2014 liikluse loendusandmete analüüs.....	54
	Lisa 2. Rehvirõhu ja koormuse seos erisurvega – algandmed	55
	Lisa 3. Sõidukite liigiline jaotus	57
	Lisa 4. Siirdetegurid sõidukitele (juhendist 2009-7) Taani süsteemis.....	58
	Lisa 5. Erinevate veokiliikide läbisõit (ESA, aruanne TS52)	60
	Lisa 6. Siirdetegurid tüüpsõidukitele.....	61
	Lisa 7. Siirdeteguri muutuse mõju ehitusmaksumusele	63

LÜHENDID JA TERMINID

VSN – Nõukogude Liidu ehitusnorm, VSN 46-83 – 1983 kehtestatud norm, millele tugineb ka Eestis kehtiv elastsete teekatendite projekteerimisjuhend

ODN – Vene Föderatsiooni teedenorm, ODN 218.046-01 – 2001 kehtestatud norm, mis tugineb vanal „mootoril“, lisatud on rida täiendavaid tegureid mis suurendavad konstruktsiooni tugevusnõudeid ja muudetud on vajaliku kandevõime aluseid siirdudes seniselt viimase (15-nda) aasta koormussageduselt kumulatiivsele koormussagedusele. Samuti on sisse toodud raskemad normteljed (11,5 tonni).

MODN – SRÜ normdokument MODN 2-2001 – ODN praktiliselt identne versioon SRÜ riikidele

TKP – Valgevene normdokument TKP (tehnicheskii kodeks ustanovlennoi praktiki) 45-3.03-112-2008 nagu nimigi ütleb, aastast 2008. Lisatud on uued siirdetegurid ja laiendatud normtelgede valikut (10, 11,5 ja 13 tonni). Samuti on põhjalikumalt käsitletud katendi tööea ja varutegurite seoseid.

SNiP – Vene Föderatsiooni ehitusnorm SP 34.13330.2012 – aktualiseeritud redaktsioon Nõukogude Liidu ehitusnormist SNiP 2.05.02-85

ESAL - Equivalent Single Axle Load – normtelje mõiste, reeglina paarisratastega etteantud rehvirõhuga üksiktelg, mandri-Euroopas üldjuhul 10 tonni, USAs, Austraalias ja Inglismaal 8 tonni.

Super-single – laia veerepinnaga raskesõiduki üksikrehv, rehvi kontaktpinna laius vähemalt 350 mm. Levinud maailmas 1980ndatest, Eestis saavutas laiema leviku käesoleval sajandil. Eestis enamlevinud laius 385 mm.

Wide-single – käesoleval sajandil levima hakanud super-single laiema versioon, laius üle 400 mm (425, 445, 455, 495 mm), mis on ette nähtud reeglina veoteljel paarisratta asendamiseks

KAP – Katendi Arvutamise Programm – Excel rakendus Maanteeameti kodulehel

ARK - Autoregistrikeskus

1 SISSEJUHATUS

Eesmärk

Käesoleva töö eesmärgiks on täiendada kehtivaid autorongide siirdetegureid (kehtiv keskmine 2,0) lisades tegurid a) rehvirõhkude suurenemisest ja b) üksikrehvide (super-single) osakaalu arvestamiseks.

Vastavalt lähteülesandele tuleb

- 1) selgitada välja rehvirõhu mõju siirdetegurile skaalas 0,80-0,85-0,90-0,95-1,00 (eelinfo alusel enamlevinud 0,85 MPa) ja üksikrehvide mõju siirdetegurile (üksikrehvide osakaal raskesõidukite telgedel 10...50%) – tähtaeg: 30.09.2015;
- 2) Majanduslik mõjuanalüüs igale komponendile (I...V kl konstruktsioonide põhjal) ja pakkuda välja optimaalsed tõenäolised tegurid AR keskmise siirdeteguri muutmiseks – tähtaeg: 30.09.2015;
- 3) Muude KAP seonduvate küsimuste lahendamine (KAP varutegurid töövõtjate kontrollimatu kokkuhoiu vastu; konstruktsioonikihtide tegelikest E-moodulitest tulenevad muudatused; kontrollitud drenikiht ja võrgud konstruktsioonis jne) – tähtaeg: 30.10.2015.

Vajadus siirdetegurite korrigeerimiseks on tegelikult ka teiste raskesõidukite puhul, sest sõidukid, mille täismass on üle 10 tonni, kasutavad reeglina kõrgsurverehve. Kuna suurem rehvisurve annab nii võimaluse kasuliku koorma suurendamiseks kui ka selge kütusesäästu, siis on vedajad huvitatud konkreetsetel sõidukil kasutama maksimaalse rehvisurvega rehve, tihtipeale on rehvisurve suurem kui rehvitootja poolt maksimaalsena sätestatu.

- Rehvitüübi jaotuse osas on allikaks ARK andmebaas millest selguvad sõidukitel kasutatavad rehvitüübid (single, dual, super-single)
- Tegelikult rehvirõhu osas on informatsiooni allikaks autovedudega (nii reisi- kui kaubaveod) tegelevad firmad ja raskesõidukitega tegelevad rehvitöökojad
- Rehvitüübile vastavate koormuste ning rehvirõhu soovituslike ja piirväärtuste andmete osas analüüsitakse erinevate rehvitootjate katalooge.
- Rehvirõhu, teljekoormuse ja rehvitüübi mõju kontaktpinge (erisurvele) ja katendi ressursile (tööeale) analüüsitakse erinevate teadustööde alusel.

Tegurid, mis määravad sõidukite mõju katendi ressursile

Teekatendi tööiga sõltub ühelt poolt koormusest ja teiselt poolt katendi materjalide vananemisest. Koormuse mõju võib jagada kaheks – esiteks, katte pinda deformeerivad tegurid ja teiseks, katendi terviklikkust mõjutavad tegurid. Pinna deformatsioone saab kirjeldada roopasügavuse järgi ning siin tuleb eristada erinevaid deformatsiooni liike:

- a) Naastrehvide mõjul toimuv kulumine (talveperioodidel, seotud kiirusrežiimiga)
- b) Konstruktsioonikihtide järeltihenemine (vahetult ehitusjärgne 6 kuud, seotud raskeliiklusega)
- c) Asfaldikihtide plastsed deformatsioonid (eelkõige aladel, kus mõjub staatiline koormus aga ka ristmikeelses pidurdustsoonis, seostatav kõrgemate temperatuuridega aga ka asfaltbetooni kihi puuduliku skeletiga)
- d) Sidumata kihtide deformeerumine koormuse all, mis peegeldub ülakihtides (üldjuhul seostub ebapiisava tugevusega – seda nii aluspinnase ehk muldkeha tugevusnäitajate osas kui ka eriti ülakihtide aladimensioneerimisega)

Katendi terviklikkus muutub koormuse mõjul läbi katendikihtide väsimise. Väsimist iseloomustab korduvkoormuste korduste arv (taandatuna miljonitesse normtelgedesse). Korduvkoormuse arvestuses mõistame koormust, mis on taandatud normtelgedeks. Erineva koormuse taandamisel normtelgedele toimib üldistatuna „neljanda astme reegel“, mille kohaselt normkoormusest väiksem koormus mõjub katendile oluliselt vähem kui pelgalt koormuse suhtarvuga ja suurem koormus oluliselt rohkem. Sõltuvalt katendi tüübist kasutatakse seejuures erinevaid astendajaid.

Materjalide vananemine kehtib eriti bituumensideaine kohta ja see ei sõltu koormusest, vaid sideaine enda omadustest ja seotud kihi asukohast katte pinna suhtes. Bituumeni vananemise põhitegur on päikesekiirgus ja seetõttu vananeb kõige kiiremini katte kulumiskiht (ülemised 1-2 cm). Vananemise tagajärjel muutub bituumen rabedamaks (penetratsioon kahaneb) ja jäigemaks ning kuigi jäigema sideainega kihi deformatsioonikindlus on parem ja deformatsiooni ulatus koormuse all kahaneb, jäävad deformatsioonid mitte enam elastseteks ehk taastuvateks vaid plastseteks ehk taastumatuteks.

Jättes edasise uurimise alt välja naastrehvide mõju sest naastrehve kasutatakse valdavalt sõiduautodel ja see mõju piirdub ainult kulumiskihiga, samuti mitte käsitledes materjali vananemist, mis ei sõltu koormusest, on kõigi teiste tegurite mõju otseselt seotud koormusega.

Koormuse mõju arvestus

Et koormused on erinevate omadustega, tuleb katendite dimensioneerimiseks koormused taandada võrreldavaks. Selleks kasutatakse normtelje mõistet (ESAL), normtelg on reeglina mandri-Euroopa riikides 10-tonnine, USA-s ja mitmel pool mujal kasutatakse ka 8-tonnist normtelge. Koormuse taandamisel normtelgedeks kasutatakse siirdetegureid, mis peaksid taandama erinevate sõidukitüüpide erisused võrreldavale tasemele. Seega vastavalt valitud normtelje koormusele on erinev ka siirdetegurite komplekt. Lihtsustatud lähenemisel leitakse astmefunktsiooniga üksikute telgede mõju ning liidetakse üksikute telgede järgi leitud teljekoormuste kordajad. Astmefunktsiooni astendaja sõltub katendi liigist, Eesti projekteerimisreeglites on võetud astendaja väärtuseks 4,4 (see vastab ka varasemale VSN-käsitlusele), erinevates allikates on kasutatud erinevaid astendaja väärtusi, asfaltbetoonkatendil on see reeglina 4 või 4,4 ja teistel katendi liikidel (kergkatend, siirdekateend) aga ka tsementbetoonkatendil madalam. Põhjalikuma lähendi puhul arvestatakse ka naaberrataste mõjuga nii naaberteljelt kui samalt teljelt.

Koormuse mõju sõltub erisurve (kontaktsurve) – koormuse jagunemisel laiale kontaktpinnale on erisurve väiksem kuigi koormus võib olla sama. Kontaktpinna suurus sõltub rehvisurve – mida suurem on rõhk rehvis, seda väiksem on kontaktpind ja seega suurem kontaktsurve. Samuti sõltub kontaktpinna suurus valitud rehvitüübist – paarisrataste kontaktpind on suurem kui sama rehvirõhu ja koormusega üksikrattal.

Eesti projekteerimisnormides, aga ka kogu Vene koolkonna normides on eeldatud arvutuslikuks rehvisurveks 0,6 MPa ning kuigi tegelikult on, raskeliikluses kasutatavate rehvide puhul, nii rehvitootja poolt soovitatav kui ka maksimaalne rehvisurve väärtus oluliselt suuremad (erinevate rehvitüüpide puhul reeglina 0,72 kuni 0,9 MPa), ei ole normides kasutatavat arvutuslikku väärtust muudetud. Ka teiste riikide puhul on tihti arvutuslikuna deklareeritud rehvisurve väärtus madalam reaalselt kasutatavast kuigi suurem kui meil (0,7 MPa või 0,8 MPa).

Reeglina (ka teistes riikides) eeldatakse, et normtelg on varustatud paarisratastega. Et võtta kaudselt arvesse nii tegeliku rehvisurve kui ka erinevate rehvitüüpide erinevat mõju, tõstetakse arvutusaluseliseks olevat koormussagedust erinevatel viisidel, valdavalt seoses teede funktsionaalse liigitusega (E-teedel enam ja kohalikel teedel vähem) kuna super-single kasutus on suurem teedel,

kus transiitliiklus on suurem. Rootsis ja Taanis on kasutusel lisakoeffitsiendid 1,5 ja 1,7. Võimalik, et ka Vene uuemates normidest toodud „liiklusprognoosi ebatäpsust“ kajastav koeffitsient (kuni 1,49) seondub nii rehvitüübi kui rehvirõhuga – vaatamata sellele on Valgevene rakendanud ka väga kõrged siirdeteguri väärtused – enamlevinud autorongi tüüpi sõidukitel 10-tonnise normtelje jaoks 7,0.

2 LÄHTEANDMETE ANALÜÜS (SÕIDUKID, REHVID, LIIKLUS)

Sõidukite liigitus (ARK andmed 31.12.2014)

Tabel 1. Sõidukite liigitus ja registreeritu jaotus

	Reisijatevedu		Kaubavedu		Haagised	
Registris, sh kanne peatatud	M1 – sõiduauto	652950	N1 – kaubik, <3,5 t	61238	O1 – <0,75 t	58049
	M2 – buss, <5 t	1091	N2 – veok, 3,5...12 t	12787	O2 – 0,75...3,5 t	10552
	M3 – buss, >5 t	3527	N3 – veok, >12 t	22597	O3 – 3,5...10 t	404
					O4 – >10 t	16422
Kokku		657568		96622		85427
Sh aktiivsed	M1	522022	N	75687	O	74265
	M2, M3	3745				

Huvipakkuv on seejuures fakt, et N1G grupis on 01.07.2015 seisuga üle 200 hj mootoriga 19 Dodge RAM 1500 pikapit ja 9 Porsche Cayenne kaubikut.

Avalikes registriaruannetes ei ole välja toodud peatatud registrikandega sõidukeid, need esinevad vaid kande peatamise kuuaruandes.

Metsaveokitena on kirjas N2 grupis 4 vene päritolu sõidukit (Zil 131, Zil 157 ja Ural) ning N3 grupis 731 sõidukit. Nende hulgas on ka peatatud registrikandega sõidukeid.

Analoogiliselt on haagiste jaotuses O4 metsaveohaagiseid 998 sisaldades samuti peatatud kandega sõidukeid.

Registreeritud metsaveohaagised (O4) jagunevad nii haagisetüübi kui telgede arvu järgi alljärgnevalt:

Tabel 2. Metsaveohaagiste jaotus

METSAVEOHAAGISED	Kesktelghaagis		Poolhaagis			Täishaagis			Kokku
Telgede arv	2	3	1	2	3	2	3	4	
Registreeritud haagiste arv	9	3	19	84	128	203	379	173	98

Registreeritud sõidukite ja haagiste osas on analüüsi võimalik teha ka valmistamisaasta alusel – on tõenäoline, et valdavalt on peatatud kandega just vanemad sõidukid.

Rehvitüübid erinevatele sõidukiliikidele

Käesolevas püüame anda ülevaate raskesõidukite (täismass üle 3,5 tonni) rehviliikidest, lubatud koormusest ja rehvirõhust.

Michelini kataloogis jagunevad raskesõidukid:

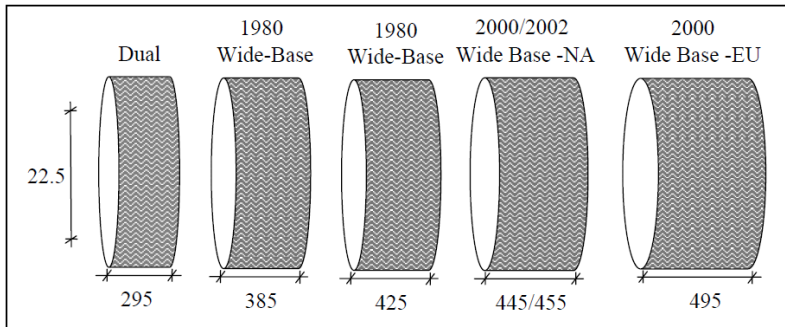
RV – recreational vehicle, motorhome – maksimaalselt lubatud rehvirõhu vahemik sõltuvalt rehvitüübist 550 kPa (R16) või 660...900 kPa (R17,5...R24,5). Igal konkreetsetel rehvitüübil on lubatud koormus sõltuvalt rehvirõhust, näiteks LT215/85R16 üksikrehvil 250 kPa - 695 kg, 550 kPa - 1215 kg ja 315/80R22,5 üksikrehvil 590 kPa – 2910 kg, 900 kPa – 4125 kg.

Commercial light truck – 550 kPa – rattakoormused kuni 3310 kg

Raskeveokid - Michelin kasutab komplektseeritumat liigitust, näidates rehvitüübis ära rehvi kasutusvaldkonna (A-maantee, E-kohalik tee, Y-rasked tingimused, L-off-road, U-linn), rehviomaduse (ENERGY – kütusesäästlik, GRIP – aastaringne, M/S – talverehv jne) ja kasutuskoha (D-veotelg, T-haagis, Z-universaal ja F-juhttelg).

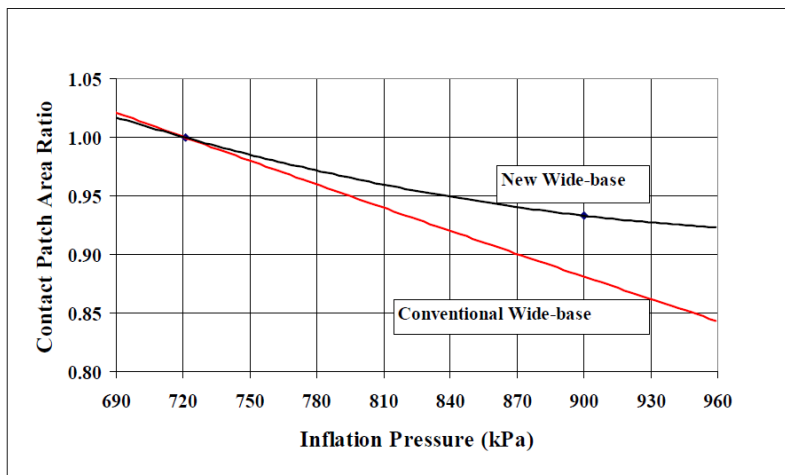
Standardised (tavapärased, conventional) rehvid on üldjuhul laiuses kuni 315 mm ja super-single rehvid 385, 425 ja 445 mm. USAs on lubatud koormus seostatud rehvi laiusel.

Viimase aastakümnega on hakanud levima ka väga laiad rehvid – 445 ja 455 mm laiuses, mis on mõeldud asendama seniseid paarisrataid veotelgedel. Et esimese põlvkonna „supersingle“ rehvitüübile on infrastruktuuri poolne vastuseis, on näiteks Michelin 455 mm rehvidel rehvirõhuks 690 kPa, kuid USAs on need mõeldud tandemtelikule koormusega 151 kN (uuritud 455 mm rehvitüübi eelkäijad olid mõeldud suuremale survele, 790-890 kPa). Koormuse määrang sõltub rehvi laiusel, Gillespie reegli järgi on rehvi kandevõime 11,6 kg/mm. USA normtelg on 8-tonnine (41% 10-tonnisest normteljest).



NA: Designed for North America, EU: Designed for the European Union

Joonis 1. Laia rehvitüübi areng (Figure 3-1; [9])



Joonis 2. 455 mm rehvi kontaktjälje laiuse võrdlus 425 mm rehvi USA veoteljel (Figure 3-2 c, [9])

Paraku on Michelin tellitus uuringus võrreldud ainult rehve, mis on mõeldud paarisrataste asendamiseks veoteljel, mitte veetaval teljel.

Virginia katsestendil kasutati erinevaid asfaltkatte konstruktsioone, kulumiskiht 38 mm, vahekiht 100...244 mm, avatud kõveraga drenikiht 75 mm (asphalt-treated drainage layer, võiks võrrelda väga poorse asfaldiga) ning tsementstabiliseeritud aluskiht 150 mm ja vahekiht 75...150 mm, aluspinnas eristatud geotekstiiliga. Projektis järeldati, et kui paarisratastega telje maksimaalne lubatud koormus on 9 tonni, siis 445 mm super-laial võiks see olla 8 tonni ja uuel 455 mm super-laial 8,5 tonni. Need väärtused kehtivad USA 8-tonnise normtelje tingimustes (analoogiliselt nagu meil on 10-tonnine normtelg ja tegelik koormus paarisratastega lubatud 11,5 tonni).

Eestis on täna enamlevinud just esimese generatsiooni super-single rehvitüüp (385/65R22,5) mille puhul ka tootja nõuab koormusele vastavalt kõrgemat rehvisurve väärtust.

Tabel 3. COST 334-2001 projekti järgi üksik- ja paarissratta mõju sõltuvalt asukohast (Table 3-7; [9])

Axle	Tire Type	W mm	D mm	Primary Roads		Secondary Roads	
				TCF	Wide base vs. dual or single	TCF	Wide base vs. dual or single
Towed	Dual	410	973	1.57		1.43	
	Wide Base Single	328	1049	1.84	+17%	2.82	+97%
Driven	Dual	455	1038	1.04		1.00	
	Wide Base Single	427	1013	1.22	+17%	1.64	+64%
Steering	Single	245	1023	3.25		5.86	
	Wide Base Single	307	1035	2.07	-36%	3.21	-45%

COST projekt (EL) võrdles väga laia rehvispektrit, veetavatele telgedele paarisrattal 205...315 mm, üksikrattal 385...445 mm.

Raskeliikluse osakaal liikluses erinevatel teeliikidel

2014 aasta liiklusloenduse tulemuste alusel on uuritud raskeliikluse jaotust eri teedeliikide ja liiklussageduse lõikes. Raskeliiklus moodustab üle 10% 80% põhimaanteedest, 43% tugimaanteedest ja 23% kõrvalmaanteedest. Samas on 2014 järgi hinnanguline koormussagedus (eeldades VAAB klassi keskmiseks siirdeteguriks 1,0 ja AR keskmiseks 2,0) põhimaanteedel keskmiselt 552 normtelge, tugimaanteedel 107 telge ja kõrvalmaanteedel 7 normtelge enamkoormatud sõidurajale. Piirkoormus 225 normtelge (mille puhul pööratakse tähelepanu staatilisele koormusele) on ületatud põhimaanteedel 1029 km, tugimaanteedel 287 km ja kõrvalmaanteedel 50 km ulatuses. Need kõik statistilised väärtused on arvestatud tänase (2014) liiklussageduse alusel (mitte perspektiivse liiklussageduse alusel nagu projekteerimismid ja juhendid seda ette näevad). Detailsed andmed on esitatud Lisas 1.

Liikluse muutus viimase 10 aastaga ja liiklusprognoos

Projekteerimismidetes sätestatakse liiklusprognoosi kohustus 10=20 meetodil. Käesolevas on analüüsitud liikluse muutusi 2004-2014. Kuna kõigis meetodites eeldatakse kahanevat muudatuse kiirust, erisused on vaid muutuse ulatuses, oleme valinud võrdluseks varasemas projekteerimismidete redaktsioonis (kuni 2012) käsitletud meetodi, mille kohaselt arvestuslik prognoos peaks olema fikseeritud iga-aastase muutusena, 1,5% algaasta tasemest aastas. Võrdluses leitakse tänase liikluse jaotus tee klasside vahel (klassi tasemeks loeme projekteerimismidetes fikseeritud perspektiivse AKÖL taset vastava klassi määramiseks). Esmalt on leitud 2014 vastava teeliigi jaotus (% vastavas teeklassis) ning seejärel leitud 2004 aasta andmetes samale osakaalule vastav liiklussageduste vahemik. Seega on võrdluses lähedase teepikkusega lõigud ja sel teel saadav grupi keskvaartus peaks peegeldama vastava liiklussageduse vahemiku juures keskmist kasvu.

Tabel 4. Liiklussageduse muutus Eesti riigiteedel 10 aastaga

	I (14500+)	II (6000+)	III (3000+)	IV (500+)	V (50+)	VI (0...50)	Keskm.	%/a
--	------------	------------	-------------	-----------	---------	-------------	--------	-----

Põhimnt	1,173	1,299	1,306	1,288			1,289	4,54%
Tugimnt		1,140	1,083	1,111	1,210		1,114	1,14%
Kõrvalmnt	1,131	1,052	1,175	1,088	0,923	2,108	0,954	-0,47%

Järeldused:

- a) Intensiivse liiklussagedusega põhimaanteedel (I klass) ei kasva liiklus enam nii kiiresti kui madalamate klasside intensiivsusega põhimaanteedel, kuid keskmine tõusutempo on olnud oluliselt kiirem võrreldes varasemate prognoosidega ja ka võrreldes baasprognoosis eeldatava kasvuga – keskmine tõus 10 aastaga 1,289 mis vastab algtõusule 4,54% aastas (fikseeritud tõus esimese aasta liiklussagedusest igal aastal – pidevalt kahanev protsent eelneva aasta suhtes);
- b) Tugimaanteedel liikluse kasv on olnud suhteliselt ühtlane – tõus 10 aastaga 1,114 korda ehk algtõus 1,145%;
- c) Kõrvalmaanteedel liiklussagedused on mõõdukalt tõusnud liiklussagedustel üle 500 AKÖL, mõnevõrra koguni langenud vahemikus 50...500 AKÖL ning kahekordistunud kuni 50 AKÖL klassis. See viimane on küll veidi üllatav, tegemist on liiklussagedustega mis viitavad tee kuuluvuse mittevastavusele, tõenäoliselt peaks alla 50 a/ööp liiklussagedusega teed (VI klass) kuuluma KOVile, mitte riigile (16,7% kõrvalmaanteedel pikkusest e 2035 km).

Raskeliikluse muutusi vähemalt 10-aastases aegruumis on täna võimalik analüüsida vaid põhi- ja tugimaanteedel, sest 2004 andmetes on info sõidukite liigilise jaotuse kohta kõrvalmaanteedel vaid 10% osas mis on ilmselt ebapiisav järelduste tegemiseks.

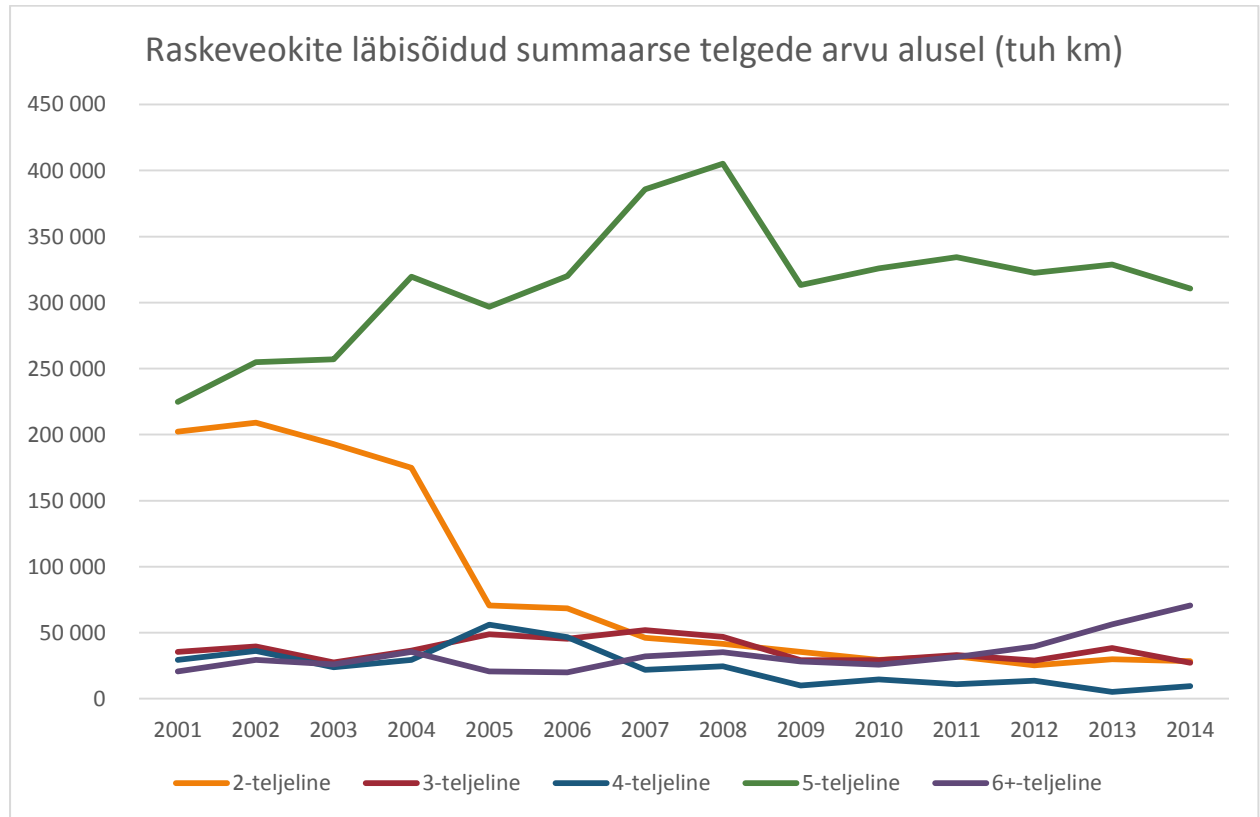
Liiklusprognoosi kohta on nende andmete alusel võimalik teha järeldusi:

- 1) Projekteerimisnormides fikseeritud meetod
 - a. meetod ei pruugi anda adekvaatseid tulemusi, seda eriti suuremate linnade läheduses.
 - b. on ette nähtud tee klassi määramiseks ja ei kajasta sõidukite struktuuri muutust ning seetõttu ei sobi koormusprognoosi koostamiseks.
 - c. Võib toimida adekvaatselt stabiilse majanduse tingimustes, kuid annab ebanormaalsed prognoosid olukorras, kus 10-aastase perioodi algus või lõpp erinevad oluliselt pikaajalisest trendist (buum, masu). Seetõttu tuleb meetod asendada enne, kui prognoosi baasperiood langeb ekstreemsele ajale (buum 2005-2007; masu 2008-2010, tuginedes RM statistikale [14]).
- 2) Baasprognoosi meetod
 - a. Vajalik on senisest oluliselt suurem diferentseerimine, eriti põhimaanteedel
 - b. Detailsem analüüs on vajalik et täpsustada baasprognoosi jaotust maakondade vahel (tõenäoliselt on erisused oluliselt suuremad kui senises juhendis).
 - c. Kuna baasprognoosi alusteks olnud autostumise prognoos ja rahvastikuprognoos on viimase 8 aastaga muutunud, on otstarbekas prognoos uuendada. Prognoosi vajalikkus on ühene ja seondub asjaoluga, et projekteerimisnormides sisalduv käsitlus kehtib vaid tee klassi määramiseks.

Raskeliikluse olem ja struktuurne muutus (Statistika)

Raskeveokite jagunemine telgede arvu järgi on oluliselt muutunud. Statistikaameti andmetel (aruanne TS-52) saab võrrelda aegruumi alates aastast 2001 (vt Lisa). Ülevaade eristab haagiseta

veokid (2, 3, 4 ja enamateljelised), täishaagisega veokid (2-3 telge veokil, 1-4 telge või enam telge haagisel) ja poolhaagisega veokid (2-3 telge veokil, 1-4 või enam telge haagisel). Paraku tugineb läbisõidu info valikulisele aruandlusele ja sisaldab nii Eestis kui Eestist väljaspool teostatud sõidud. Info välisvedajate poolt Eestis teostatud vedude kohta puudub. Rehvitüübi erisusi Statistikaameti aruandlus ei kajasta.



Joonis 3. Raskeveokite läbisõidu muutus telgede arvu järgi 2001-2014

Graafikult nähtub, et võrreldes 2001 aastaga on kasvanud läbisõit 5- ja enamateljelistel kooslustel, kõigil teistel on see kahanenud ja eriti tugevalt 2-teljelistel veoautodel. Selle taga on sõidukipargi ja turu muutused. Graafiku absoluutväärtustest on selgelt näha buum 2008 ja sellele järgnenud MaSu periood, millest sektor ei ole veel täielikult taastunud.

Autoregistri andmete analüüs

Autoregister fikseerib veokite ja vedukite iga-aastaselt ülevaatusel läbisõidu ning kontrollib haagiste ja poolhaagiste vastavust nõuetele. Haagiste läbisõidu osas otsest infot ei ole võimalik leida. Register on 2014 puhastatud, seega on võimalik päringuga (aktiivregistrist) saada valim sõidukitest, millised on läbinud ülevaatusel ja omavad kindlustust. Nii veokite kui haagiste osas on registrikaardil fikseeritud täismassid, telgede arvud, teljekoormused, telgede vahekaugused ja iga telje kohta lubatud rehvitüübid. Teljekoormuste summa on üldjuhul suurem kui lubatud täismass. Reeglina on võimalik lubatud rehvitüübid selgelt liigitada konkreetse klassi – tava üksikrehv, tava paarisrehv ja lai üksikrehv. Laiaks loeme antud kontekstis rehvilaiused alates 385 mm-st. Täna päeval tuleks eristada ka veel väga laiad rehvid (445 mm), mida kasutatakse paarisrattaste asendamiseks veoteljel ja mille mõju katendile on lähedane paarisrattaga. Regrist on seega võimalik saada ülevaadet vastavat liiki sõidukite ja erinevate haagiste arvu kohta, kuid läbisõidu info on ainult vedukitelt. Otstarbekas on analüüsida vaid aktiivregistri hetkeseisu, kuna aegreala mõistes võib olla probleeme tulemuste võrreldavusega.

Raskeveokite haagised jagunevad täismassi alusel, O3 liiki haagise täismass on üle 3,5 tonni kuid mitte üle 10 tonni, O4 liiki haagise täismass on vähemalt 10 tonni. Aktiivregistris on 14575 haagist, millest 207 on kergemas ehk O3 grupis ja 14368 raskemas ehk O4 grupis.

Tabel 5. Aktiivregistris olevad haagised telgede arvu järgi

	keskstelghaagised			poolhaagised								täishaagised			Kokku
Telgede arv	1	2	3	1	2	3	4	5	6	8	2	3	4		
O3 (<10 t)	44	66	2	37	3	1					54			207	
O4 (>10 t)	7	930	25	63	514	11383	51	9	5	2	588	566	223	14369	
Tuh.km		10349	448		7464	354396					6671	9391		388719	
Arv	1074			12068								1431			14576
	7,40%			82,80%								9,80%			

* Statistika ei erista keskstelghaagiseid ja täishaagiseid, käesolevas võrdluses on eeldatud proportsionaalset võrdset läbisõitu.

Kokku statistikaameti andmetel 2014 veokite läbisõit 456 226 tuh km, sellest haagistega vähemalt 388 710 tuh km. Läbisõidu andmed ei ole katvad nii seetõttu, et statistika aruandlus on küsitluspõhine kui ka seetõttu, et tervikust väga väikese osa moodustavaid andmeid ei avaldata.

Tabel 6. Aktiivregistris olevad haagised, millel võib esineda super-single rehvi 385 mm laiusega

	keskstelghaagised			Poolhaagised								täishaagised			Kokku
Telgede arv	1	2	3	1	2	3	4	5	6	8	2	3	4		
O3 (<10 t)	1													1	
O4 (>10 t)		186	9		110	10627	4				197	79		11212	
SS-rehvida %	2,0	18,7	33,3	0	21,3	93,4	7,8	0	0	0	30,7	14,0	0		
Läbisõit tuh. km		1933	149		1588	330830					2047	1311		337858	
Arv	196			10741								276			11213
SS-rehvida %	18,2%			89,0%								19,3%			76,9%

Eeldame, et kui haagise passis on sees 385 mm laiusega rehvi kasutus, on tegemist üksikrehvidele ettenähtud teljega ja ilma ümberehituseta sellisel teljel paarisrehvi kasutada ei saa. Seega 3-teljelistest poolhaagistest on 93,4% super-single rehvidega.

Tõenäoline super-single rehvidega autorongide läbisõit on 338 miljonit kilomeetrit ja see moodustab 87% autorongide läbisõidust ning kokku raskeveokite läbisõidust 74%.

Statistilises tulemus on siiski üks reservatsioon – üksikutel sõidukitel esineb kombineeritud rehvitüübi valik, kus ühel teljel kasutatakse paarisrehve ja teisel teljel super-single tüüpi rehve. Selliseid juhtumeid esineb andmebaasis alla 10. Paarisrehvidega kombineeritakse küll üksikrehve (tavaliselt 315 mm).

3 SIIRDETEGURITEST

Lühiülevaade ajaloost

ESAL – Equivalent Single Axle Load – US normtelg 80 kN = 18,000 lb. Tabelis 7 on toodud siirdetegurid 8-tonnisele üksiteljele ja kaheteljelisele telikule.

AASHTO (hiljem AASHO) siirdetegurid tulenevad katsepolügoonil (Ottawa, Illinois) 1950ndatel militaarveokitega tehtud katsetel korduvkoormuse mõjust katendi vastupidavusele. Hilisematel aastatel on siirdetegureid täiendatud erinevate koormuste mõju osas.

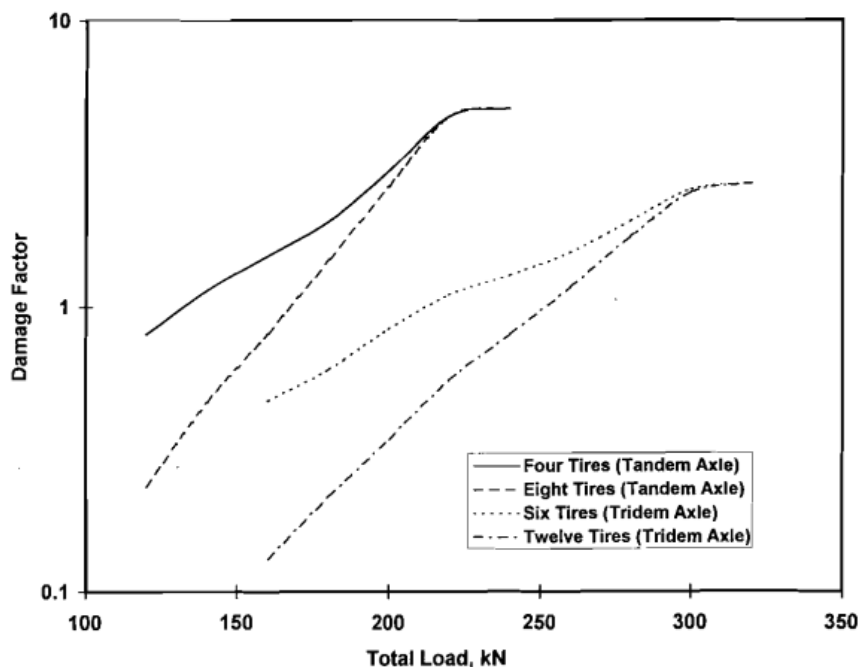
Tabel 7. Tüüpilised siirdetegurid AASHTO järgi

Axle Type (lbs)	Axle Load		Load Equivalency Factor (from AASHTO, 1993)	
	(kN)	(lbs)	Flexible	Rigid
Single axle	8.9	2,000	0.0003	0.0002
	44.5	10,000	0.118	0.082
	62.3	14,000	0.399	0.341
	80.0	18,000	1.000	1.000
	89.0	20,000	1.4	1.57
	133.4	30,000	7.9	8.28
Tandem axle	8.9	2,000	0.0001	0.0001
	44.5	10,000	0.011	0.013
	62.3	14,000	0.042	0.048
	80.0	18,000	0.109	0.133
	89.0	20,000	0.162	0.206
	133.4	30,000	0.703	1.14
	151.2	34,000	1.11	1.92
	177.9	40,000	2.06	3.74
	222.4	50,000	5.03	9.07

Siirdetegur sõltub katte tüübist. AASHTO kasutas jäikadele (betoon)katenditele teistsuguseid tegureid kui elastsetele katenditele. Austraalia andmetel tuleks siirdeteguri mõttes eristada koguni nelja erinevat tüüpi katendeid:

- Kruusatee
- Õhuke asfalt
- Paksem asfalt
- Betoon

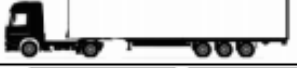
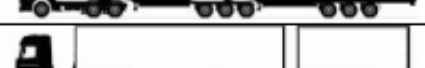
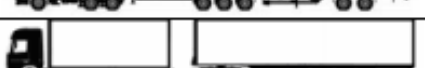
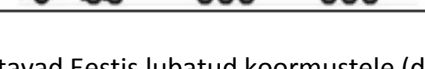
Oluline erisus ilmneb USA graafikul paarisratta ja üksikratta kasutusel, võrreldes teliku koormust.



Joonis 4. Üksik- ja paarisratta mõju 2- ja 3-teljelistel telikutel katendi ressursile (logaritmiline skaala)

Projekt TREN/G3/318/2007 uuris enamlevinud sadulrongiga (edaspidi käsitletud 2S3H – kaheteljeline sadulveok kolmeteljelise poolhaagisega; lubatud täismass 40 tonni; projekti viites tüüp A40) võrreldes samaväärsete ja suuremate koormuste mõju katendile.

Tabel 8. Projekti TREN järgi erinevate veokite võrdlus mõju järgi katendile (Figure 2;[1])

Code	Shape		Pavement	Bridges	
				Extreme loads	Fatigue
A40 (current vehicles)			1		
A44			2.39		
A48			>2.39		
B40			1.22		
B44			1.92		
B48			>1.92		
C40			1.02		
C44			1.42		
C48			1.85		
D46			1.04		
E50			0.55		
F50			0.53		
G50			0.42		
E60			2.05		
F60			2.07		
G60			1.46		

Tabelis 8 toodust vastavad Eestis lubatud koormustele (detailsem ülevaade vt: Lisa 3. Sõidukite liigiline jaotus) - A40, A44 (ISO merekonteinerite veol), B40, C40 ja C44. Uuringu tulemustest nähtub, et põhimõtteliselt on suuremad koormused võimalikud täiendavate telgede lisamisel ja antud valimis kirjeldatust (meil lubatud koormustel) on enamkahjulikud teekonstruktsioonile A44 (2,39*A40), C44 (1,42*A40), B40 (1,22*A40) ning C40 (1,02*A40).

Võrreldud katendid COST 333 ja COST 323 projektides (neli erinevat asfaltkatet, viimasel juhul asfaldist ülakiht tsementstabiliseeritud alusel – Eesti tingimustes võib kindel olla, et enamlevinud riigiteede katend on veelgi õhem kui siin nõrgana esitatud, samuti et tugevat varianti /33 cm asfalti/ Eestis praktiliselt pole, ka kõigi uute teede katendid jäävad allapoole 20 cm piiri) on esitatud tabelina:

Tabel 9. TREN projektis võrreldud katendite parameetrid (Table 37; [1])

Traffic intensity	Weak	Moderate	Heavy	Heavy
Asphalt thickness (mm)	100	200	330	280
Asphalt Young's modulus (MPa)	7 500			
Asphalt Poisson's ratio	0.4			
Granular layer thickness (mm)	300	250	200	-
Young's modulus of granular material (MPa)	200			
Granular layer Poisson's ratio	0.3			
Cement bound base layer thickness (mm)	-			200
Cement bound base Young's modulus (MPa)				10 000
Cement bound base Poisson's ratio				0.2
Subbase Young's modulus (MPa)	70			
Subbase Poisson's ratio	0.3			

Arvestatud on veoteljel 11,5 t; üksikeljel 10,0 t; veoki tandemtelikul 19 t; haagise tandemtelikul 18 t; haagise tridemtelikul 24 t ning piirang juhttelgede koormusele mis ei tohi olla vähem kui 25% veduki või veoki (koos haagistega) täismassist (nõuded tulenevad otseselt direktiivist 96/53/CE). Siit tulenevalt ei tohiks lubada kasutada ühe juhtteljega veokeid, mille täismass on üle 40 tonni. A44 on erand kuna järgides tridem-teliku piiri 24 t, veotelje piiri 11,5 t, siis jääb 8,5 t esiteljele kuid tootjad on esitelje koormuse piiranud 8 tonniga.

Projekt võttis aluseks 8-tonnise normtelje korduvkoormustena vastavalt 5 miljonit, 10 miljonit ja 100 miljonit normtelge (100 miljonit vastab nii paksemale asfaltkattele kui stabiliseeritud alusel kattele).

Veoki laadimise skeem (teljekoormuste tegelikud erisused lubatud teljekoormuste ja täismassi piires) mõjutab tugevalt võrdlustulemusi.

Tabel 10. Erineva koormusjaotusega veokite suhteline mõju erinevatele katenditele võrreldes A40 veokiga (Table 39; [1])

Code	Flexible pavement		Bituminous pavement		Thick bituminous		Semi-flexible pavement	
	Best	Worst	Best	Worst	Best	Worst	Best	Worst
A40	1	1,07	1	1,18	1	1,23	1	2,43
A44	1,53	1,63	1,59	1,67	1,53	1,68	2,85	4,28
B44	1,54	1,57	1,6	1,61	1,36	1,4	2,44	2,83
C40	0,62	0,99	0,56	1,07	0,57	1,08	0,31	2,33
C44	1,03	1,27	0,89	1,23	0,86	1,21	1,6	2,37
C48	1,37	1,51	1,25	1,42	1,21	1,48	2,04	3,15
D46	0,84	1,22	0,69	1,2	0,65	1,22	0,51	1,88
E50	0,67	1,04	0,67	0,86	0,59	0,72	0,2	0,47
F50	0,6	0,83	0,63	0,8	0,58	0,71	0,2	0,43
G50	0,42	0,79	0,37	0,79	0,35	0,71	0,04	0,43
E60	1,51	2,03	1,39	1,86	1,33	1,66	2,05	3,56
F60	1,38	1,69	1,59	1,74	1,49	1,6	2,47	3,17

Analüüsis on toodud välja ideaalne kaalujaotus igale sõidukile, eraldi igale erinevale katendigrupile. Erinevused on olulised ja parim kaalujaotus õhukesele katendile ei ole identne parima jaotusega sama täismassiga sama veoki kuid teise katenditüübi korral. Analüüsis kasutatud keskväärtused on leitud, eeldades, et teedevõrgust 5% on õhukese katendiga, 15% mõõduka paksusega asfalt ning 40% nii paksu asfaltkattega kui ka stabiliseeritud alusega kattega. Keskmise selline jaotus ei ole üldse iseloomulik Eesti teedele, meie riigiteede jaotus on pigem vastupidine.

Mõju järgi infrastruktuurile on uuringu teostajad teinud mõtlemapanevaid järeldusi. A44 – viieteljeline veok (2S3H) tuleks täielikult keelata ning ei soovitata rajada valitud poolelastseid konstruktsioone (20 cm TS ja 8 cm AC).

Kokkuvõtteks on jõutud järeldusele et mistahes võrreldud muudatuse stsenaarium (suurem täismass ja pikemad sõidukid) nõuab suuremaid investeeringuid infrastruktuuri, kuigi tervikliku mõju osas on olemas positiivsed stsenaariumid (kasud võivad üle kaaluda võimalikud lisakulutused). Juhin siiski tähelepanu asjaolule, et toodud järeldus kehtib teedevõrgu eeldatud struktuuri korral, mis ei ole Eestile iseloomulik. Kõige positiivsemaks lahendiks võiks olla EMS (25,25 m) pikkusel 50 või 52 tonnine täismass. Lubatud pikkuse osas peab otsus olema ühekordne, täismassi piirangut võib muuta järkjärgult.

Kaalujaotuse mõju sõiduki agressiivsusele katendi suhtes, tegelikult siirdetegurile, on uurinud DeCeuster (2008) Euroopa Komisjoni tellimisel ning jõudnud järeldusele, et kaalujaotusest tulenev erinevus sama täismassi ja teljepiirangute raames võib olla kuni neljakordne ([2] lk 66). Betoonkatend töötab väga hästi korduvkoormustele, kuid on üsna tundlik ülekoormusele.

3.1 KORKKIALA-TANTTU – SEOS REHVIRÕHU, KOORMUSE JA JÄLJEDIAMEETRI VAHEL

Rehvisurve ja koormuse mõju rehvi poolt katendile avaldatavale survele (kontaktpinna muutused) erinevatel rehvitüüpidel on analüüsinud Leena Korkkiala-Tanttu oma doktoritöös ([3]). Võrreldud on paarisratta ja supersingle kontaktjälge erinevate rehvisurve ja rattakoormuste korral (Appendix A, Appendix B – mis on käesolevas töös esitatud

Lisa 2. Rehvirõhu ja koormuse seos erisurvega – algandmed).

Võrdluses on rattajälje diameeter arvatud mõõdetud pindalast valemist $S = \pi \cdot R^2$ tuletatuna, $R = \sqrt{S/\pi}$ ehk $D = 2 \cdot \sqrt{S/\pi}$. Rattajälje diameetri arvutuseks on erinevates normdokumentides kasutatud veidi erinevaid valemeid:

- 2001-52 valem (10.1) – $d = \sqrt{16,6 \cdot P/p}$, kus P on rattakoormus kN ja p rehvirõhk MPa;
- VSN valem (3) – $D = \sqrt{4 \cdot Q/(\pi \cdot p)}$; kus Q on rattakoormus kN ja p rehvirõhk MPa;
- ODN ja MODN valem (3.4) – $D = \sqrt{40 \cdot Q/(\pi \cdot p)}$; kus Q on rattakoormus kN ja p rehvirõhk MPa;
- TKP valem (6.1) – $D = \sqrt{40/(\pi \cdot p)} \cdot 0,01$; kus Q on rattakoormus kN ja p rehvirõhk MPa.

Rehvi jälje suuruse arvutamisel eeldatakse et rattakoormuses on arvestatud dünaamikategurit, mis staatilise koormuse puhul on 1,0 ja liikuvkoormusel kokkuleppeliselt 1,3. Dünaamikategur sõltub oluliselt kiirusest, aga ka konkreetse tee tasasusest ja sõiduki vedrustuse omadustest. Sõltumatult valemite erisusest, on kõigis nimetatud dokumentides 10-tonnise paarisratta jäljeks staatilisel koormusel arvestatud 33 cm ja dünaamilisel koormusel 37 cm.

Võrreldes eeltoodud valemeid, tuleb ODN ja TKP valemeid lugeda identseks. Paarisratta keskmiseks jäljediameetriks (mõõdetud, üle uuritud ala) tuleb lugeda 31,8 cm kui ODN järgi arvutatu keskmine on 31,6 ja 2001-52 järgi 36,4 cm. Järelikult kajastab ODN valem katse käigus fikseeritud näite kõige täpsemalt ja juhendis 2001-52 esitatud valem on ebatäpsem.

Algandmed (koos arvatatud jälje diameetriga) võib seega esitada tabelikujul:

Tabel 11. Rehvi kontaktjalg S ja erisurve paarisrattal ja super-single rattal erinevatel koormustel Q .

p kPa	Paarisrattad					Supersingle				
	Q kN	S cm ²	kPa	D cm	D (ODN)	Q kN	S cm ²	kPa	D cm	D (ODN)
500	30,20	767,5	393,5	27,70	27,73	31,01	652,4	475,3	25,54	28,10
500	40,10	901,5	444,8	30,02	31,96	40,34	814,4	495,3	28,54	32,05
500	50,59	1066,7	474,3	32,66	35,89	50,79	941,4	539,5	30,68	35,96
500	60,88	1177,0	517,2	34,31	39,37	61,16	1064,3	574,6	32,62	39,46
500	70,97	1282,5	553,4	35,81	42,51	70,90	1141,1	621,3	33,78	42,49
500	81,90	1445,7	566,5	38,02	45,67					
600	30,33	736,8	411,6	27,14	25,37	31,00	594,9	521,1	24,39	25,65
600	40,47	816,0	496,0	28,57	29,31	40,44	730,6	553,5	27,03	29,29
600	50,92	969,4	525,3	31,14	32,87	51,01	855,7	596,1	29,25	32,90
600	60,15	1077,2	558,4	32,82	35,73	61,19	954,3	641,2	30,89	36,03
600	71,05	1176,8	603,8	34,30	38,83	71,31	1073,4	664,3	32,76	38,90
600	82,00	1322,3	620,1	36,36	41,71	80,00	1171,6	682,8	34,23	41,20
700	30,25	627,1	482,4	25,04	23,46	31,01	543,3	570,7	23,31	23,75
700	40,59	763,5	531,6	27,63	27,17	39,90	667,4	597,8	25,83	26,94
700	50,41	873,1	577,4	29,55	30,28	51,17	778,2	657,5	27,90	30,51
700	61,19	1013,1	604,0	31,83	33,36	60,94	883,3	689,9	29,72	33,29
700	70,94	1125,4	630,4	33,55	35,92	71,15	977,5	727,9	31,26	35,97
700	81,20	1267,4	640,7	35,60	38,43	81,80	1081,1	756,6	32,88	38,57
800	30,26	594,0	509,4	24,37	21,95	31,01	520,3	596	22,81	22,22
800	40,15	737,6	544,3	27,16	25,28	40,08	625,9	640,4	25,02	25,26
800	50,93	849,6	599,5	29,15	28,47	49,99	707,6	706,5	26,60	28,21
800	60,15	961,4	625,7	31,01	30,94	60,85	825,1	737,5	28,72	31,12
800	70,56	1049,8	672,1	32,40	33,51	70,91	889,1	797,6	29,82	33,59
800	80,00	1207,2	662,7	34,74	35,68	82,10	1019,5	805,3	31,93	36,15
900	30,26	605,1	500,1	24,60	20,69	30,98	511,2	606	22,61	20,94
900	40,30	734,6	548,6	27,10	23,88	39,88	581,2	686,2	24,11	23,75
900	50,73	861,4	588,9	29,35	26,79	50,79	715,3	710,1	26,75	26,81
900	60,86	957,3	635,7	30,94	29,34	60,90	809,2	752,6	28,45	29,35
900	71,08	1040,6	683,1	32,26	31,71	71,12	869,2	818,2	29,48	31,72
900	80,00	1166,0	686,1	34,15	33,64	82,00	990,6	827,8	31,47	34,06

Märkus: Tabelis 11 on kollasega eristatud 10-tonnise paarisratta kontaktsurve väärtus ja lähedase kontaktsurve väärtus super-single rehvi puhul.

Siit nähtub, et mõõdetud jälje pindalast arvatatud jälje diameeter ei vasta siiski normitekstis esitatud valemi tulemustega. Esmane analüüs näitab, et:

- 1) 10-tonnise paarisrattastega telje surve katendile on samaväärne 6-tonnise super-single teljega
- 2) Võrdluses ilmneb, et keskmiselt (rehvirõhud vahemikus 0,5...0,9 MPa ja koormused 30...80 kN) on jälje diameeter sama rehvirõhu ja koormuse juures paarisrattal 3 cm

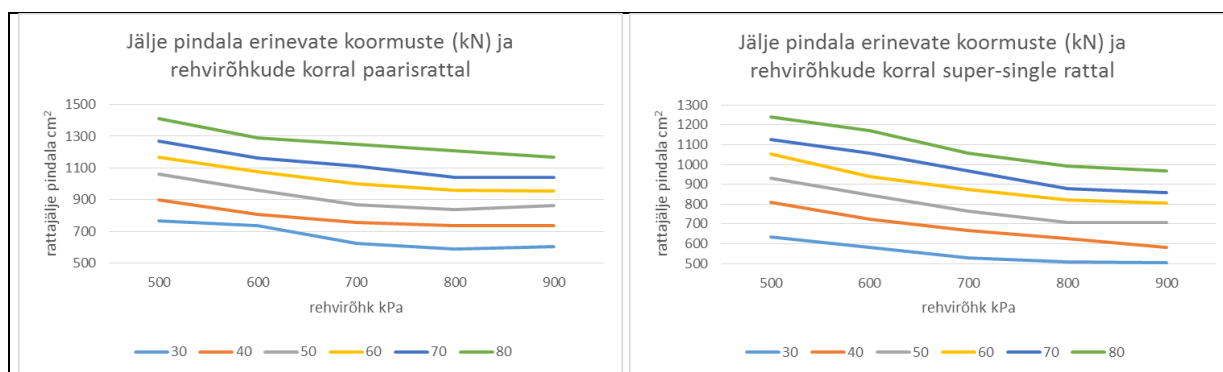
suurem kui super-single üksikrattal ning vastavalt paarisratta erisurve 17% väiksem kui super-single üksikrattal.

Kuna valemites esinevad muutujatena Q ja p alati suhtes (Q/p), siis püüame leida funktsionaalset seost jäljesuuruse ja Q/p suhte vahel.

Esmane analüüs pakub funktsionaalset seost – jälje pindala $S = 4192,2 \cdot (Q/p)^{0,5804}$ paarisratastele ja $S = 4141,4 \cdot (Q/p)^{0,634}$ super-single ratastele. Normitekstis toodud valemi järgi peaks olema tegemist puhta ruutjuurega (astendaja 0,5).

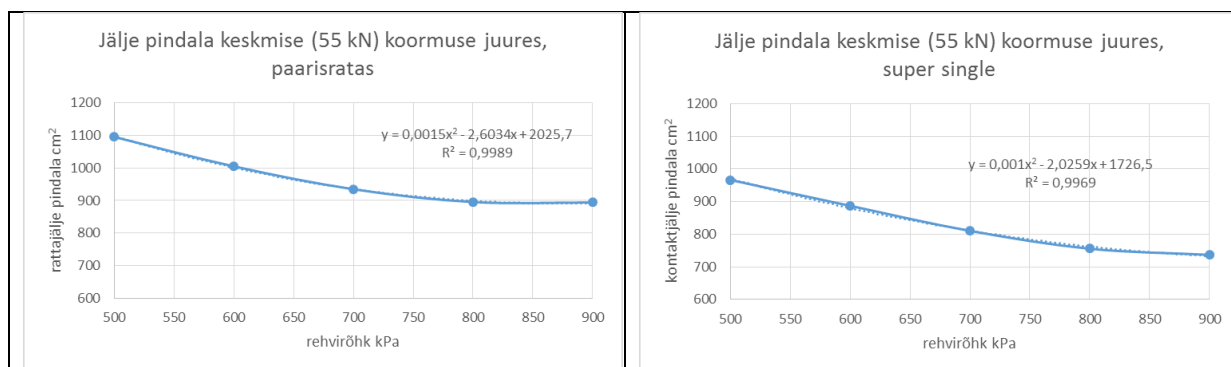
Siit tulenevalt tasub edaspidi ka otsida, kas on uuritud kontaktjälje suuruse seoseid rehvirõhu ja koormusega mitte lihtsalt erinevatel rehvitüüpidel, vaid konkreetsemalt sõltuvuses rehvi mõõdust (sest super-single ei ole vaid 385 mm laiune).

Esmalt interpoleerime rehvi jälje pindala väärtused täistonnilistele koormustele (mõõtmistel on kasutatud küll täistonnile lähedasi, kuid mitte täpseid väärtusi) ja täiendame super-single osas tabelit 11 500 kPa ja 80 kN väärtusega (mis algses, lisas esitatud andmestus puudus, et järgnevat arvutust mitte kallutada).



Joonis 5. Kontaktjälje pindala seos rehvirõhu ja koormusega

Seejärel leiame keskmise jäljesuuruse (üle kõigi koormuste), mis võiks peegeldada jäljesuurust 55 kN koormusel (keskmine vahemikust 30...80 kN) erinevate rehvirõhkude juures ja leiame sellele vastava ruutvõrrandi (nagu näha, on sellel väga kõrge korrelatsioonikordaja).



Joonis 6. Kontaktjälje pindala seos rehvirõhuga keskmisel koormusel

Kuna graafiliselt on erinevate koormuste korral seosed väga lähedased, vaid nihkes, ning mõõtmistulemuste rida pole kõige ühtlasem, oletame seose koormuse muutuse ja jälje pindala muutuse vahel (suhtes 55 kN koormusele leitud valemile) lineaarse ning täpsustame rehvirõhust tuleneva muudatuse kordajad vähimruutude meetodil.

Tulemusena saame kaks valemit (S – jälje pindala cm^2 ; p – rehvirõhk kPa; Q – ratta koormus kN):

- Paarisratastele, $S=0,0015p^2-2,6034p+2025,7-(55,28-Q)*11,81$
- Super-single ratastele, $S=0,001p^2-2,0259p+1726,5-(57,3-Q)*10,47$

Selle järgi

Tabel 12. Kontaktjalg ja erisurve valitud koormuste ja rehvisurve korral (staatiline koormus)

Rehvi tüüp	Dual				Super-single			
	Rehvirõhk 600 kPa		Rehvirõhk 850 kPa		Rehvirõhk 600 kPa		Rehvirõhk 850 kPa	
Ratta koormus	Jälg cm ²	erisurve kPa	Jälg cm ²	erisurve kPa	Jälg cm ²	erisurve kPa	Jälg cm ²	erisurve kPa
30 kN	705	425	598	502	585	513	441	680
40 kN	823	486	716	559	690	580	546	733
50 kN	941	531	834	599	794	629	651	769
57,5 kN	1030	558	923	623	873	659	729	789
60 kN	1059	566	952	630	899	667	755	794
65 kN	1118	581	1011	643	952	683	808	805
70 kN	1178	594	1070	654	1004	697	860	814
80 kN	1296	617	1189	673	1108	722	965	829

Võrreldes esmalt koondnäitajate baasilt otsitud astmefunktsiooni tulemust (ruutjuur sama rehvirõhu ja koormuse kohta arvatatu ja mõõdetu vahede ruutude summast), on selge et lihtne astmefunktsioon on oluliselt ebatäpsem – ruuthälve 303 cm² kui kombineeritud valemi ruuthälve on 99 cm².

Võrreldes tabelis 12 toodud lubatud veotelje erisurvet 850 kPa rehvirõhu juures SS-rehvi erisurvega samal rehvirõhul, selgub et 11,5-tonnise paarisratastega veoteljega võrdne mõju (ca 620 kPa) on 4-tonnise koormusega SS-rehvidega teljel ning 6-tonnise koormusega SS-rehvidega telje mõju katendile võrdub 16-tonnise paarisratastega telje mõjuga (ca 680 kPa).

Katendite kontrollarvutuse katsed (KAP algoritmid) näitavad, et muutes rehvirõhku ja jättes kõik muud parameetrid samaks, tõuseb identse konstruktsiooni arvutuslik kandevõime koos rehvirõhuga. Et asi ei ole loogiline, on kõigis sama koolkonna süsteemides (VSN ja selle derivaadid 2001-52, ODN, MODN ja TKP) piiratud rehvirõhuga 0,6 MPa ja muudetud siirdetegureid (tõstetud koormussagedust) või lisatud uusi täiendavaid tegureid võrdluses lubatud pingetega. Teoreetiliselt võiks olla võimalik valemite ka rehvirõhku muuta, kuid sellega kaasnevalt tuleb muuta ka algoritme, mis määravad katendi dimensioneerimise kontrollarvutustes normatiivse piirväärtuse erinevatele pingetele. Maano Koppeli hinnangul tuleks arvutustes, mis sisaldavad rehvirõhku, piirväärtust (näiteks, nõutava kandevõime väärtust) tõsta rehvisurve erisuse suhtarvuga – vastavalt siis 0,85 korral oleks see 1,42. Siit tulenevalt ei ole vene koolkonna siirdetegurid otseselt võrreldavad riikidega, kus arvutuslik rehvirõhk on suurem kui 0,6 MPa.

Probleem on veidi laiem sest konkreetselt katendile mõju arvestamisel mängib ka kontaktjalje kuju ehk koormuse mõjumise aeg. Laial rehvil on jälg venitatud tee ristsuunas. Kirjanduse andmetel on probleemiks mitte niivõrd kontaktsurve (erisurve) väärtus vaid pigem kontaktsurve erinevus kontaktjalje ala piires ja löikepinged kontaktjalje ääres.

3.2 FENG WANG – REHVIRÕHU MÕJU KATENDILE, PINGED ERINEVAD JÄLJE PIIRES

Feng Wangi doktoritöö (2005) keskendus üksikrehvide ja paarisrehvide mõju uurimisele üksikteljel ja paaristeljel (tandem). Varasemad analüüsid (AASHO) teostati rehvisurvel 515...550 kPa, tavapäraseks rehvisurveks on loetud 650...720 kPa ja praktikas esinevaks 820...890 kPa. Erinevad uuringud on

näidanud rehvisurve pidevat tõusu nii USAs kui mujal ja sellega kaasnevat kontaktpinna kahanemist, mille ulatus võib olla kuni 35% (juhtratastel) või 22% paarisratastel – see toob omakorda kaasa kontaktpingete kasvu mis mõjutab katendi tööiga. Katsetel on mõõdetud suurenenud kontaktpinge mõju ulatust ja leitud, et eriti suur mõju katendi tööeale avaldub õhukeste asfaltkatete puhul.

Traditsiooniliselt eeldatakse, et koormus avaldub ühetaoliselt kogu kontaktpinna ulatuses ja kontaktpinda iseloomustab valem $R = \sqrt{W/P \cdot \pi}$, kus R on kontaktpinna ringi raadius, W ratta koormus, P rehvirõhk ja pi – konstant. Koos arvutusvõimekuse kasvuga on osutunud võimalikuks mõõta koormusjaotust kontaktpinna ulatuses ja kasutades lõplike elementide meetodit, analüüsida selle mõju katendile. Analüüs on läbi viidud lõplike elementide tarkvaraga ANSYS 8.1 ja võrdluseks on kasutatud mitmekihilise arvutusskeemiga tarkvara CIRCLY 5.0 (Austraalia, Uus-Meremaa).

Kolme rehvitüübiga (üksikratas juhtteljel, paarisratas veoteljel ja paarisratas tandemteljel) uuriti HVS kasutusel liikuva ratta all SIM mõõtemaatriksiga pingeid koormustel 20, 24 ja 31 kN ning rehvirõhkudel 483, 690 ja 896 kPa. Näiteks, rehvirõhul 690 kPa ja koormusel 24 kN olid kontaktpinged üksikratta rehviläle äärealal lähedased rehvirõhu väärtustega, kuid rehvi tsentri lähedal ulatus kontaktpinge 900 kPa tasemele.

Analüüsiti kaht erinevat kattekonstruktsiooni – liivsavi aluspinnasel 32 cm killustikalust (paekillustik) ja asfaltbetoon tugevamas variandis 14,5 cm, nõrgemas 5,1 cm. Mitmekihiline arvutusmeetod hindas üle tõmbepingeid asfaldi alakihis ja alahindas survepingeid aluspinnase ülakihi. Need erisused võimenduvad koos rehvisurvega ja on olulisemad õhukeste katendite korral, samuti suurema mõjuga paarisrataste kasutuses nii üksikteljel kui tandem-teljel, kui juhtrataste puhul. Erisused kontaktpinna kujus toovad kaasa nihkepingete kontsentratsiooni ja väsimuspragude suunajaotuse eriti õhukestel katenditel (põikpragude oluliselt intensiivsem areng võrreldes pikisuunaliste pragudega), mida ei ole võimalik arvesse võtta mitmekihilise arvutusmeetodi puhul. Juhtratastel on mõju iseloom palju erinev sellest, mida täheldati paarisrataste korral nii eraldi kui tandemtelikul. Rehvirõhu tõstmine suurendab tõmbepingeid asfaldi alakihis. Rehvisurve suurendamine ei suurenda märkimisväärselt vertikaalpingeid aluspinnase ülakihi, kuid mõjutab tugevalt plastseid deformatsioone asfaldikihi – roopa moodustumine asfaldi ümberpaiknemisest, mitte aluspinnaseni ulatuvatest deformatsioonidest. Seega mõjutab kõrgem rehvisurve vaid asfaltbetooni ülakihte, roopa moodustumisel on selgelt jälgitavad sügavamad jäljed rehvi ääre lähedal.

Uuringu tulemusel väidab autor, et MEPDG väljatöötamisel on küll saavutatud edu metoodikas, kuid mitu kivi on jäänud ümber pööramata, sealhulgas on vajalik üleminek traditsiooniliselt rehvimudelilt mis eeldab kontaktpingete ühtlast jaotust kontaktjäljes ja pingete võrdset väärtust kogu jälje ulatuses, mudelile mis võtab arvesse pingete muutuse jälje piires. Meetodi valik põhineb arvutusvõimsuse jagamise vajadusel (võrgupõhine rakendus serveriaja jagamisega) mis ei võimalda kasutada Monte Carlo simulatsioonimeetodit mille puhul konkreetse katendi arvutusaeg 3 GHz Pentium-IV protsessoriga võib ulatuda 10 minutist kahe tunnini (1,5 GB RAM).

ANSYS programmiga arvutatu analüüs näitab, et tõmbepinged asfaldi alapinnas on suurimad kontaktjälje tsentris suhteliselt väikesel alal ning see toob kaasa väsimuspragude moodustumise ja arengu. Roopa moodustumise pilt on aga komplitseeritum, sõltudes koormusest, rehvitüübist ja rehvisurvest - madala rehvisurve korral on enamkoormatud rehvi ääreala, kõrge rehvisurve korral tsentriaal.

Arvutustes eeldati asfaldi ja aluspinnase omaduste muutlikkust aasta jooksul siinuskõvera funktsioonina (asfaldi E muutus 2000...9000 MPa – arvutuslik E 4900; aluspinnase E vahemikus

160...210 MPa – arvutuslik E 100), aluse omadused loeti konstantseks (E-390) eeldusel, et drenaaž tagab konstantse niiskussrežiimi aastaringselt.

Tulemusena, rehvirõhu tõus 483...896 MPa kolmekordistas põikpraod ja kahekordistas pikipraod. Eriti pikipragude osas suudab paksem katend leevendada pragude teket. Sama rehvirõhu tõus suurendas roopa sügavust 40%, kuid roopa sügavusel puudub suurem seos asfaltkatte paksusega. Teljekoormusel on väga oluline seos katte kahjustustega.

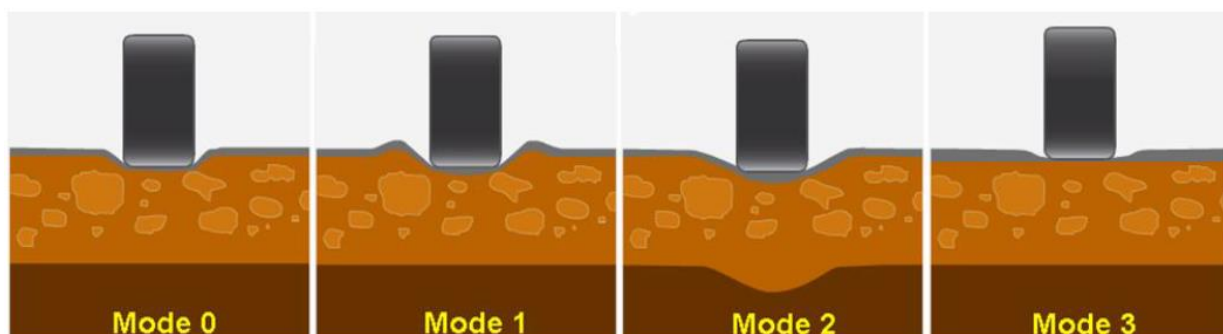
Alt-üles arenevate põikpragude osas on erinevate rehvitüüpide erisused väikesed, kahjustused on selges seoses teljekoormusega. Pikipragude arengut mõjutab tugevalt juhttelje suurem koormus (seega on juhttelje lubatud koormuse tõstmine katendi seisukohalt kõige ohtlikum), mõõdukalt paariratastega üksitelje koormus ja veel vähem paariratastega tandemtelje koormus. Roopa arengule on suurim mõju tandemteljel. Katte temperatuuril on tugev seos roobaste moodustumisega ning kõrgetel temperatuuridel moodustub paksemal kattel koguni sügavam roobas (vahe on siiski marginaalne). Sõiduki liikumiskiiruse tõus kahandab nii pragude teket kui roopa tekkekiirust, tõsi küll jällegi marginaalselt. Asfaltbetooni suurem elastsusmoodul tõstab katendi vastupidavust nii pragudele kui roopa moodustumisele. Veidi üllatav seos ilmnes roopa moodustumise ja korduvkoormuse vahel – kui roobas asfaldis areneb intensiivsemalt, siis roopa moodustumise kiirus kahaneb koormusega nii aluses kui aluspinnases.

3.3 ROADEX PROJEKTI EELUURING REHVITÜÜBI JA REHVISURVE MÕJUDEST

Roadex-projekti eeluuringu aruanne [8] kirjeldab teljekoormuse ja rehvitüübi valiku mõju katendi tööele. Viimastel aastakümnetel on eriti Põhjamaades võetud kasutusele suuremad veokid, teljekoormused ei ole üldiselt suurenenud kuid muutunud on nii rehvitüübi valik kui rehvisurve. Suuremate koormuste pooldajad tuginevad valdavalt AASHO uuringule eelmise sajandi keskelt, mille järgi koormused on alla 70% purustava koormuse tasemetest kuid muutunud oludes ületatakse see piir selgelt ning seetõttu ei pruugi AASHO järeldused koormuse mõju seostest enam paika pidada. Valdavalt on AASHO analüüsides määravaks väsimuspinged millest tuleneb konstruktsiooni purunemine, seoses suurema rehvisurve ja super-single rehvitüübiga on mõjud muutunud ja tähelepanu all on roopa tekke protsessid ning mõju on eriti suur õhukestele katenditele, kus asfaltkihi paksus on alla 200 mm. Uueks väljakutseks on dünaamilise juhtimise süsteem mille töötab välja Volvo – selle korral liiguvad raskesõidukite rehvid veel enam jälg-jäljes ja see võib kaasa tuua kuni 6-kordse roopa arengu kiirenemise.

Tee väsimise ja kahjustuste mehhanismi järgi võib eristada viit liiki:

- 1) Katte ja sidumata kihtide väsimine korduvkoormuse all, mis tavaliselt võtab miljoneid läbikuid;
- 2) Jääddeformatsioonid konstruktsioonis, valdavalt sulamisperioodil suurema koormuse vähestest läbikutest;
- 3) Külmakerkest ja mittetöötavast drenaažist tulenevad kahjustused (külmakerkepraod aga ka eelmises punktis kirjeldatud kahjustused);
- 4) Geotehnilised probleemid – vajumid
- 5) Projekteerimise ja ehitamise vead – truubi lähiala kerked, siirdekiilude puudumine, peegeldunud praod tee laiendamisel



Joonis 7. Erinevad roopa moodustumise viisid (ROADEX liigitus)

ROADEX roopa moodustumise liigitus:

- Mode 0 – järeltihenemine (toimub alati katte valmimisjärgselt ning järeltihenemise järel omandab katend suurema tugevuse)
- Mode 1 – materjali nihe nii asfaltkattes kui sidumata kihis, tuleneb ebapiisavast nihkekindlusest katte ülakihtides. Tihti seondub liigniiskusega katte ülakihtides ning kate võib olla normaalse niiskuse režiimi taastudes ja koormuse all uuesti tihenedes piisava tugevusega.
- Mode 2 – läbivajumine sidumata kihist aluspinnasesse – tegemist on kogu konstruktsiooni vajumisega jäljes ja selle lähialal. Lisades materjali roopasse protsess jätkub ja sellega võib kaasneda ka pikipragu jälgede vahel.
- Mode 3 – kulumiskihi kulumine – tuleneb sõiduautode naastrehvikasutusest, iseloomulik on roobaste väiksem vahekaugus (raskesõiduki rataste vahe on suurem kui sõiduautodel).

Reaalselt toimivad kõik ülaltoodud viisid ka korraga.

Katte väsimus – tavaliselt ilmneb võrkpraona ja pragudena rattajäljes. Super-single rehvi laialdasem levik on toonud kaasa uut tüüpi defekti – ülalt alla prao mille puhul defekt on arenenud katte ülakihist kui senised väsimusdefektid arenevad alt-üles, asfaldi alakihi tõmbetsoonist.

Drenaažist tulenevad defektid – võivad tuleneda niiskunud pinnase madalamast kandevõimest, aga ka külma kergetest kui külmumise eelselt ei ole tagatud piisavat vee äravoolu. Hangede liialt hiline eemaldamine kevadisel sulamisperioodil põhjustab aluskihi üleniiskumise millega kaasneb Mode 1 roobas. Kraavi põhi on kõrgemal teekonstruktsiooni alapinnast tekitab kapillaartõusu konstruktsioonis ning jäälätsede tekke. Vaba vesi võib kapillaartõusu teel sattuda konstruktsiooni ka suveperioodil kui veetase on liialt kõrge. Ummistunud kraavides tõuseb veetase eriti kiirelt. Vee jäätumine kraavis tõstab samuti veetaset. Bussipeatuste ja parklate lumi lükatakse tihti kraavi, mis omakorda tõstab veetaset.

Külmakahjustused – jäälätsede moodustumisel konstruktsioonis nõrgeneb konstruktsioon lätsede sulamisel ning sellega kaasneb risk Mode 1 ja Mode 2 roopa arenguks. Ebaühtlased külma kerked põhjustavad dünaamilist koormust mis toob kaasa kiire roopa arengu.

Vajumid – on tavaliselt suhteliselt mõõduka kaldega ja ei põhjusta roobaste riski, küll aga põhjustavad raskemad ja paljuteljelised veokid suuremaid pingeid ja ka vajumeid nõrgemas aluspinnases. Eriti on seda täheldada näiteks Rootsi kaevandusteedel, seoses üleminekutega nõrgemalt turvapõhjaselt aluspinnaselt tugevamale aluspinnasele ja ka kurvide siseküljes.

Ehituse ja projekteerimisvead – ilmnevad eriti kohtades, kus katend on kas aladimensioneeritud või ehitatud õhemana. Ebatasasustele mis võivad olla seotud truupide, põikvuukide või muude üleminekutega, järgnevad kohalikud roopad.

Soomes on lubatud kolmeteljelise teliku koormuseks 24 tonni asemel 27 eeldusel, et kahel teljel on paarisrattad – selle tagajärjel võib tee tööiga kahaneda pea kolmekordselt sest senise 8-tonnise paarisratta koormuse asemel tõuseb telje koormus 9 tonnini kõigil kolmel teljel.

Võrdluskonstruksiooniks oli asfalt 84 cm (E-1850 MPa), alus 11 cm (E-260 MPa) ja nõrk purustatud kaljupinnas 86 cm (E-100 MPa) nõrgal aluspinnasel (E-25 MPa). Sama teljekoormuse ja rehvirõhu juures kahaneb katendi ressurss kahekordselt rehvitüübi muutusega (dual > SS) ning teist kahekordselt rehvirõhu tõstmisega (800 kPa > 1000 kPa).

Rehvitüüp ja eriti rehvi laius mõjutab tugevalt Mode 1 roopa arengut, kuid laius ei mõjuta Mode 2 roobast. Õhukestel katetel (asfalt alla 10 cm) võib rehvitüübi muutusest roopa moodustumine kiireneeda 8-18 korda. Isegi 7,4 tonnise koormusega esitelje 385/55R22,5 rehvi mõjutab katet kahekordselt enam kui standardtelg (10-tonnine paarisrattas).

Rehvi rõhku ei ole seni reglementeeritud (rehvitootja kirjeldatu on soovituslik). Testid Soome teedel näitavad et kuigi tootjad ei soovita rehvirõhku üle 900 kPa, on kasutuses rõhud 1100 kPa ja enam. Õhukese asfaldikihi teedel võivad sellised rehvirõhud kahandada katte ressursi üle kahe korra, sest koormuse mõjutsoon ulatub killustikukihti.

Sulamisperioodil tekib katendites pumbaefekt – koormuse all pumbatakse vett katte pooride vahelt ka katte pinnale. Probleem võimendub kui raskeveokid liiguvad kolonnis sest veokite vahepealsel ajal kate ei jõua taastuda.

Mode 1 roopa teket mõjutab tugevalt rehvitüüp, katte paksus, seotud kihtide paksus ja aluse materjali kvaliteet. Mode 2 puhul olulisemaks on katte kogupaksus ja kandevõime – rehvitüübi mõju on minimaalne. 84 mm asfaldikihi konstruktsiooni ressursiks on 230,000 telge, sulamisperioodi omaduste järgi vaid 50,000 telge. 200 mm asfaldikihi konstruktsiooni ressurss 11 miljonit telge kahaneb sulamisperioodil 6 miljoni teljeni.

Katte ebatasasused põhjustavad ebatasasusele järgneval lõigul (kuni 120 meetrit ebatasasusest) kiirendatud roopa arengu läbi dünaamilise koormuse.

Koormus on „jälj jäljes“ piiretega teesektsioonis (1+1 keskpäärdega; eristatud bussirajad linnaliikluses). Teegeomeetria mõjutab katendi deformatsiooni – sisekurvis kurvi lõikamisel satub koormus katte servale lähemale kui sirgel lõigul ja siit tulenevalt arenevad servadefektid, sealhulgas ka roopad.

Roadex projekti Soome osa kontsentreerus selgelt tridem-teliku lubatud koormuse tõstmise mõju analüüsile erinevate rehvitüübi lahenduste korral, mis üldiselt pole Eesti tingimustes asjakohane sest reeglina puudub stiimul tridem-telikute super-single kasutuse muutmiseks või lubatud koormuste korrigeerimiseks. Analüüsi teedel on asfaltkatte paksus 84...266 mm, alus 101...204 mm ja vahekiht (samuti killustik ehk purustatud kalju kuid madalama kvaliteediga) 220...1175 mm.

Šoti osas oli põhirõhk rehvisurve muutuse mõjul. Lühidalt kokku võttes, kahaneb tee ressurss kahekordselt rehvisurve tõusul 600 kPa tasemelt 1000 kPa tasemele mis on seotud õhukese seotud kihiga. Rehvisurve muutused mõjutavad sidumata aluse tööiga minimaalselt, 5...10% ja põhiefekt toimib seotud kihtides. Sama koormuse ja rehvisurve juures kahaneb katendi tööiga rehvitüübi muutudes paarisrattalt super-single'le viiekordselt asfaldikihtide osas ja kuni kümnekordselt sidumata kihtide osas, super-single kasutuse mõju avaldub ka aluspinnase tasemel ressursi

kahanemisega 20-30%. Lõpptulemuse määrab nõrgim lüli. Analüüsi teedel on asfaltkatte paksus 195...219 mm ja sidumata alus 317...389 mm.

Norra katend on õhem ja rehvisurve tõstmine 600 kPa tasemelt 1000 kPa tasemele kahandab konstruktsiooni ressursi neljakordselt. Analüüsi teedel asfaltkate 106...118 mm, alus 71...110 mm ja vahekiht 511...604 mm.

Rootsis uuriti 100/200 mm asfaltkatet sidumata alusel 225+128=353 mm ja vahekihil 643 mm. Võrdlus keskendus rohkem ülipikkade (ja raskete – 60...90 t) veoste mõjule ning seetõttu pole käesoleva töö suhtes asjakohane.

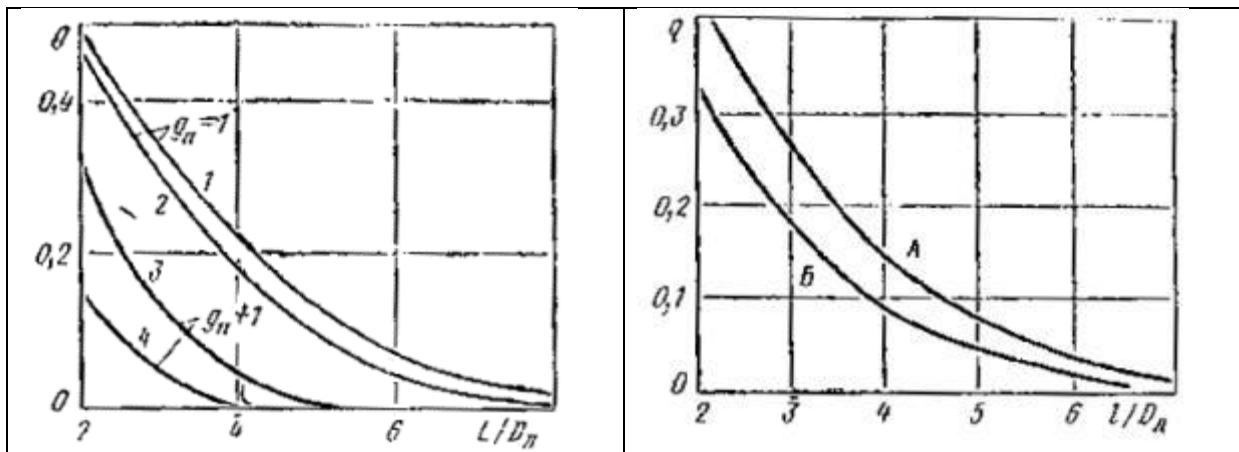
Kokkuvõtteks, rehvitüübi ja rehvisurve mõju katendile avaldub seda tugevamalt, mida õhema asfaltkattega on tegemist ja olulised erisused puuduvad asfaltkatte paksusel üle 250 mm. Õhukestel katenditel (alla 10 cm asfalt) võib SS-rehvide kasutusest tingitult roopa moodustumine kiireneda 8-18 korda võrreldes paarisratasest kasutusega. Rehvisurve tõstmisel 0,8 MPa tasemelt 1,0 MPa tasemele kahaneb katendi ressurss kahekordselt.

Siit tuleks järeldada, et raskesõidukite siirdetegurid sõltuvad seotud kihtide paksusest. Seda on siiski väga raske integreerida katendite projekteerimise süsteemidesse otseselt. Järelikult on tarvilik peale siirdetegurite korrektuuri asendada nõutava kandevõime valem või lahendada küsimus lisategurite kaudu – ja on võimalik, et nii ODN kui TKP koostajad jõudsid sarnastele järeldustele.

3.4 SIIRDETEGURI ARVUTAMINE (TEISTE RATASTE JA TELGEDE MÕJU)

Kehtiv katendite projekteerimise juhend baseerub Nõukogude Liidu juhendil VSN 46-83 aastast 1983. Juhendis on toodud algoritmid sõiduki siirdeteguri leidmiseks, kasutades graafiliselt esitatud sõltuvust konkreetse ratta alla taandatud koormuse arvutamisel naaberratasest koormuse mõju arvutamiseks.

Tabel 13. VSN siirdeteguri arvutamisel teiste ratasest mõju arvestamise graafikud



Vasakpoolne graafik näitab naabertelgede (eelmine ja järgmine) koormuse mõju teguri g seost A-grupi koormustele (1 ja 3) ning B-grupi koormustele (2 ja 4), telgede vahekauguse ja rattajälje diameetri suhtes.

Parempoolses graafikus on seos samal teljel paiknevate teiste ratasest koormuse mõjuteguri q leidmiseks ratasest tsentrite vahekauguse ja rattajälje diameetri suhtes, samuti A ja B grupi koormustele. B-grupi koormusi kasutatakse kohalikel teedel, kus raskesõidukite liiklus on väga hõre ning reeglina 6-tonnise teljekoormusega.

Teisel teljel paikneva ratta mõju arvestamisel liidetakse arvutatava ratta koormusele graafikult leitud kordajaga korrutatud kaugusel L paikneva ratta koormus.

Vene normides on antud siirdetegurid tollal levinud raskesõidukitele. Analoogiliselt on püütud leida siirdetegureid ka Eestis levinud sõidukitele (Metsvahi 2001, 2008, 2009) kuid kahjuks tuginedes vaid kaalupunktides fikseeritud teljekoormuste andmetel, arvestamata rehvisurvet ja rehvitüübi erisuse mõju katendile.

Toodud valemities kasutatakse seost rataste või telgede vahelise kauguse ja rehvi kontaktjälje diameetri suhtega. Paraku tähendaks seose ühene rakendamine seda, et rehvirõhu suurenemisega kahaneb naabertelgede mõju sest kontaktjälje diameetri kahanemine tõstab eeltoodud suhtarvu, mis omakorda vastavalt graafiku kujule toob kaasa madalama kordaja naabertelje mõju arvutusele. Et see seos esineb ka eriveoste arvutustes kasutatavates algoritmides, tuleb need algoritmid üle vaadata ja korrigeerida, sest rehvirõhu erisused on eriveoste puhul olulise kaaluga ja väiksema rehvirõhuga saavutatakse suurem kontaktpind mis kahandab koormuse mõju katendile.

Võimalik, et just selle ebaloogilisuse tõttu on uuemates normi redaktsioonides (ODN, MODN, TKP) loobutud eeltoodud graafikutest. Samuti on muudetud valemit, mille järgi normtelje koormusest erineva koormusega teljed taandatakse normteljele – senise astendaja $x [(Q/Q_n)^x]$ väärtuse 4,4 asemel on sisse toodud püsikatendile astendaja 4,0 (erinevates redaktsioonides on siiski ka säilitatud 4,4 väärtus püsikatendile); kergkatendile 3,0 ja siirdekateendile 2,0. Teisisõnu, siirdetegurid sõltuvad katendi liigist. Staatilise koormuse kontrollarvutuses on sisse toodud kordaja $K_s = a \cdot b \cdot \sqrt{L-c}$, kus L on sõiduki äärmiste telgede vaheline kaugus ning a, b ja c konstandid, mille väärtus püsi- ja kergkatenditel on vastavalt 2-teljelisel telikul 1,7 – 0,43 – 0,5 ja 3-teljelisel telikul 2,0 – 0,46 – 1,0.

Samuti on uuemates redaktsioonides (sh SNiP 1985. aastast, mida on pidevalt uuendatud, viimane redaktsioon 2012) sisse toodud lisaks 10-tonnisele normteljele 11,5-tonnine ja 13-tonnine telg, seejuures 10-tonnist ei kasutata püsikatendite dimensioneerimisel (üldlevinud normtelg 11,5 tonni mis vastab ka maksimaalsele lubatud teljekoormusele) ja rahvusvaheliste transiiditrasside teede projekteerimisel arvestatakse normkoormuseks 13-tonnine telg. Siit tulenevalt on ka kõik siirdetegurid antud eraldi kõigi kolme normtelje jaoks. SNiP toob kontaktjälje arvutamiseks valemi $D = \sqrt{20Q/\pi p \gamma}$ kus Q on teljekoormus kN, p rehvirõhk kPa ja γ töökindlustegur väärtusega 0,95.

3.5 NÕUTUD KANDEVÕIME VÕRDLUS (VSN vs ODN)

Juhendis 2001-52 on kasutatud VSN normis esitatud graafikust tuletatud valemit $E_{min} = 67,6 \cdot \log(Q) + 61,3$ (A-klassi veoautode koormusele), kus Q on 15-nda aasta enamkoormatud sõiduraja aastakeskmise normtelgede arv ööpäevas (A.Vaimel).

Uuemates normides on mindud viimase (15-nda) aasta koormuse arvestuselt üle summaarse kumulatiivse koormuse arvestusele, kusjuures vajalik elastsusmoodul määratakse valemiga:

$E_{min} = 98,65 \cdot (\lg(\Sigma Q) - 3,55)$ – valem kehtib 10-tonnise normtelje kohta, 11-tonnisel teljel on vabaliige 3,25 mis tõstab nõutud koormust konstandi $98,65 \cdot 0,3 = 29,6$ MPa võrra. Valemit tohib kasutada koormustel vähemalt 40,000 normtelge katendi eluea jooksul.

Lisaks on summaarse koormuse arvutamiseks kasutusel parandustegurid ja kumulatiivse summaarse koormuse arvutamiseks kasutatakse valemit:

$$Q = 0,7 \cdot N_{persp} \cdot (K_c / q^{T-1}) \cdot T_{arv} \cdot K_{st}, \text{ kus}$$

- N_{persp} on katte tööea viimase aasta koormus taandatuna enamkoormatud sõidurajale

- K_c on summeerimistegur, valemist $K_c = (q^T - 1) / (q - 1)$, toodud ka lisas vahemikule 8...19 aastat, näiteks 20-aastase tööea ja 2% aastase kasvu korral 24,4
- q on iga-aastane kasvutegur (vahemikus 0,9...1,1)
- T on katendi kavandatav tööiga
- Koefitsient 0,7 võib arvestada asjaolu, et nädalavahetustel raskeliiklus on oluliselt väiksem (analoogilist tegurit esineb ka teiste riikide süsteemides, kus viide on just nädalavahetustele, ODN puhul puudub normis selgitus).

Tabel 14. Katendi tööiga ja varutegurid ODN järgi

Klass	Tüüp	Töökindlustegur							Tööiga
		0,98	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	MODN alusel
		Soovitatud arvestuslik katendi tööiga							
I	Püsikate	19	14						14-18
II	Püsikate	17	13						11-15
III	Püsikate	15	12	11					11-15
	Kergkate		11	10					10-13
IV	Püsikate	12	10	9	8				11-15
	Kergkate			8	7	6			8-10
	Siirdekate				6	5	4		3-8
V	Kergkate					6	5	4	8-10
	Siirdekate					5	4	3	3-8
	Looduslik (pinnastee)						4	3	
VI	Siirdekate					5	4	3	
	Looduslik (pinnastee)						3	2	

Tulenevalt seostest katendi tööea ja varutegurite vahel, on otstarbekas korrigeerida ka KAPis kasutatavaid varutegureid.

- T_{arv} on arvutuslike päevade arv aastas (Valgevenes vahemikus 125...135 päeva; MODN järgi tõenäoliselt ka Eestis 125 päeva) – see peaks kajastama katendile ohtliku perioodi pikkust – talveperioodil on aluspinnase kandevõime väga hea ning suhteliselt hea on see ka suvel, järelikult tegu on üleminekuperioodi (kevad, sügis) pikkusega.
- K_{st} on tee klassist sõltuv liiklusprognosis tõenäosusega seonduv tegur:

Tabel 15. Liiklusprognosis ebatäpsusega seotud parandustegur ODN normides

	I	II	III	IV	V, VI
Püsikate	1,49	1,49	1,38	1,31	
Kergkate		1,47	1,32	1,26	1,06
siirdekate			1,19	1,16	1,04

Võrdlevad kontrollarvutused näitavad, et kasutades kasvutegurit 1,02 (kasv 2% aastas) arvestab uuem valem koormuse võrdseks summaarse koormusega juhul, kui koormusperioodi pikkuseks on 354 päeva aastas. Eeldusel, et koormusperiood on 125 päeva, on erisus 2,83 korda (vähem kui summaarne) ja 135-päevase perioodi puhul 2,62 korda (kõik võrdlused teostatud maksimaalse K_{st} väärtusega).

Tabel 16. Nõutud kandevõime VSN ja ODN järgi

N	areng	1,02	Aktiiv	125	Kc	24,2974	T	20	Koppel			
	klass	Q15	Q20	Kst	ODN Q	Q15t	Sum Q	ODN E	KAP E15	0,9 MPa	E20	E20t
100	5	132	146	1,25	265 752	179	897 350	185	205	307	208	214
500	4	660	728	1,31	1 392 543	897	4 486 751	256	252	378	255	261
1000	3	1319	1457	1,38	2 933 907	1 795	8 973 503	288	272	408	275	281
2000	2	2639	2914	1,49	6 335 539	3 589	17 947 006	321	293	440	295	302
4000	1	5278	5827	1,49	12 671 078	7 179	35 894 011	350	313	470	316	322
8000	1	10556	11654	1,49	25 342 157	14 358	71 788 022	380	333	500	336	342

Tabelis 16 on võrreldud uuema vene süsteemiga (ODN) arvutatud tulemusi (nõutav elastsusmoodul E) Eestis kasutatutega.

- N – koormussagedus täna
- Klass – tee tõenäoline klass
- Q15 – 15-nda aasta koormussagedus (eeldusel, et koormussageduse kasv on 2% aastas)
- Q20 – 20-nda aasta koormussagedus
- Kst – liiklusprognoosi veategur ODN järgi
- ODN Q – summaarne telgede arv ODN järgi
- Q15t – 15-ndale aastale taandatud 20 aasta koormus (Sum Q / 5000)
- Sum Q – 20 aasta summaarne telgede arv
- ODN vs Q – Sum Q ja ODN Q suhtarv
- ODN E – ODN järgi nõutav kandevõime
- KAP E15 – 15-nda aasta järgi nõutav kandevõime
- Koppel 0,9 MPa – korrigeerides kandevõimenõuet rehvisurve tõusu suhtega (empiiriline varu)
- E20 – 20-nda aasta järgi nõutav kandevõime
- E20t – taandatud 15-nda aasta koormuse (Sum Q / 5000) järgi nõutav kandevõime, mis on osutunud senisest 15-aastase tööeaga katendilt nõutust kogu ulatuses 9 MPa suuremaks.

Järeldus: ODN süsteemiga on nõutavat kandevõimet langetatud koormustel kuni 450 normtelge (tänapäevane koormus) ja tõstetud suurema koormuse korral. On tõenäoline, et madalate koormuste puhul on kõrgsurverehvidega sõidukite osakaal väiksem, samuti on väiksem super-single rehvide osakaal (ka need on reeglina kõrgsurverehvid). Madalate koormuste puhul rakendub niigi tee klassist sõltuv minimaalselt nõutava kandevõime väärtus, mis on III klassi puhul 200 ja IV klassi puhul 180 MPa.

Täiendavalt on ODN rakendamiseks sisse toodud erinevad lisategurid konkreetsete parameetrite võrdluse – elastse vajumi kontrollarvutustes kuni 1,50 (TKP – kuni 1,25); nihke- ja tõmbepingete arvutustes kuni 1,1. Seega tuleks ka vajaliku E arvutustes sisse tuua lisategur mis tõstab vägagi oluliselt nõutud katendikihtide paksust. Lisatud tabelis 17 on toodud tugevusteguri väärtused erineva töökindlusteguri ja tee klassi puhul. Kui väärtused on erinevad ODN ja TKP puhul, on ODN erisused esitatud sinise värviga (MODN on ses osas identne ODN-ga).

Siit tulenevalt on otstarbekas koos siirdetegurite korrigeerimisega asendada ka nõutud kandevõime (elastsusmooduli) arvutusvalem (2001-52: 13.1) – $E=a*\log(Q)+b$ – võttes arvesse ODN valemi erinevat toimet.

Tabel 17. Lisategurid katendi kontrollarvutustes

Tee klass	I		II		III			IV			
Töökindlustegur	0,98	0,95	0,98	0,95	0,98	0,95	0,90	0,95	0,90	0,85	0,80
Tugevustegur vajumile (ODN; TKP)	1,50 1,25	1,30 1,15	1,38 1,20	1,20 1,10	1,29 1,20	1,17 1,10	1,10 1,00	1,17 1,05	1,10 0,95	1,06 0,85	1,02
Tugevustegur sidumata kihi nihkele ja tõmbele	1,10	1,00	1,10	1,00	1,10	1,00	0,94	1,00	0,94	0,90	0,87

Lisaks on antud purunemise piirtegurid, I-II klassi puhul 0,05 ja III-IV klassil 0,10.

Võrreldes samas ka siirdetegurite väärtusi, võib järeldada, et elastsele vajumile rakendatava tugevusteguri madalam väärtus TKP (Valgevene) süsteemis on kompenseeritud oluliselt suuremate siirdeteguri väärtustega.

Järeldus. Varutegurite ja siirdetegurite süsteemi tuleb käsitleda tervikuna, samuti vajaks korrigeerimist IV klassi varutegurite valik ja tõenäoliselt tuleb lisada ka asfaltkatte (püsikatte) võimalus V klassi teedel

3.6 SIIRDETEGURID VENE KOOLKONNAS UUEMATE NORMIDE ALUSEL

Tabel 18. Siirdetegurid SRÜ riikides, MODN 2001

	10-t	11,5-t	13-t
Kerge veok, kandevõime 1-2 tonni	0,005	0,003	0,0015
Keskmine veok, kandevõime 2-5 tonni	0,2	0,13	0,063
Raskeveok, kandevõime 5-8 tonni	0,7	0,46	0,22
Väga raske veok, kandevõime üle 8 tonni	1,25	0,82	0,40
Autobuss	0,7	0,46	0,22
Autorong	1,5	0,99	0,47

Valgevene on lisaks SRÜ reeglitesse lisatud raskematele telgedele korrigeerinud ka siirdetegureid, tõenäoliselt sisaldab korrektuur nii tegelikust rehvisurvest tulenevat kui ka rehvitüübi valikust tulenevat komponenti ka juhul, kui seda ei ole juhendis eraldi väljendatud. Tabelis on toodud sõidukid, mille teljekoormus veoteljel ei ületa 11,5 tonni ja tandemtelje koormus ei ületa 20 tonni. Valgevene tegurite võrdluseks on esitatud Eesti projekteerimismõõtmistes toodud tegurid, mida tuleks võrrelda just 10-tonnise normtelje teguritega.

Tabel 19. Siirdetegurid – erinevate normtelje väärtuste korral - väljavõte Valgevene 2008 normist

Sõiduki liik -- normtelje koormus	10 t	11,5 t	13 t	Eesti
Sõiduauto	0,002	0,0015	0,0012	
Mikrobuss	0,0037	0,0027	0,002	
Kerge veok (kandevõime 2-5 t)	0,2	0,1	0,05	
Keskmine veok (kandevõime 5-8 t)	0,6	0,3	0,27	0,11
Raskeveok (2 telge, tagatelg 10 t)	1,00	0,87	0,65	0,8
Raskeveok (2 telge, tagatelg 11,5 t)	1,35	1,00	0,87	0,8
Raskeveok (3 telge, telik 20 t)	3,6	1,6	1,1	1,8
Sadulrõng (2+1, tagatelg 11,5 t)	2,5	1,5	0,9	0,85
Sadulrõng (2+2, tagatelg 11,5 t)	3,0	1,9	1,1	1,1
Sadulrõng (2+3, tagatelg 11,5 t)	7,0	4,1	2,5	2,05
Sadulrõng (3+2, telik 18 t)	3,0	1,9	1,1	2,05
Sadulrõng (3+2, telik 20 t)	5,5	3,5	2,2	2,05
Sadulrõng (3+3, telik 20 t)	7,0	4,0	2,8	4,8
Autorõng (2+2, tagatelg 11,5 t)	2,5	1,2	0,95	1,1
Autorõng (2+3, tagatelg 11,5 t)	3,5	2,0	1,2	2,05
Autorõng (3+2, telik 20 t)	4,0	2,5	1,7	2,05
Autobuss (2, tagatelg 11,5 t)	1,5	1,0	0,6	0,75
Autobuss (3, keskmine telg 11,5 t)	3,76	1,0	1,2	1,7
Liigendbuss (3, keskmine telg 11,5 t)	2,0	1,2	0,8	1,1

3.7 SIIRDETEGURID SOOMES, ROOTSIS JA TAANIS

Soome projekteerimisjuhendis (2004) on siirdetegurid arvestatud üldistatud kujul.

$$\text{Valemis: } KKL_{KAISTA} = L \cdot (2,9 \cdot KA_{YHD} + 0,8 \cdot KA_{MUU}) \cdot 7300$$

on lisaks toodud tee laiupest sõltuv tegur L , kui sõiduraja ja sellega piirneva peenra laius kokku on alla 5 meetri (kuni 3,5 meetri puhul sõltub tegur mulde nõlvusest ja võib ulatuda 2,8-ni; 3,5-5 m puhul 1,4). Autorongidel on seega siirdeteguriks 2,9 ja ülejäänud raskesõidukitel 0,8. Arvutusperiood on 20 aastat kuid arvutusalluseks loetakse 10-nda aasta koormus. Konstant 7300 on 365 päeva*20aastat. Ainsa Skandinaavia riigina on Soome katendite projekteerimise süsteemis määratletud katendikonstruktsiooni nõutav kandevõime sõltuvuses tee klassist (koormusklassist), kuid seejuures ei ole avaldatud algoritmi, mille alusel nimetatud piirväärtus leitud on.

Rootsi arvutusalluseks on 10-tonnine paarisrattastega telg rehvirõhuga 800 kPa ning juhendis (trafikanalysis, VGU 2004:80) loeti E-teele raskeliikluse osakaaluks 12,8%, teistel riigiteel 10,8%, kohalikel põhiteel 7,9% ja kõrvalteel 6%. Koormuse arvutuses võetakse arvesse parandustegureid, mis teedevõrgu liigist sõltuvalt on 0,7...1,2; sõiduraja laiupest 0,7...1,3; kiirusest 0,75...1,45; naastrehvide kasutusest 0,8...1,3; talihooldusest 0,8...1,0. 2010 mõõtmistulemuste alusel juhendi TRV 2011:073 järgi arvestati siirdeteguriteks kaheteljelistel veokitel 0,36; kolmeteljelistel 0,56; bussidel 0,68; 2-teljelistel veokitel haagistega 1,11 ja kolmeteljelistel veokitel haagistega 1,36. Sellele lisanduvad parandustegurid mis arvestavad super-single rehvi levikut.

Üksikrehvide kasutuse tegur on võimalik valida kas tee liigi või sõidukitüübi järgi. Kiirteel (motorway) on 45% raskeliiklusest üksikrattad, põhiteel 40% ja kohalikel teel 50%. Kaheteljelistel 0%, kolmeteljelistel 60%, 2-teljelistel haagisega 90%, 3-teljelistel haagisega 45% ja bussidel 10%. Rehvitüübi mõju ulatuse tegur on kiirteel üksikrehvil 1,7 ja paarisrehvil 1,1; põhiteel üksikrehvil 1,6 ja paarisrehvil 1,0 ning kohalikel teel üksikrehvil 1,5 ja paarisrehvil 1,0.

Taanis (Trafiktal-Supersinglefaktor; Vejdirektoratet 2012) on arvestatud 365/80-22,5 mm SS-rehvi koormuseks 8 tonni ja kontaktpingeks 8,0 kg/cm²; 425/65-22,5 mm SS-rehvil 10 tonni ja kontaktpinge 8,25 kg/cm². Paarisrattal (12R-22,5) koormuseks 10-11,5 tonni ja kontaktpinge 6,5-7,75 kg/cm² ja juhtrattal 12R-22,5 või 315/80-22,5 koormus 6,5-8 tonni kontaktpingega 7,75 kg/cm² või 350/75-22,5 8 tonni ja kontaktpinge 8,5 kg/cm². Arvutustes võetakse paarisrattal 10-tonnine telg 700 kPa rehvisurvega või 8-tonnine SS-rehvidega telg 900 kPa rehvisurvega.

Taanis on uuritud eraldi super-single osakaalu ja selle mõju katenditele [13]. Reeglina on arvutusalluseks 0,7 MPa rehvirõhuga paarisrattad, koormuseks 5 tonni millele lisatakse ülekoormusena 20% (dünaamiline komponent, mis Eestis loetakse 30%). Paarisrattal on koormuse tsentrite vahekaugus 350 mm. Analüüsis lisati super-single rehvid 0,9 MPa rehvirõhuga eelduses, et kontaktjalg on ringikujuline ning koormuseks 4 tonni, samuti ülekoormuse lisa 20%.

Tabel 20. Taani veokite koormuse iseloom

Telg	Koormus	Rehvitüüp	laius	kontaktsurve
	tonni		mm	Kg/cm ²
esitelg	6,5-8	12R-22,5	305	7,75
		315/80-22,5	315	7,75
	8	350/75-22,5	350	8,5
paarisrattad	10-11,5	12R-22,5	305	6,5-7,75
8t supersingle	8	365/80-22,5	365	8,0
10t supersingle	10	425/65-22,5	425	8,25

Supersingle rehvitüübi leviku muutust iseloomustab alljärgnev tabel (üle 6 tonniste sõidukite % SS-rehviga):

Tabel 21. SS-osakaalu muutus Taanis 1991-2010 erinevatel teeliikidel ja vastav parandustegur

1991		2010		SS-tegur analüütiline/kaalutud
Motorvej	39,2%	Motorvej	60,7%	1,84 / 1,76
Byfjern hovedvej	25,7%	Statsvej udenfor by	40,9%	1,72 / 1,57
Bynaer hovedvej	18,1%	Statsvej i by	36,3%	1,75 / 1,51
Landevej	15,2%	Kommunevej udenfor by	29,4%	1,65 / 1,36
Kommunevej	13,5%			
Trafikvej i by	7,5%	Kommunevej i by	8,7%	1,21 / 1,11
Lokalvej i by	6,9%			

Tabel näitab, et muutused (SS-rehvi kasvutrendid) on samasuunalised ka Eesti tendentsidega.

4 SIIRDETEGURI ARVUTUSALGORITMID

4.1 VENE KOOLKOND

Eestis on seni valdavalt kasutatud VSN-päritolu algoritmi, mille kohaselt tuleb arvesse võtta naabertelgede ja naaberrataste kaasmõju lisaks uuritava ratta koormusele. Skeemil on põhimõttelised puudused – ei arvestata rehvi tüüpi (super-single) ja rehvirõhu mõju on kokkuvõttes vastupidine – mida suurem on rehvirõhk, seda väiksemaks jääb kontaktjalg ja suuremaks kontaktpinge, kuid siirdetegur kahaneb sest naaberrataste ja –telgede mõju algoritmis kahaneb mõju vastavalt mõjutava ratta (telje) kauguse ja rattajälje diameetri suhtele. Mida suurem surve ja väiksem rattajalg, seda suuremaks läheb kauguse ja jäljediameetri suhe ja seda väiksemaks jääb naaberratta mõjutegur.

ODN on seetõttu kõnealust algoritmi muutnud, kuid asemele on toodud teliku parameetritest lähtuv algoritm, mis katab vaid kahe- ja kolmeteljelised telikud ja ei sobi juhul, kui sõidukil on mitu telikut. Samuti puuduvad algoritmist rehvisurvet ja rehvitüüpi kajastavad tegurid.

Kuna nomogrammide põhises süsteemis on küll kasutatud rehvirõhu seoseid, kuid süsteemi loomisel ei ole teostatud kontrollarvutusi standardsest (0,6 MPa) erinevatel rehvirõhkudel, ei tohi algselt muutujana kirjeldatud rehvirõhu näitajat muuta (tõstes rehvirõhku, tõuseb sama konstruktsiooni arvutuslik kandevõime oluliselt) ja seetõttu on Vene koolkonnas kasutusele võetud sõidukite siirdetegurite muutmine ilma otseste seosteta rehvisurve või rehvitüübiga. Neid seoseid võib aimata vaid kaudselt. Näiteks, tee klassist sõltuv „liiklusproгноosi ebatäpsust“ kajastav tegur võib tõenäoliselt katta nii rehvisurvega kui ka rehvitüübiga seonduva arengu. Mitmesuguste pingete vastavuse võrdluses kasutatavad tugevus- või töökindlustegurid võiksid olla seotud rehvisurve mõjuga. Samas on raske piiri tõmmata, sest need tegurid on erinevad nii tee klasside kui töökindlusteguri suhtes (võimalikud erinevad teguri väärtused ka sama tee klassi korral).

4.2 TAANI ERIVEOSTE ARVUTUS

Alates 2002 on Taanis eriveoste mõju hindamisel kasutusel alljärgnev valem:

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

- n on teljegruppide arv
- m_j on telgede arv grupis j
- $A...D$ on erinevad tegurid, mis kirjeldavad konkreetse sõiduki rehvitüüpi, telgede vahekaugust grupis, vedrustuse tüüpi ja rehvirõhku

4.2.1 Siirdeteguri komponendid

Järgnevalt on kirjeldatud erinevate komponentide väärtuse määramise aluseid.

- A_i - konstant, mis kirjeldab nii telgede arvu grupis kui telgede vahekaugust grupis, rehvitüüpi, vedrustuse tüüpi ja rehvirõhku.
(eristatakse nõrka katendit tugevast – tugevas esineb vaid primaarne roopa moodustamine, nõrgas deformeerub koormuse all ka alus)

Tabel 22. Taani eriveosed - telgedevahelise kauguse ja telgede arvu mõju siirdetegurile

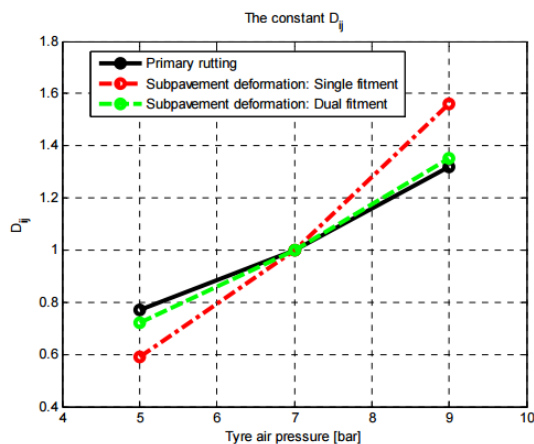
A_i	Tugev tee					Nõrk tee*
Telgede arv	Telgedevaheline kaugus					
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	Kõik kaugused
2	1,05	1,25	1,40	1,55	1,75	2,00
3		1,50	1,90	2,20	2,50	3,00
4		1,70	2,35	2,80	3,30	4,00
5		1,90	2,80	3,40	4,05	5,00
6		2,00	3,20	4,00	4,75	6,00
7		2,20	3,60	4,60	5,45	7,00
8		2,35	4,00	5,15	6,00	8,00

- Nõrgaks teeks loetakse koormuse suhtes ebapiisava asfaltkatte paksusega konstruktsioon. Erinevate allikate alusel tuleks nõrgaks lugeda alla 20 cm asfaltkate. Järgnevas kirjeldatud Roadex aruandes arvatakse õhukeseks katend, kus asfaldi kogupaksus ei ületa 10 cm.
- B_{ij} on konstant, mis võtab arvesse rehvi tüübi ehk paigutuse. Paarirattal on konstant 1, üksikratastel (kui rehvide vahekaugus ületab 2,5*rehvi laiuse) võetakse väärtus tabelist 21.

Tabel 23. Taani eriveosed - rehvi laiuse mõju siirdetegurile

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

- C_i – vedrustuse tüüp: spiraal- või lehtvedru – 1,05; kummipuhver, õhk- või hüdrauliline vedrustus – 0,95; vedrustus puudub – 1,4
- D_{ij} – rehvirõhku arvestav konstant graafikult – eristatakse üksik- ja paarisrehve ja primaarroobast või ka aluse deformeerumist koormuse all.



Joonis 8. Taani eriveosed - rehvisurve mõju siirdetegurole

Taani süsteem on sobilik eriveoste kontrollarvutusteks – võttes arvesse kuni 8-teljelise teliku mõju. Puudused on:

- orienteeritud ainult tavapärastele veokitele, kus haagise teljel on kaks (paaris)ratast. Kui teljel on neli paarisratast, tuleks arvesse võtta ka lähima sama telje rattapaari mõju ja selleks on võimalik täiendavalt sisse tuua Vene süsteemist naaber-ratta ehk rattapaari mõju sõltuvuses kaugusest, kuid sidumata seda otseselt rehvisurve kaudu kontaktjäljega. Tavapäraste veokite puhul rakendus toimib kuni 8-teljeliste telikute puhul (neid telikuid võib olla ka rohkem).

- b) Ei ole arvestatud sõiduki liikumiskiirust, millest sõltub dünaamikategur. Taani puhul on dünaamikateguri arvestus katendiarvutuse osa, kuid eriveoste võrdlemise puhul on siiski mõistlik see lisada et oleks võimalik täpsustada koormusega liikumisel maksimaalset lubatud koormust seoses kiirusega.

Et siirdetegur ei sõltu kiirusest, siis on põhimõtteliselt eriveoste lahendusena tarvilik süsteemi täiendada – seega nii kiiruse kui ka samal teljel paikneva naaberratta mõju arvestamisega. Seni kasutuses olev eriveoste võrdlusarvutuste algoritm tuleb igal juhul asendada kaasaegsemaga.

4.2.2 Siirdeteguri ja kontaktsurve muutuse võrdlus

Võrdleme rehvirõhu ja rehvitüübi erisuste mõju Soome (Tanttu-Korkkiala, VTT) ja Taani skeemides:

Tabel 24. Rehvisurve mõju erinevatel koormustel siirdetegurile ja keskmisele erisurvele

Ratta(paari) koormus	30 kN		40 kN		50 kN		60 kN	
Rehvirõhk MPa	0,6	0,85	0,6	0,85	0,6	0,85	0,6	0,85
DK - Dual (siirdeteguris)*	0,123	0,172	0,389	0,545	0,95	1,331	1,97	2,76
DK - SS (siirdeteguris)*	0,247	0,346	0,780	1,092	1,903	2,666	3,946	5,529
FI - Dual kPa	425	502	486	559	531	599	566	630
FI - SS kPa	513	680	580	733	629	769	667	794

*õhkvedrustus – tegur 0,95

Siit tuleneb, et kui rehvirõhu muutus sama koormuse juures muudab siirdetegurit 1,4 korda mõlema rehvitüübi korral, siis kontaktjälje muutusest tulenev keskmine kontaktsurve muutub ainult 1,1...1,25 korda. Teiste allikate järgi selgub, et kontaktpinged rehvi kontaktjäljes ei ole konstantsed, maksimaalne kontaktpinge ületab ca 20% keskväärtust ja see paikneb suure surve korral jälje tsentris, väiksema surve korral äärel. On võimalik, et see mõju ongi Taani süsteemis (kaudselt) arvestatud läbi teiste indekse.

4.3 SIIRDETEGURID EESTIS LEVINUD RASKEVEOKITELE

4.3.1 Metoodikast

- 1) Osalise koormuse mõju – Taani eriveoste metoodika võtab aluseks lubatud täismassi piires lubatud teljekoormuste erinevad variandid. Eestis kasutusel olevate siirdetegurite arvutamisel on võetud aluseks tegelikud kaalupunktides mõõdetud teljekoormused. Ei ole üheselt selge, kuid võrd mõjutab tulemust asjaolu, et tõstetud telgedega liikumisel liigituvad paljuteljelised veokid väiksema teljearvuga veokite klassi. 2007 kaalupunktide mõõtmistulemustest tuleneb keskmine autorongide siirdetegur 1,68 (kuigi prognoosides kasutatakse varasema aruande baasil keskmist 2,00) ja et 2007 läbisõidu jaotuste baasil kujunes Taani meetodil keskmiseks siirdeteguriks 2,23 tuleneb siit osalise koormuse mõjutegur 0,751 mida on kasutatud ka sooloveokite puhul. Eeldades siiski, et autorongide reaalne siirdetegur kaalupunktide andmete põhjal (1998-2000) on tõesti 2,00 mis on fikseeritud ka projekteerimismidetes, kujuneb osalise koormuse tegur suuremaks ja selle tulemusel tõusevad märkimisväärselt ka uued siirdetegurid.
- 2) Rehvirõhk – oleme arvestustes kasutanud 2007 andmete baasil rehvirõhuks 0,6 MPa ja 2014/2015 baasil 0,9 MPa. Kuigi ka varasemal ajal on rehvirõhk tegelikult olnud suurem, ei ole suuremat rehvirõhku arvestatud ka varasemate siirdetegurite arvutustes ning seetõttu on tulemused võrreldavad ja käesoleva töö tulemus võtab arvesse suurenenud rehvirõhud.
- 3) Paarisrattaste ja üksikrattaste kasutamise jaotus – oleme võtnud aluseks 2015 ARK jaotuse, eeldades selle jaotuse kehtivust ka varasematel aastatel. Kuna 2007 arvutusmetoodikas

rehvitüübi erisust ei arvestata, ei muuda see tulemust. Siirdetegurite arvutamisel oleme võtnud kõigil sõidukitüüpidel arvesse paarisrataste võimaliku kasutuse ning juhul, kui konkreetse tüübi osas on ARK andmetel tegemist laiade üksikrehvidega (SS), arvestanud siirdeteguri ka üksikrehvide kasutusel ning kaalunud summaarse teguri vastavuses kasutusprotsendiga.

- 4) Katendi paksus – oleme eeldanud, et Taani skeemi põhivariant kehtib „paksu“ asfaltkatte puhul (vähemalt 20 cm) ning „õhukese“ puhul mõjuvad mitmeteljelise teliku teljed alusele eraldi, siirdeteguri arvutuses oleme leidnud tegurid eraldi paksule ja õhukesele katendile ning keskmise arvestuses kasutanud eeltoodud tegurite keskväärtust.

Arvutuste tulemused on esitatud Lisas 6 ning järgnevalt kirjeldame protsessi detailsemalt.

Lisas 6 esitatud tabelis 34, on kasutatud alljärgnevatid tähiseid või lühendeid, lisaks sõidukitüübi lühendile mis on eelnevalt kirjeldatud:

- D – dual ehk paarisrehv
- 0,6E – rehvirõhk 0,6 MPa ja D/S rehvitüübi erisust (peale juhttelje) ei arvestata
- 0,9 – rehvirõhk 0,9 MPa ja rehvitüübi erisus on arvestatud
- 0,9N – 0,9 MPa kuid katend on õhuke, nõrk

Tabeli ülaosas on toodud kahe erineva kaalujaotuse korral arvutatud siirdetegurid paarisratta kasutusel kolmele variandile (0,6E, 0,9 ja 0,9N) ning samuti üksikratta kasutusel. Keskmine on kaalutud kahe kaalujaotuse ning kahe rehvitüübivaliku järgi arvestatud üksikrehvide kasutuse osa läbisõidu alusest. Summaarne keskmine siirdetegur on keskmine tugeva ja nõrga katendi jaoks, arvestades 0,9 MPa rehvirõhku.

4.3.2 Osalise koormuse mõju

Selleks võrdleme TTÜ 2008 töös kaalupunktide andmetel koostatud siirdetegureid (autorongide keskmine 1,68) käesoleva meetodiga täiskoormusele leitud keskväärtusega (kaalutud 2007 raskesõidukite statistilise läbisõiduga). Autorongide keskmiseks siirdeteguriks kujunes 2,23 ning suhtarv 0,7518 kirjeldab osalise koormuse mõju siirdetegurile kõigile sõidukitüüpidele. NB! See ei arvesta otseselt teljekoormuse erisust tühjalt/täis, vaid ainult täiskoormusele arvutatud (0,6 MPa ja paarisratas) siirdeteguri ja kehtestatud teguri suhet. Sooloveokite keskmiseks kujunes sama meetodiga 1,47 mis sama suhtarvuga taandades annab „vana“ keskmise siirdeteguri väärtuseks 1,11 (praktikas autorongide siirdeteguri 2,0 kõrval on kasutatud sooloveokite tegurina 1,20 mis on üsna lähedane 1,11-le).

Tabel 25. Osalise koormuse arvestamine

	2008 (osaline koormus)	Norm (keskm)	Taani/2007	Taani/2014
	TTÜ 2008	PN; juhend	0,6 MPa, D	0,9 MPa, S
AR	1,68	2,00	2,23	3,76
VA	1,11*	1,32*	1,47	2,67

*-tagasiarvutustega taandatud keskmised siirdeteguri väärtused osalise koormuse teguriga (0,752).

Järgnevalt on esitatud eriveoste algoritmi alusel leitud siirdetegurid tüüpsõidukitele. Ülevaatlik summaarne tabel kõigi raskesõidukitüüpidega, millised esinevad statistilises aruandluses, on toodud Lisas 6 (tabel 34 – arvutusprotsess; tabel 35 – tulemused).

4.3.3 Sooloveokid

Tabel 26. Siirdetegurid veokitele Taani eriveoste arvutusalgoritmiga (arvestades nii rehvitüüpi kui rõhku ja osalist koormust)

Veokid*	2V-18	3V-26	4V-32
Läbisõit (ESA, Lisa)	28404	27323	2016
Siirdetegur **	0,8	1,8	2,7
Tegur täiskoormusel 0,6 MPa	1,64	1,24	2,86
Tegur täiskoormusel 0,9 MPa	3,54	3,02	5,76
Tegur nõrgal katendil***	3,54	3,80	5,76
Kaalutud tegur osalisel koormusel	2,66	2,56	4,33

Märkused kehtivad nii käesolevale kui ka järgnevatele võrdlustabelitele.

* veoki liigi tähistusena on siin ja edaspidi näidatud telgede arv, veoki liik (V – veok, S – sadulveok, H – haagis) ja lubatud täismassi suurus tonnides – 3V-26 seega tähistab kolmeteljelist veokit täismassiga 26 t

** siirdetegurina on antud Eesti projekteerimismäärde ja kehtivates juhendites kasutatav teguri väärtus

*** nõrga katendi puhul esineb erisus ainult mitmeteljelise telikuga vedukitel, kus telgede mõju tuleb käsitleda eraldi; SS-rehvid on kasutusel nelja- ja enamateljelistel kooslustel.

Kaalujaotus on esitatud lisas. Sõidukitel, millistel esinevad ka SS-rehvid, on arvatatud siirdetegurid nii paarisrattaste kui üksikrattaste korral ning kaalutud keskmine leitud vastavuses ARK andmetel SS-rehvide esinemissagedusega.

Läbisõidu järgi kaalutud keskmine siirdetegur haagiseta (raske)veokitele tõuseb seniselt 1,34 tasemelt 2,67-ni. Oleme eeldanud, et neljateljelise veoauto tagatelgedel on 20% juhtudel üksikrattad.

4.3.4 Autorongid

Tabel 27. Siirdetegurid autorongidele

Autorongid	2V2H-36	2S3H-40	3S3H-44
Läbisõit	7464	293516	60880+9839
Siirdetegur	1,1	2,05	4,8
Tegur täiskoormusel 0,6 MPa	2,45	2,27	1,20
Tegur täiskoormusel 0,9 MPa	5,20	5,09	3,30
Tegur nõrgal katendil	6,04	6,49	5,03
Kaalutud tegur osalisel koormusel	4,23	4,35	4,16

Läbisõidu järgi kaalutud keskmine autorongidele tõuseb tasemele 3,76.

Kehtivate projekteerimismäärde järgi on autorongide keskmine siirdetegur 2,00 (mis arvestab osalist koormust) kuid kaaludes kehtiva siirdeteguri statistilise läbisõiduga, saame keskmiseks siirdeteguriks 2,55 ilma rehvirõhku muutmata.

4.3.5 Ülekoormuse ja ettenähtust suurema rehvirõhu mõju siirdetegurile

Euroopa Komisjon on esitanud hinnangu, et ca 1/3 raskeveokitest on ülekoormatud – kas on ületatud lubatud täismassi piir või üksiku telje ehk teliku lubatud koormuse piir. Käesolevas töös esitatud siirdetegurid ei arvesta lubatud piirväärtuste võimaliku ületamisega rohkem, kui seda on arvestatud osalise koormuse mõju arvestuses. Siiski on ka Eestis andmeid vägagi suurtest lubatud piiride ületamistest – 2015 kaitstud magistratöös (Heljus Saks) on uuritud Muuga sadama tee

kaalupunkti andmeid mis annavad alust tõsisemaks analüüsiks laiema kaalupunktide võrgu andmetel. Tähelepanu tuleks aga juhtida asjaolule, et vaid Muuga sadama kaalupunkti konstruktsioon võimaldab automaatselt eristada teljed, millistel on kasutatud paarisrehve, telgedest, millised on varustatud üksikrehvidega (sealhulgas, super-single tüüp).

Ülekoormus enamlevinud sadulrongi tüübil (2S3H) tingimusel et ükski telg ei ole ülekoormatud, kuid täismass ületatakse (43 tonni lubatud 40 asemel ehk ülekoormus 1,075 korda) - tavapärasel katendil (rehvirõhk 0,9) tõuseb siirdetegur 5,19/6,39 (tugev katend / nõrk katend) tasemelt 6,59/8,30 tasemele ehk 1,27...1,3 korda.

Rehvirõhu tõstmine tasemele 1,0 MPa (11%) suurendab samas olukorras siirdeteguri tasemele 7,76/9,82 (täiendavalt 18%) mis tõenäoliselt esineb ka seetõttu, et kompenseerida suuremat koormust. Seega tõuseb 7,5% ülekoormuse ja 11% rehvirõhu tõstmise tulemusel siirdetegur kokku 1,495 korda ehk 50%.

Võrdleme ülekoormuse mõju ka tavapärase kolmeteljelise raskeveoki korral – lubatud teljekoormuste piires võiks viia juhttelje koormuse 10 tonnini säilitades 19-tonnise paaristelje – siirdetegur tõuseks 3-tonnise lisakoormusega tasemelt 1,91/3,14 tasemele 4,14/6,93 (enam kui kahekordseks). Lisades sellele veel suurema rehvisurve (1,0 MPa) tõuseb siirdetegur tasemele 8,25/9,17 ehk algsega (0,6 MPa) võrreldes 3-4 kordseks.

4.3.6 Erandina lubatud autorongid

Tabel 28. Metsaveokite ja merekonteineri veoks kasutatavate sõidukite siirdetegurid (taandatud osalisele koormusele)

Autorongid	3V3H-48	3V4H-52	2V3H-44 ISO
Läbisõit	/mets/	/mets/	/konteiner/
Siirdetegur	4,8	4,8	2,05
Jaotus	6,5s-18,5d-6,5s-18,5d	7s-19d-13d-13d	7,5s-11,5d-25s
0,6 MPa	2,17/3,10	1,71/2,45	2,65/3,17
0,9 MPa	4,73/6,19=5,46	3,61/4,79=4,20	7,00/9,01=8,00

Arvestades, et metsaveo autorongid peavad liiklema ka teedeta maastikul või metsateedel, on neil eelistatud muudetava rehvisurvega veokid. Magistraalteedel kasutatakse ka neil siiski suuremat rehvisurvet. Võrdlusest nähtub, et 40-tonnise koosluse 2S3H siirdetegur 4,35 on suurem kui pilootprojektina lubatud 7-teljelise (3V4H) 52 tonnise siirdetegur 4,20. Samas 6-teljelise 48-tonnise (3V3H) metsaveoki siirdetegur 5,46 on siiski suurem. Et erandina on Euroopa Liidus lubatud 2S3H 5-teljelisele kooslusele ka 44 tonni ISO merekonteinerite veol, siis sellise koosluse siirdetegur 8,0 on suurem ka kõige raskemast metsaveoks lubatud kooslusest.

40-tonnist sadulrongi kaheteljelise vedukiga (2S3H) on ka teistes uuringutes peetud kõige enam tee konstruktsiooni kahjustavaks. Lähiaastatel ei ole tõenäoline sellise koosluse keelustamine, seetõttu võiks siit järeldada et teekonstruktsioonid tulebki projekteerida just seda sõidukiliiki arvestades ja eeldades, et tulevikus võimalikult lubatavad suuremad kooslused saavad olema väiksema mõjuga selle sõidukiliigiga võrreldes.

4.4 ETTEPANEK

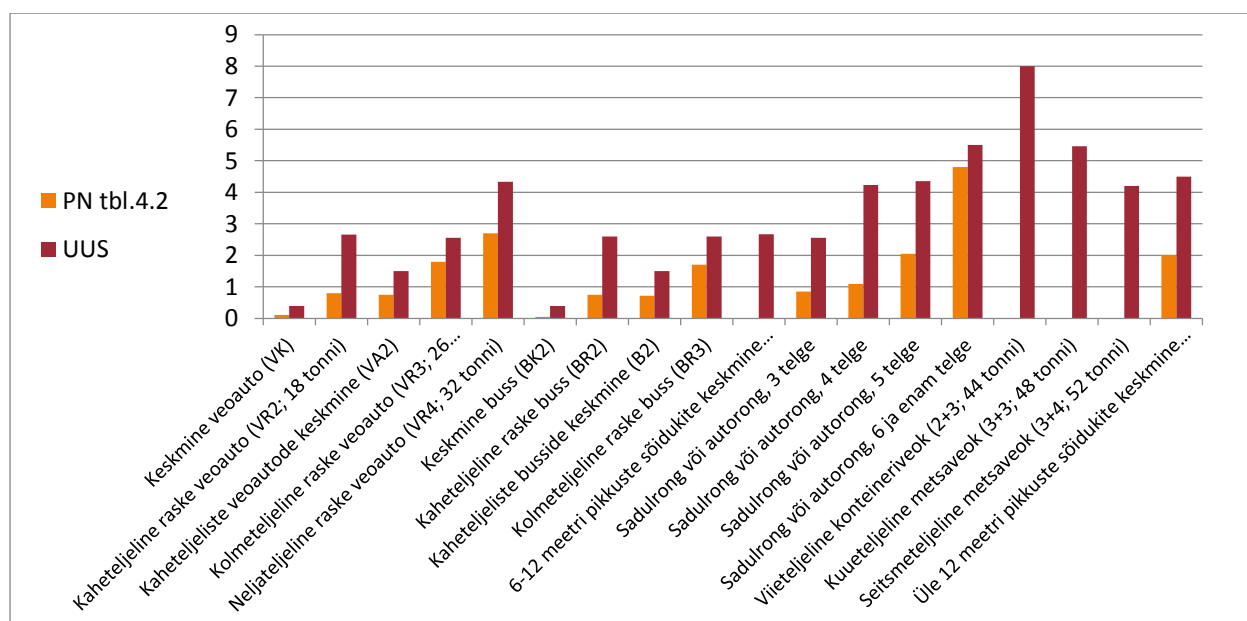
Tuginedes Taani arvutusalgorithmile ning sõidukite keskmisele koormatusele varasemate siirdeteguri uuringute baasil, on seega koostatud alljärgnev ettepanek siirdetegurite muutmiseks (kaldkirjas on esitatud tuletatud väärtused):

Tabel 29. Ettepanek siirdetegurite kehtestamiseks

Liik	Teljed	PN tbl.4.2	UUS**
Keskmine veoauto (VK)	1+1	0,11	0,4
Kaheteljeline raske veoauto (VR2; 18 tonni)	1+1	0,8	2,66
Kaheteljeliste veoautode keskmine (VA2)	1+1	0,75	1,5
Kolmeteljeline raske veoauto (VR3; 26 tonni)	1+2	1,8	2,56
Neljateljeline raske veoauto (VR4; 32 tonni)	2+2	2,7	4,33
Keskmine buss (BK2)	1+1	0,05	0,4
Kaheteljeline raske buss (BR2)	1+1	0,75	2,6
Kaheteljeliste busside keskmine (B2)	1+1	0,72	1,5
Kolmeteljeline raske buss (BR3)	1+2	1,7	2,6
6-12 meetri pikkuste sõidukite keskmine (VA/AB)			2,67
Sadulrong või autorong, 3 telge	3	0,85	2,56
Sadulrong või autorong, 4 telge (36t)	4	1,1	4,23
Sadulrong või autorong, 5 telge* (40t)	5	2,05	4,35
Sadulrong või autorong, 6 ja enam telge (44t)	6 ja enam	4,8	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)		2	3,76

* Sadulrong, 5 telge, ISO konteinerite veol 44 tonni – siirdetegur 8,0 (100% koormatud)

** osalise koormusega, vastavalt varasema teguri suhtele täiskoormusele vastavas tegurisse (75%)



Joonis 9. Siirdeteguri senine väärtus ja ettepanek

4.5 ETTEPANEKUD JA ARENDUSVAJADUSED

4.5.1 Sõidukiliituse vastavus loendusandmetele

Siirdetegurid tuginevad teoreetilisele kaalujaotusele ja ei arvesta võimalikku ülekaalu ega tõenäolist kaalujaotuse muutust eelmise siirdeteguri uuringu ajast möödunud 8 aasta jooksul. Lisaks tugineb eelnenud töö sisuliselt ühe kaalupunkti ühe aasta andmetel.

On võimalik, et autorongide kaalujaotus (osaline koormus) erineb oluliselt sooloveokite jaotusest ning see võib mõjutada sooloveokite siirdetegurit (põhjus, miks ettepanekus sooloveokite siirdeteguri kasv tundub eriti suur). Täna on Teede Tehnokeskusel kasutada oluliselt pikem aegrida ning ka kaalupunktide arv on tõusnud, mis võimaldab detailsemat analüüsi praktiliste mõõtmistulemuste baasilt.

Tabel 30. Voolikloendusel kasutatav klassifikaator (FHWA13)

TLP (FHWA13)	SAPA	VAAB	AR
Klass 1	Motorattas		
Klass 2	Sõiduauto, Sõiduauto + haagis		
Klass 3	Pakiauto, Väikebuss, Väike veoauto		
Klass 4		Buss	
Klass 5		Veoauto, 2 telge	
Klass 6		Veoauto, 3 telge	
Klass 7		Veoauto, 4 ja rohkem	
Klass 8			Sadulrong, kuni 4
Klass 9			Sadulrong, 5 telge
Klass 10			Sadulrong, 6 ja rohkem
Klass 11			Veoauto + haagis, kuni 5
Klass 12			Veoauto + haagis, 6 telge
Klass 13			Veoauto + haagis, 7 ja rohkem

Tabel 31. WIM (weight-in-motion) klassifikaator

KP (GB20)	SAPA	VAAB	AR
Klass 0	Motoratas		
Klass 1	Sõiduauto		
Klass 2	Pakiauto, Väikebuss, Väike veoauto		
Klass 21	Sõiduauto + haagis, Pakiauto + haagis		
Klass 31		Veoauto, 2 telge	
Klass 32		Veoauto, 3 telge	
Klass 33		Veoauto, 4 telge	
Klass 41			Veoauto, 2 telge + haagis, 1 või 2 telge
Klass 42			Veoauto, 2 telge + haagis, 3 telge
Klass 43			Veoauto, 3 telge + haagis, 2 telge
Klass 44			Veoauto, 3 telge + haagis, 3 telge
Klass 51			Sadulrong 2+1 telge
Klass 52			Sadulrong 2+2 telge
Klass 53			Sadulrong 3+1 telge
Klass 54			Sadulrong 3+2 telge
Klass 55			Sadulrong 2+3 telge
Klass 56			Sadulrong 3+3 telge
Klass 61		Buss, 2 või 3 telge	
Klass 7			Sadulrong 7 telge ja rohkem

WIM kasutab sõidukiliigitust 19 klassi, kuid teede projekteerijal on kasutada liigitus 13 klassile. Seetõttu tuleb leida tegurid just selles liigituses, mida on praktikas võimalik kasutada (ühene üleminek on võimalik – WIM klassifikaatoris puudub vaid vaste 7-teljelisele veoauto ja haagise kooslusele). Üleminek püsiloenduspunktide 10-liigilisest klassifikaatorist on komplitseeritum.

Käesolevas töös on aluseks pigem teoreetiline lähenemine, osalise koormuse suhtarv tuleneb autorongide keskmise analüüsist. Seetõttu tuleb detailsemalt analüüsida kaalupunktides fikseeritud sõidukiliikide teljekoormuste jagunemist ning mitte lähtuda seejuures antud grupi keskmisest vaid grupeerida kaalupunktis fikseeritud sõidukid liigi piires täismassilt näiteks viide võrdsesse (20%) gruppi ning arvutada siirdetegurid igale grupile eraldi ja saadud tulemuse alusel koostada kaalutud siirdetegurid.

4.5.2 Vajaliku elastsusmooduli arvutusalgoritm ja varutegurite süsteem

Siirdeteguri suurendamine ilma elastsusmooduli algoritmi korrektuurita suurendab normtelgede arvu kõigis teeliikides ja klassides. Muudatuse mõju konstruktsioonile on tagasihoidlik eriti väga suure koormussageduse korral – ODN üleminekul kumulatiivsele telgede arvestusele korrigeeriti seetõttu elastsusmooduli arvutusvalemit, sealhulgas mooduli graafiku tõusunurka, ning täiendati varutegurite süsteemi.

Seetõttu on tarvilik analüüsida ja asendada ka meie süsteemis arvutusvalem et minna üle kumulatiivsele telgede arvestusele ja täpsustada varutegurite süsteemi.

5 KORRIGEERITUD SIIRDETEGURITE MÕJU KATENDI MAKSUMUSELE

5.1.1 Arvutuse alused

Eelnenud osas määratleti keskmised siirdetegurid senikehtiva regulatsiooni järgi (puudusid keskväärtused 6-12 meetri pikkustele sõidukitele VAAB klassis) ja samadel tingimustel korrigeeritud siirdetegurite järgi (üldistused, kaalutud keskmise jaotuses vastavalt Statistikaameti läbisõiduinfole, vt Lisa 5). Katendikonstruktsioonide osas võetakse aluseks 2014 liiklussageduste järgi grupeeritud teedevõrk (Lisa 1) ja tänased liiklussagedused, millest tulenevalt on leitud normikohane koormussagedus aastaks 2034.

Põhimõtteliselt ei ole keerukas ka kogu konstruktsiooni tööiga paremini prognoosida. Et katendi ülakihtide uuendamiseks sobilikku remix-meetodit (ehk selle variatsioone) saab kasutada maksimaalselt kaks korda ning kulumiskihi asendamine põhiteedel peaks toimuma 2 cm roopasügavuse saavutamisel, on konstruktsiooni tööiga ca 30 aastat ka saavutatav, arvestades etapiviisilises ehituses nii remixi kui ülekattega. Piisav asfaltkatte paksus kaitseb ka killustikalust purunemise eest.

Valime võrdluseks esialgu ühe aluspinnase – kerge saviliiv. Liiklusprognoosi osas eeldame, et raskeliikluse kasv on sama üldise liikluse kasvuga ja prognoos 20 aasta kohta võrdub viimase 10 aasta arenguga. See eeldus tegelikult ei kehti (eriti linnalähialadel aga ka suure raskeliikluse osakaaluga teelõikudel), raskeliikluse areng on olnud oluliselt kiirem kuid käesoleva töö raames piirdume projekteerimismnormi kohase prognoosiga. Lisaks eeldame, et tee klass ei muutu – see määrab tee laiuse. Konstruktsioonis on arvestatud asfaltkatte ja killustikalusega (ei ole arvestatud stabiliseeritud aluse ja mustkillustiku kasutamisega) ning drenkihiga keskliivast. Tardkivikillustik on killustikaluse ülakihi arvestatud juhul, kui nõutud katendi kandevõime ületab 275 MPa taset.

Kasutatud on 2015. aastaks TTÜ Logistikainstituudi poolt prognoositud tööde hinnatasemeid.

Detailne arvutustabel on esitatud Lisas 7.

Tabel 32. Siirdeteguri muutmise mõju riigiteede arvutuslikule koormusele

	Põhimaantee	Tugimaantee	Kõrvalmaantee	Riigiteed kokku
Raskeliiklus (VAAB+AR) 2014	182+493	39+80	18+20	
Raskeliiklus (VAAB+AR) 2034	234+638	43+89	18+19	
Raskeliikluse kasv 20 aastaga	1,293	1,120	0,949	1,022
20 a koormus 2034 (nt, senine S)	10,264 M telge	1,725 M telge	0,456 M telge	1,855 M telge
20 a koormus 2034 (nt, uus S)	19,583 M telge	3,112 M telge	0,881 M telge	3,550 M telge
Arvutusliku koormuse kasv (S)	1,908	1,915	1,934	1,913
Konstruktsiooni kallinemine*	7,1% / 8,1%	6,0% / 5,9%	1,8% / 1,8%	4,1% / 3,8%

*Konstruktsiooni kallinemine on antud kahel juhul, suurendades aluse paksust (asfaldikihid ei muutu) ja suurendades asfaldi alakihi paksust (alus ei muutu).

Tabelis on toodud projekteerimismnormides sätestatud prognoosimetoodika alusel leitud koormuse kasv 20 aastaga (VAAB = veoautod ja autobussid, pikkusega 6...12 m; AR = kõik autorongid, pikkusega üle 12 meetri). Võrreldakse 20 aasta summaarset koormust enamkoormatud sõidurajal seniste siirdeteguritega (VAAB 1,32 ja AR 2,00) ja uutega (VAAB 2,67 ja AR 3,76). Toodud arvutusliku koormuse kasv tuleneb AINULT siirdeteguri muutusest. Põhimõtteliselt ei ole projekteerimismnormide

metoodika (10=20) kohandatav mujal, kui ainult tee klassi määramisel. On kahtlemata võimalik kasutada baasprognoosi metoodikat, kuid see vajaks esmalt täiendamist et arvestada linnalähialade erisusi, rahvusvaheliste trasside raskeliikluse tegelikku kasvu ja kaugemate kohalike teede taandarengut.

5.1.2 Järeldused

Siirdeteguri tõusu mõjul suureneb arvestuslik normtelgede arv summaarselt riigimaanteedel 1,91 korda. Võrdluses on eeldatud „vana“ siirdeteguri väärtuseks sooloveokitel 1,32 ja autorongidel 2,00 ja „uue“ väärtuseks vastavalt 2,67 ja 3,76.

Riigiteede keskmisena tõuseb koormussagedus tasemelt 196 normtelge tasemele 375 normtelge enamkoormatud sõidurajale, selle tulemusena tõuseb nõutud katendi kandevõime (kaalutud keskmisena) 198 MPa tasemelt 208 MPa tasemele (ainult 10 MPa) ning katendikonstruktsiooni maksumus vaid 4%. Nõutud kandevõime tõus on üldjuhul 19 MPa I...IV klassi põhi- ja tugimaanteedel, väiksem kõrvalmaanteedel ning keskmise näitaja väiksem muutus tuleneb madala klassi tugimaanteede suurest osakaalust, kus rakendub ka tee klassi kohane minimaalse kandevõime nõue.

Suurema kandevõimenõude (19 MPa) tagamiseks on võrreldud kaht alternatiivi – suurendada alumist asfaldikihti (reeglina AC base) 1-2 cm võrra või suurendades killustikaluse paksust reeglina 7-8 cm võrra.

Kasutatud ühikhindade tingimustes on ehitusmaksumuse hinnatõus, jällegi riigimaanteede kaalutud keskmisena, aluse paksuse suurendamisel 4,1% ja asfaltkatte paksuse suurendamisel 3,8%. Et mõju sõltub ka liiklussagedusest, on põhimaanteede keskmine hinnatõus vastavalt 8,1 või 7,1% ja tugimaanteedel vastavalt 6,0 või 5,9% ning kõrvalmaanteedel 1,8%.

Kogu riigiteede kaalutud keskmine katendi ehitusmaksumus (eeldades asfaltkatet kogu ulatuses) tõuseb 2,47 miljardilt 2,57 miljardile ehk 4%.

Ühelt poolt on tulemust võimalik optimeerida võttes kasutusele stabiliseeritud alused (väheneb vajadus asfaldikihtide osas), kuid teiselt poolt on tõenäoline raskeliikluse kasv absoluutväärtuses siiski oluliselt suurem kui projekteerimismisnormide järgne üldise liikluse kasv.

6 KATENDIKIHTIDE EHTUSLIKE LUBATUD VIGADE MÕJU KANDEVÕIMELE

Lubatud vigade küsimust tuleks käsitleda eraldi ehituslike ebatäpsuste osas ja eraldi projekteerimise poole osas (kihtide paksuste vastavus sellekohaste regulatsioonidega).

6.1 EHTUSLIKUD EBATÄPSUSED

Jaanus Taro käsitles oma magistritöös (Elastsete teekatendite võrdlev analüüs, TTÜ 2013) laia teemadevaldkonda, muuhulgas kompleksstabiliseerimise eeliseid, kulumisvaru ja lubatud tolerantside mõju katendi tööeale ja ühtlaseteraliste liivadega seonduvat.

Materjalikihtide omaduste stabiilsuse teema

- Liivakihi eristamine aluspinnasest kas geotekstiili või tehnoloogilise kihiga, mis takistaks peenosiste liikumist konstruktsioonis ülespoole – drenakihi saastudes aluspinnase peenosistega, mis võivad hõlpsasti nii ehitusaegselt tihendamise protsessis või eksploatatsiooni käigus liikuda veega üles, kahaneb drenakihi filtratsioon kiiresti.
- Liivakihi ja killustikaluse eristamine kas geotekstiili või tehnoloogilise kihiga (näiteks kruusliiv, võimalik on ka sõelmete kasutamine kuid väga piiratud kihipaksusega ja lisatingimustega seondatult) tagaks ehituslikult ettenähtud kihipaksuste toimivuse, samuti killustikaluse filtratsiooni mis on tõenäoliselt suurusjärgus 300-900 m/ööp. Killustikaluse eristamine drenakihist ja aluspinnasest tagab killustikaluse tööväime, seda nii konstruktsioonist vee väljavõtmise funktsiooni osas kui ka otseselt killustiku terastikulise koostise ja sellega seotud tugevusnäitajad. Kihtide eristamine parandab ka tegelikku kontrolli täpsust ja on mõistetav ehitajate poolt sest tegelikult vähendab killustiku ülekulu selles osas, millises killustik seguneb liivaga. Küsimus seega pole otseselt tolerantsis vaid pigem killustikaluse paksuse määramisest ebamäärasuse kõrvaldamises, seda lisaks omaduste stabiilsusele.

Otseselt tolerantside teema

- Asfaldikihtide kogupaksuse miinimumväärtus ilma negatiivse tolerantsita – kui alumistes kihtides esineb õhemaid kohti, kompenseeritakse see kallimate ja tugevamate ülakihtide täiendavas paksuses.
Taro töös võrreldi asfaltkatte keskmise paksuse tolerantsi 5% järgset kandevõime puudujääki, mis oli 264,6 MPa tasemelt 260,9 MPa tasemele (3,7 MPa), see vastas katendi tööea kahanemisele 15-lt 13 aastale.
- Analüüsida tuleb seda kuivõrd mõjutab kandevõimet ja ressursi lubatud piires poorse asfaldi paksema kihi korral tolerantsi piires õhem ülakiht.

Materjalide asendamise teema

- Tavaliselt nähakse projektis ette keskliiva (120 MPa) kasutus drenakihis. Lihtsalt peenemateralise osa suurenemisel võib olla tegemist peenliivaga (100 MPa), ühetaolise terastikulise koostisega materjali puhul võib elastsusmoodul langeda 75 MPa tasemele ja seda kõigi terasuuruste puhul (kuigi valdavalt on siiski tegemist kesk- või jämeliivaga, harvem kruusliivaga). Seega, tuleb igal juhul võrrelda kasutatud materjali normikohast elastsusmoodulit projektis ettenähtud elastsusmooduliga ning erisuse korral teostada kontrollarvutus. Positiivse tulemuse korral on tegemist ressursi varuga, negatiivse korral puudujäägiga. Kui tegemist on materjaliga (vastab määratlusele „peenliiv“, „keskliiv“, „jämeliiv“, „kruusliiv“, „kruuspinna“) millele on juhendis 2001-52 ette nähtud materjali arvutusparameetrid ning sõelkõvera alusel on tegemist külma kindla materjaliga, ei sõltu katendi ressurss materjali filtratsioonist. Kontrollarvutuste tulemusena võib olla vajalik

suurendada vastava materjali kihipaksust et tagada kogu konstruktsiooni arvutuslik kandevõime. Kandevõime suurendamiseks on võimalik ka suurendada vastaval kihil paiknevate ülakihtide paksusi, mis projektkõrguse säilitamisel võib tuua kaasa nõrgemate alakihtide paksuse kahandamise vajaduse, seda tehnoloogiliselt lubatud piirides.

- Killustiku lubatust suurema peenosiste sisaldusega kaasnevalt tuleb materjal ümber kvalifitseerida kruuspinnaseks või leida materjalile arvutusparameetrid vastavuses sõelkõverale (Soome normidest) ehk nomogrammile (VSN). Peenosise sisaldus ei tohi siiski ületada külmakindluse määratluse sõelkõveras antud välja. Juhul, kui paekillustik eksploatatsiooni käigus laguneb ja selle tulemusel on killustikukihi ülaosas tegemist näiteks 5 cm ulatuses savika pinnasega, alakihis siiski killustikuga, esineb tõsine külmakerkeoht. Seetõttu on tarvilik killustikaluse tihendamise järel võtta proovid ja kontrollida segu vastavust sõelkõverale.

6.2 KONTROLLARVUTUSED LUBATUD HÄLVETE PIIRES

Analüüsi alus – kehtivad nõuded

Määrus „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“ (jõustus 10.08.2015)

- §6 (1) 2) – tee telje kõrgus projektist võib erineda 50 mm
- §9 (12) 1) – muldkeha telje kõrgus projektist võib erineda 50 mm
- §11 (7) 1) – drenikihi telje kõrgus projektist võib erineda 50 mm
- §12 (8) 1) – killustikaluse telje kõrgus projektist võib erineda 50 mm; 4) kihi kolme punkti keskmine paksus võib olla projektsest väiksem 10%, üksikmõõtmise tulemus kuni 30 mm
- §13 (12) 1) stabiliseeritud kihi keskmine paksus ei tohi olla projektsest väiksem kui 10%, üksikmõõtmise tulemus kuni 30 mm; 3) – stabiliseeritud kihi telje kõrgus projektist võib erineda 50 mm
- §20 (12) 1) asfaltkatte kihi kõrgus teljel võib erineda projektsest 50 mm; 3) iga kihi keskmine paksus ei tohi olla projektsest väiksem kui 10%, üksikmõõtmises lubatud õhem kuni 10 mm; asfaldikihtide summaarne paksus ei või olla väiksem projektsest

Asfaltkatete ehitusjuhend 2014-15.

- P4.1.1 – tee telje kõrgus võib erineda projektsest 20 mm

Killustikust katendikihtide ehitamise juhised 2012-2

- P4.4.4 1) – lubatud hälve telje kõrguses 30 mm; 5) ristlõike kolme punkti keskmine paksus võib olla projektsest väiksem kuni 10%, üksikmõõtmisel kuni 30 mm

Analüüsides kõige ebasoodsamat olukorda katendi kandevõime aspektist, on ilmne, et:

- Asfaldikihtide summaarse paksuse piirang (ei tohi olla väiksem projektsest) osutub määravaks ning küsimus saab olla erinevate asfaldikihtide paksuse erisuses kogupaksuse piires – alakihis (base) luuakse reserv, mis kasutatakse ülahihis (bin, surf/SMA) iga kihi 10% paksuse kahandamise teel.
- Aluse paksus võib olla 10% projektsest väiksem (20 cm paksusel on vahe 2 cm), telje kõrgus 50 mm projektsest väiksem
- Drenikihi paksust ei reguleerita, kuid kõrgus ei tohi erineda üle 50 mm – kuna aluse paksuses kasutasime ära 20 mm, siis on siin võimalik kasutada 80 mm. Seda seni, kuniks

dreenkihi paksus pole reguleeritud. Kuuldavasti on Maanteeamet siiski hankedokumentides sätestanud ka drenkihi suhtes lubatud paksuspiiri.

- Muldkeha telje kõrguses loome reservi 50 mm mille ulatuses on võimalik ülejäänud kihipaksustes jõuda lõpuks lubatud -50 kõrgusarvuni – kogu konstruktsioon võib teoorias olla kuni 10 cm õhem.

KAP ja ressursi hindamise põhimõte

1. Katendi ressursi määrab kõige nõrgem lüli. Seega, kas kandevõime, tõmbepinge asfaldi alakihi või nihkepinge aluspinnases.
2. Varasemates katsetustes on esinenud ka piirväärtust nihkepingetes sidumata kihtides (liiv), kuid KAP ei kontrolli ei staatikat ega nihkepingeid asfaldikihtides. Viimane mängib olulist rolli roobaste tekkes ja arengus.
3. Probleemid on külmakergete arvestuses kui veetase osutub kõrgemaks kui 125 cm katte pinnast – algoritmid ei käitu adekvaatselt ning juhenditest peaks olema võimalik leida lahendusi, mis tuleks KAPis realiseerida erijuhtumi jaoks.
4. Lisaks puudub KAPis lahendus remondiolukorraks, kus tugevam kiht paikneb nõrgemate vahel, või ka olukorraks, kus konstruktsioon rajatakse kaljupinnasele (paepealsele) – ka sellele on algoritmid olemas, kuigi nende toimimine ei ole kontrollitud.
5. Mittekorrektset on lahendatud paksude kihtide teema – kihipaksust 75 cm ja üle ei tohiks aktsepteerida ning sellele lähedase paksuse juures peaks kandevõime väärtus lähenema materjali elastsusmooduli väärtusele. Soome süsteem piirab sidumata kihtide paksused 20-30 cm-ga, KAPis on sama elastsusmooduliga kahe kihi kasutamine keelatud.

Kontrollarvutused – lubatud hälved eraldi ja koos

- Baasvariant – I klassi tee SMA 5cm – AC bin 5 cm – AC base 7 cm – killustik 30 cm – drenkiht 30 cm jämedal kergel saviliival
 - E 317,8 MPa – Q 5034 normtelge – Ressurss 25,2 miljonit telge
- Asfaldi kulumiskiht -0,5 cm (10%) ja aluskiht +0,5 cm – asfaldi paksus on tasakaalus
 - E 307,9 – Q 3624 – R 18,1 miljonit telge ehk 72% projektsest (hinnavõit 1,7%)
- Killustikaluse kiht -3,0 cm (10%)
 - E 308,3 – Q 3670 – R 18,4 miljonit telge ehk 73% projektsest (hinnavõit 2,5%)
- Dreenkiht -5,0 cm
 - E 313,0 – Q 3295 – R 16,5 miljonit telge ehk 65% projektsest (hinnavõit 1%)
- Dreenkihi materjali asendus – keskliiva (E-120) asendamisel peenliivaga (E-100)
 - E 303,5 – Q 3121 – R 15,6 miljonit telge ehk 62% projektsest (hinnavõit puudub)
- Dreenkihi materjali asendus – keskliiva (E-120) asendamisel ühtlaseteralise liivaga (E-75) mis on kahjuks esinenud seetõttu, et ühtlaseteraline liiv tagab nõutud filtratsiooni väärtuse.
 - E 276,6 – Q 1273 – R 6,4 miljonit telge ehk 25% projektsest (hinnavõit puudub)
- Teoreetiline ebasoodsaim kombinatsioon, muldkeha 5 cm kõrgem, dren -7; killustik -3; asfalt tasakaalus
 - E 290,6 – Q 2029 – R 10,2 miljonit telge ehk 40% ressursist (hinnavõit 5,5%)

Tulemused lühidalt tabeli kujul:

Tabel 33. Katendi ressursi muutus lubatud tolerantside puhul (I klassi tee)

I klassi tee	Projekt	Asfalt	Killustik	Dreen	Kokku*
SMA cm	5,0	4,5	5,0	5,0	4,5
AC bin cm	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
AC base cm	7,0	7,5	7,0	7,0	7,5
Killustik cm	30,0	30,0	27,0	30,0	27,0
Dreenkiht cm	30,0	30,0	30,0	25,0	23,0
E (MPa)	317,8	307,9 (97%)	308,3 (97%)	313,0 (98%)	290,6 (91%)
Q (normtelg)	5034	3624 (72%)	3670 (73%)	3295 (65%)	2029 (40%)
Ressurss (milj.telge)	25,2 M	18,1 M	18,4 M	16,5 M	10,2 M
Hind (€/m ²)	47,4 (100%)	46,6 (98%)	46,2 (97%)	46,9 (99%)	44,8 (94%)

*Kokku – analüüsitud teoreetilist võimalust, kui KÕIK tolerantsid rakenduvad ebasoodsaimal viisil – selle tulemus ei ole komponentide aritmeetiline summa.

Tabel 34. Katendi ressursi muutus lubatud tolerantside puhul (III klassi tee)

III klassi tee	Projekt	Asfalt	Killustik	Dreen	Kokku
AC surf cm	5,0	4,5	5,0	5,0	4,5
AC base cm	7,0	7,5	7,0	7,0	7,5
Killustik cm	30,0	30,0	27,0	30,0	27,0
Dreenkiht cm	25,0	25,0	25,0	20,0	23,0
E (MPa)	256,8	251,7 (98%)	249,8 (97%)	252,6 (98%)	240,1 (93%)
Q (normtelg)	1133	946 (83%)	886 (78%)	977 (86%)	628 (55%)
Ressurss (milj.telge)	5,7 M	4,7 M	4,4 M	4,9 M	3,1 M
Hind (€/m ²)	29,8 (100%)	29,4 (99%)	28,9 (97%)	29,3 (98%)	28,1 (94%)

Eeltoodud kahe näite baasil ei saa kõike üldistada – konstruktsioonid on valitud selliselt, et piiravaks osutus kandevõime. On näha, et kihipaksuste lubatud piirväärtuste raames võib säästa üksiku kihi osas rahaliselt kuni 3% katendi maksumusest, optimeerides kõik kihid lubatu piires, ulatub sääst 5,7%-ni kuid ressursi kahanemiseks kujuneb üksiku kihi korral 14...35% ja juhul, kui lubatud erisused liituvad kõige ebasoodsamal viisil, on ressursi kahanemise ulatus 45...60% projekteeritust. Sellisel juhul ammendub ressurss küll pärast garantiiaega, kuid paariprotsendise säästu nimel ei ole õige kahandada katendi tööiga kahekordselt.

Suuremat kahju kui kihipaksused, võib põhjustada materjali vale määratlus – keskliiva (E-120 MPa) asemel peenliiva (E-100 MPa) kasutamisel (projektsetes kihipaksustes) jääb konstruktsiooni ressursiks vaid 62...72% projektsest, ühtlaseteralise liiva korral (E-75 MPa) on ressurss 25...36% projektsest.

Analüüsimise täiendavalt TTÜ töös on tehtud ettepanekut ühtlaseteralise materjali puhul kahandada E-moodulit ca 10% juhul kui $2 < C_u < 3$ ning liiva, mille $C_u < 2$, teedeehituses sellisel kujul mitte kasutada.

Tabel 35. Riskid ühtlaseteralise liiva kasutamisest ning paekivikillustiku elastsusmooduli langetamise mõju

I klassi tee	Projekt	Paekillustik E240 (võrdpaks)	Paekillustik E240 (võrdtugev)	Dreen E105 (Cu 2..3)	Dreen (Cu<2)
--------------	---------	------------------------------	-------------------------------	----------------------	--------------

SMA cm	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
AC bin cm	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
AC base cm	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Graniitkillustik cm	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Paekillustik	20,0	20,0	25,0	20,0	20,0
Dreenkiht cm	30,0	30,0	28,0	30,0	30,0
E (MPa)	317,8	304,0 (96%)	318,3 (100%)	307,8 (97%)	276,6 (87%)
Q (normtelg)	5034	3175 (63%)	5131 (102%)	3613 (72%)	1273 (25%)
Ressurss (milj.telge)	25,2 M	15,9 M	25,7 M	18,4 M	6,4 M
Hind (€/m ²)	47,4 (100%)	47,0 (100%)	51,6 (109%)	47,4 (100%)	47,3 (100%)

Siit tuleneb, et paekillustiku elastsusmooduli alandamisega 240 MPa-ni langeb projekteeritu kandevõime 4%, arvutuslik ressurss antud konkreetsel konstruktsioonil 37% ja võrdtugev konstruktsioon kujuneb paksemaks (+5 cm killustikku) ja kallimaks 8,9%. Võrdlus on teostatud ainult suure koormusega I klassi teelõigu näitel.

Dreenkihis mõõdukalt ühtlaseteralise liiva kasutamisel kaotame kandevõimes 3% ja ressursis 28%.

Järelikult tuleks soosida materjalide asendust tugevamate materjalidega – kui karjäärast pakutav liiv (tavaliselt projektis keskliiv) on ühtlaseteraline, tuleks eelistada kruusliiva, kruusa või koguni killustikku. Vajab täpsemat uurimist, kuid eksperthinnangul on võimalik ressursi kadu vähe filtreeruva materjali kasutamisest oluliselt väiksem kui ühtlaseteralise materjali kasutamist tulenev kadu. Et aluse killustiku nõuded ei muutu, võib dreenkihis kasutada nõrgemat fraktsioneeritud killustikku (LA40), kindlasti ei tohiks dreenkihis kasutada peenosistega killustikuliike (0/32 jms).

Igal juhul ei tohiks takistada projektis ettenähtust suurema elastsusmooduliga materjali kasutamist konstruktsioonis (keskliiva asendamine kruusliiva või jämeliivaga; peenliiva asendamine keskliivaga jne) mida on paraku Maanteeameti 2015 aasta ehitusobjektidel juhtunud rohkem kui korra.

6.3 MITMETIMÕISTETAVUSED PROJEKTEERIMISNORMIDES JA JUHENDITES

Käesoleva töö raames ei ole võimalik kõigile tähelepanekutele esitada korrektseid lahendusettepanekuid. See vajab materjalide põhjalikumalt läbitöötamist ja konsultatsioone praktikutega, et vältida läbimõtlemata lahendusettepanekute ennatlikku juurutamist.

Kihi laius

Nii remondi kui uusehitise korral tuleb selgelt rõhutada, et dreenivad kihid rajatakse täislaiuses ja viiakse välja muldkeha nõlvale, tagades sel teel vee väljapääsu konstruktsioonist. Kui killustikalusel on ka dreeniv funktsioon, rajatakse ka killustikalus muldele täies laiuses, tee muldkeha nõlvani. Konstruktsioonikihte nõlval võib katta vaid kasvumuld, selle ettenähtud paksuses. Otsene mõju kandevõimele puudub, kaudne mõju esineb seeläbi, et konstruktsioon töötab niiskemas režiimis kui ette nähtud. Soome praktika mida Eestis on viimasel aastakümnel juurutatud (ettenähtud materjalidest konstruktsioon vaid otseselt katte survekoonuse piirkonnas, nõlvade osas juhusliku iseloomuga materjal), põhineb väga hästi dreeniva aluse veeläbilaskvuse piiramise vajadusel.

Dreenihi arvutusalgoritmid vajavad selgitust-täpsustust. Pikidreenide kasutamine vajab konkreetset selgitust (torudiameter, väljaviikude sagedus jms tehnilised detailid).

Asjakohased nõuded rekonstrueerimisel, filtratsioon ja külmakindlus

Arvestades projekteerimismäärde (p.1.2.3.) fikseeritud erisust uusehitise ja kapitaalremondi korral, normide 3. peatüki (muldkeha) ja 4. peatüki (katend) „asjakohaste“ nõuete osa ehk nõuete valikulist

kehtestamist, tuleb põhjalikumalt läbi töötada just remondiolukord. Tavapäraselt freesitakse asfaldikihid, kuid edasises esinevad erisused:

- Vahel (harva) lisatakse drenikiht
- Kui juba drenikiht lisatakse, ehitatakse reeglina ka killustikalus – kuid pahatihti paigaldatakse ainult stabiliseerimiseks vajalik killustik lisades sellele mõned sentimeetrid tehnoloogilist varu mis peaks vältima olemasolevast alusest killustiku nõuetele mittevastava materjali sattumise stabiliseeritavasse kihti segamise käigus
- Seejärel kasutatakse ära saadud freespuru kompleksstabiliseerimisega (selleks vajalik killustik eeltoodud aluse koostises)
- Ning lõpetuseks asfaltkate, ühe- või mitmekihilisena.

Probleemid esinevad esiteks, vana (olemasoleva) drenkihiga, millel puudub **filtratsioon**. See puudub reeglina ka vanal killustikalusel mis sisaldab palju peenosiseid, mis omakorda (0/4 fraktsiooni) filtratsioonikatset ei läbi. Seega ei ole täidetud nõue töökihi (1,5 m katte pinnast) filtratsioonist ja tihti ei täideta ka asfaltkatte all ülemise meetri külmakindluse nõuet. Uusehitisel on need nõuded reeglina täidetud. Drenkihi asendamatajätmisel põhjendatakse reeglina seda väitega, et remondil kehtivad nõuded vaid uutele materjalidele, mis on põhimõtteliselt õige juhul, kui ei ole tegemist rekonstrueerimisega. Paraku on kõik tööd, mille käigus minnakse kulumiskihist sügavamale, rekonstrueerimised.

Seetõttu, juhul, kui töökihi filtratsiooninõuded on põhjendatud ja neid remondi puhul ei täideta, ei saa eeldada rekonstrueeritud konstruktsioonilt etteantud uuele katendile vastavat 20-aastast tööiga.

Projekteerimismõõtmistes tuleb läbi töötada 3. ja 4. peatükk et täpsustada, millised nõuded on asjakohased uusehitise, millised rekonstrueerimise korral. Tänapäevane sõnastus ei taga kvaliteetset tulemust rekonstrueerimisel. Mõju konstruktsiooni kandevõimele on oluline, kuna sellest sõltub, millise paksusega kihti millal arvestada tuleb või tohib.

Soomes kasutatakse FWD mõõtmistulemusi remondiobjektide projekteerimisel. Põhimõtteliselt on võimalik FWD mõõtetulemist KAP baasil leida tagasiarvutuste teel olemasoleva (allesjäetava) konstruktsiooni pinna kandevõime (elastsusmoodul), kuid esmaste katsetuste alusel ei ole KAP rakendusega saadavad tulemused alati loogilised. Võimalik, et remondiobjektidel tuleb kasutada pigem Odemarki valemit, kuna selle tulemused haakuvad paremini FWD mõõtetulemustega.

Kihipaksuste piirväärtused ja nende kehtivusala

Küsimus on ka dreniiva ja eriti killustikaluse **kihi paksuses**. Et projekteerimismõõtmistes (ja ka juhendis 2001-52) on sätestatud minimaalsed töökihi paksused, võib järeldada, et kihid mille paksus on väiksem sätestatust, tuleb lugeda tehnoloogilisteks kihtideks ja sel juhul võiks neid arvestada alumise (nõrgema) kihi koosseisus nimetatud nõrgema kihi arvutusparameetritega (kui üldse – sest juhises on öeldud et tehnoloogilise kihiga katendiarvutuses ei arvestata). Killustikaluse paksus kompleksstabiliseerimisel on veidi komplitseeritum teema seetõttu, et aluse killustik paigaldatakse koos stabiliseerimiseks vajaliku (50% kihipaksusest) killustikuga. Teoorias on võimalik käsitleda, et killustikalus kompleksstabiliseeritud aluse kihi all moodustab kahekihilise aluse alakihi, kuid siis peaks ka selle alakihi kohta kehtima miinimumpaksuse nõue killustikaluste ehitusjuhise järgi, sest tegemist on eraldi paigaldatava ja eraldi tihendatava kihiga. Mõju kandevõimele on oluline.

Seega, ettepanek täiendada juhendit 2001-52:

- Projekteerija peab Teeregistri kandevõimemõõtmiste, defektide analüüsi ja visuaalse vaatluse teel välja selgitama defektide ulatuse ja tõenäolised põhjused. Tuleb otsustada, kas

ja millises ulatuses rakendada tugevdus- ja parandusmeetmeid tee konstruktsiooni ümberehitusel. Juhul, kui objektil ei ole liigniiskusest tekkinud olulisi kahjustusi, võib rakendada fraktsioneeritud killustikust aluse tööle drenkihina, paigaldades selle mulde servani minimaalselt 12 cm paksusena ka stabiliseeritud aluse alla (sidumata kihina).

- Minimaalsete kihipaksuste kasutamisel tuleb kihid eristada peenosiseid sisaldavatest kihtidest eristava geosünteediga.

Veetase kõrgemal kui 125 cm

Juhend 2001-52 sätestab, et kui kõrgveetase on kõrgemal kui 125 cm, tuleb veetase alandada või katend ümber konstrueerida. Eriti linnatingimustes on veetaseme alandamine problemaatiline, seetõttu on projekteerijad konstrueerinud katendi külmakindlatest materjalidest sellises ulatuses, mis tagab KAP arvutusalgoritmidega tugevuse ja külmakindluse. Paraku on tegemist KAP veaga, sest juhul kui külmumistsoonis on vesi, tuleks kasutada teistsuguseid arvutusalgoritme, mida KAP ei sisalda ja seetõttu esineb külmakindlusarvutustes põhjendamatu järsk piir ning arvutustulemused ei vasta normi loogikale. Võimalusel ja vajadusel lahendada ka kõrgema veeseisuga konstruktsioone, tuleb KAP täiendada vastava algoritmiga. Vastasel juhul rakendada piirangut mis ei võimaldaks arvutusi teostada kõrgema veetasemega. Mõju kandevõimele on oluline.

Alternatiivsed katendid

Kuna projekteerijal puudub info sellest, millise karjääri materjalidest ehitatakse killustikaluse all paiknevad kihid, tuleks projektis ette näha alternatiivsed võrdtugevad konstruktsioonid, milliste vahel võib ehitaja valida pakkumise esitamise käigus. Alternatiividena tuleb käsitleda drenkihi ehitamist killustikust ja erinevatest liivadest, võttes arvesse liivpinnase lõimisetegurit (Cu). Materjali asendamist tugevama materjaliga ehitusprotsessis ei tohiks keelata.

7 JÄRELDUSED

1. **Rehvisurve.** Kuigi rehvitootjate poolt soovitatav maksimaalne rehvisurve väärtus võib täna ulatuda vaid 900 kPa-ni, puudub regulatsioon mis piiraks rehvirõhku ja erinevates uuringutes on fikseeritud ülerõhud 1,0-1,2 MPa piirides (eriti kui teadlikult ületatakse teljekoormuse ja täismassi piiranguid, suurem rehvirõhk varjab visuaalselt ülekoormuse mõju rehvi kujule). See põhjustab suured kontaktpinged rehviälje keskalal ja õhemate asfaltkatete puhul ei suuda seotud kihid koormust tasandada ning järgneb aluse kiire lagunemine. Rehvirõhud tuleb tehnonõuetes piirata rehvitootja poolt näidatud maksimaalväärtusega ja koos kaalu kontrolliga tuleb kontrollida ka rehvirõhku. Ülerõhu puhul tuleb sõiduk lugeda tehnonõuetele mittevastavaks. Siirdetegurite arvutamisel tuleb eeldada 900 kPa rehvirõhku.
2. **Perspektiiv - prognoosida sõidukipargi muutust 20 a.** Raskesõidukite läbisõiduanalüüs näitab, et järjest suurema osa moodustavad autorongid - autobusside ja haagiseta veoautode osakaal liikluses kahaneb. Seetõttu tuleb põhitähelepanu suunata haagisega sõidukitele ja siiski ka üle 6-tonnise teljekoormusega raskesõidukitele. Väiksema teljekoormuse puhul kasutatakse harva kõrgsurverehve, samuti pole veoteljel super-single analooge vaid kasutatakse tavalisi paarisrataid. Seega ei ole eeldada, et kergemate veokite klassist teele olulist koormust edastataks ja puudub ka vajadus siirdetegurite korrektuuriks.
3. **Kaalupunktide info.** Siirdetegurite arvutamisel on väga oluline hinnata tegelikke teljekoormusi ja seetõttu tuleb kaalupunktide andmeid põhjalikult analüüsida, arvestades seejuures ka Muuga kaalupunkti andmeid kuna see on ainus, mis suudab eristada rehvitüübi.
4. **Vajaliku kandevõime arvutusalgorithm** vajab asendamist et minna üle kumulatiivsele koormuse arvestusele senise 15-nda (või 20-nda) aasta koormuse asemel.
5. **Eriveoste arvutusalgorithm** vajab täiendamist – Taani alusele lisada samal teljel teiste rataste mõju ja sõiduki kiiruse (dünaamikategur) arvestamine
6. Ettepanekud mis otseselt ei puuduta siirdetegureid
 - a. **Normis sätestatust õhemad kihid.** Katendikihtide paksuse osas lõpetada õhemate kihtide kasutamine, sest ka lubatud kihipaksuse puudujäägi korral kahaneb katendi ressurss liialt palju. Sellega tõuseb ehitusmaksumus, sest ehitaja peab eelnevalt arvestama varudega mis tagavad, et ka halvemal juhul on projektne paksus tagatud. Kulumisvaru kasutamine lükkab probleemid edasi väljapoole garantiiaega.
 - b. **Tuleb uuendada liikluse baasprognoos,** võttes arvesse tegelikke trende alates aastast 2006 ning olemasolevaid prognoose liiklust genereerivate tegurite arengus, mis erinevad oluliselt 2007 kasutadaolnutest. Projekteerimismõõtmistes esitatud meetoodika annab alates 2005-2015 võrdlusperioodist ka tee klassi määramisel moonutatud tulemused ning ei võimalda koormussageduse prognoosimist
 - c. **Remondiobjektide katendiarvutused** peavad tuginema kandevõime mõõtmistel, selleks tuleb oluliselt suurendada kandevõime mõõtmiste tihedust remondi planeerimisfaasis ning arendada välja vastav tarkvaralahendus remondiobjektide kontrollarvutusteks.
 - d. **Katendite arvutusprogrammiga integreerida ühikhindade andmebaas** mis võimaldab projekteerijal optimeerida konstruktsioonid lähtuvalt materjalide kättesaadavusest ja veokaugusest.
 - e. **Mõõta erinevate mõõteseadmetega ehituse käigus kihtide kandevõimet** ja arendada välja algoritm katendi kandevõimearvutusteks, mis võimaldab võrrelda kihi ehituse järel projektis sätestatut tegelikult saavutatuga. KAP tulemus selleks ei sobi.

8 KASUTATUD KIRJANDUS

1. Effects of adapting the rules on weights and dimensions of heavy commercial vehicles as established within Directive 96/53/EC; TREN/G3/318/2007; Transport&Mobility Leuven, 2008; http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/studies/doc/2009_01_weights_and_dimensions_vehicles.pdf
2. Truck Benchmarking; <http://www.internationaltransportforum.org/jtrc/infrastructure/heavyveh/TruckBenchmarking.pdf>
3. Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials, Leena Korkkiala-Tanttu, VTT/Espoo 2008; <http://lib.tkk.fi/Diss/2009/isbn9789513871369/isbn9789513871369.pdf>
4. VSN 46-83 - http://www.znaytovar.ru/gost/2/VSN_4683_Instrukciya_po_proekt.html
5. ODN 218.046-01 - http://www.znaytovar.ru/gost/2/ODN_21804601_Proektirovanie_ne.html
6. MODN 2-2001 - <http://dwg.ru/dnl/10341>
7. TKP 45-3.03-112-2008 - <http://dwg.ru/dnl/5085>
8. Roadex - http://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/10/ROADEX_Axle_Tyre_Prestudy_15102014%20Final.pdf
9. Pavement damage due to different tires and vehicle configuration, Virginia Tech Transportation Institute 2004, <http://www.comt.ca/english/programs/Reports2013/Virginia%20Tech%20-%20Pavement%20Damage%20Due%20to%20Different%20Tires%20and%20Vehicle%20Configurations%202004.pdf>
10. Kuuma asfaltbetooni nihkekindluse uuring (ASTM 2008) „Evaluating the Shear Resistance of Hot Mix Asphalt by the Direct Shear Test“ (Wang, Liu, Hao - Hiina) http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/TESTEVAL/PAGES/JTE101732.htm
11. Veoki rehvisurve mõju asfaltkattele (Austin, 2005) „Mechanistic-empirical study of effects of truck tire pressure on asphalt pavement performance“ (Feng Wang, doktoridissertatsioon) <https://www.lib.utexas.edu/etd/d/2005/wangf31903/wangf31903.pdf>
12. Asfaldikihtide nakke hindamine (Kansas, 2007) „Evaluation of bond strength at asphalt interfaces“ (Maurice Wheat) <http://transport.ksu.edu/files/transport/imported/Thesis/wheat.pdf>
13. Trafikital-supersinglefaktor – Christian Busch (Grontmij), Mogens Lovendorf Holst (COWI), Sidsel Petri Tonnesen (Ramboll) 2012
14. Rahandusministeeriumi statistika - <http://www.slideshare.net/rahamin/riigieelarve-kasutamine-kmne-kuuga-ja-oktoobris-2015/8> slaid 8

LISA 1. 2014 LIIKLUSE LOENDUSANDMETE ANALÜÜS

Tabel 36. Liiklussageduste jaotus maanteeliikides

AKÖL	14500 (I)	6000 (II)	3000 (III)	500 (IV)	50 (V)	0 (VI)	Kokku
Põhimnt m	28 386	475 593	378 974	724 433	-	-	1 607 386
jaotus	1,77%	29,59%	23,58%	45,07%			
SA	17 574	6 799	2 816	2 537			3906
VA	612	318	131	102			174
AR	875	927	355	265			473
AKÖL	19 061	8 043	3 301	2 905			4553
Raske %	7,80%	15,47%	14,71%	12,66%			14,21%
Q/eksr, nt	205	1140	514	200			552
Q>225, m	2 651	421 279	273 765	331 077			1 028 772
m	2 651	421 279	273 765	581 041	0	0	1 278 736
Raske>10%	9%	89%	72%	80%	0%	0%	80%
Tugimnt m	-	45 986	150 860	1 962 846	245 765	-	2 405 457
jaotus		1,91%	6,27%	81,60%	10,22%	0,00%	
SA		6497	3636	1088	278	0	1268
VA		167	103	35	7	0	39
AR		188	179	77	20	0	80
AKÖL		6852	3918	1201	305	0	1388
Raske %		5,18%	7,20%	9,39%	9,00%		8,59%
Q/eksr		299	253	104	26		107
Q>225		41 534	82 144	163 248	0		286 926
m	0	0	40 336	853 790	134 513	0	1 028 639
Raske>10%	0%	0%	27%	43%	55%	0%	43%
Kõrvalmnt	4 548	25 286	59 704	1 358 674	7 811 350	3 217 601	12 477 163
	0,04%	0,20%	0,48%	10,89%	62,61%	25,79%	100,00%
SA	15242	7570	3990	890	161	29	245
VA	256	212	226	37	12	30	8
AR	79	104	195	42	14	36	9
AKÖL	15578	7886	4411	970	187	94	262
Raske %	2,15%	4,01%	9,54%	8,17%	13,94%	69,62%	6,43%
Q/eksr	228	190	240	52	11	2	7
Q>225	785	8 109	26 078	15 957	0	0	50 929
m	0	127	13 193	344 782	1 799 270	695 684	2 853 056
Raske>10%	0%	1%	22%	25%	23%	22%	23%

R10+% 2 651 421 406 327 294 1 779 613 1 933 783 695 684 5 160 431

% selles klassis 8% 77% 56% 44% 24% 22% 31%

riigiteedest 0,1% 8,2% 6,3% 34,5% 37,5% 13,5% 100,0%

Selgitus: Q/eksr – koormussagedus enamkoormatud sõidurajal; Q>225 – teepikkus, mille ulatuses ületab koormus 225 normtelge; R10+ - teepikkus, mille ulatuses on raskeliikluse osakaal üle 10%.

LISA 2. REHVIRÕHU JA KOORMUSE SEOS ERISURVEGA – ALGANDMED

Tabel 37. Paarisrataste kontaktpinged sõltuvuses koormusest ja rehvisurvest (VTT, Korkkiala-Tanttu doktoritöö)

Spring-overload test		Tyre 1			Tyre 2			Distance between tyres	Measured total area	Contact pressure	Average width	Average length
Tyre pressure	Wheel load	Width	Length	Measured area	Width	Length	Measured area					
kPa	kN	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ²	cm	m ²	kPa	cm	cm
500	30.2	22.1	19.2	386.5	22.2	19.9	381	10.5	0.07675	393.5	22.15	19.55
500	40.1	22.5	22.5	458.5	22.3	22.5	443	10.3	0.09015	444.8	22.4	22.5
500	50.59	22.7	25.3	530	22.6	25.4	536.7	10.2	0.10667	474.3	22.65	25.35
500	60.88	22.6	27.7	581.1	22.6	27.6	595.9	10.2	0.1177	517.2	22.6	27.65
500	70.97	22.6	29.8	637.7	22.6	29.9	644.8	10.3	0.12825	553.4	22.6	29.85
500	81.9	22.7	34.8	730.9	22.7	34.4	714.8	101.1	0.14457	566.5	22.7	34.6
600	30.33	22.1	18.9	347.3	22.3	20.1	389.5	10.4	0.07368	411.6	22.2	19.5
600	40.47	22.2	20.5	392.5	22.4	21	423.5	10.25	0.0816	496.0	22.3	20.75
600	50.92	22.6	22.3	460	22.7	23.3	509.4	10.1	0.09694	525.3	22.65	22.8
600	60.15	22.6	25.2	523.5	22.7	26.2	553.7	10.2	0.10772	558.4	22.65	25.7
600	71.05	22.7	27.6	574.7	22.8	28.3	602.1	10.1	0.11768	603.8	22.75	27.95
600	82	22.8	30.9	644	22.7	32.4	678.3	10.1	0.13223	620.1	22.75	31.65
700	30.25	21.4	17.1	309.5	21.6	17	317.6	11	0.06271	482.4	21.5	17.05
700	40.59	22	19.3	377.5	22	19.4	386	10.6	0.07635	531.6	22	19.35
700	50.41	22.3	21.2	429.5	22.4	21.8	443.6	10.4	0.08731	577.4	22.35	21.5
700	61.19	22.7	23.9	503.8	22.7	23.6	509.3	10.3	0.10131	604.0	22.7	23.75
700	70.94	22.7	26.3	556.5	22.7	26	568.9	10.2	0.11254	630.4	22.7	26.15
700	81.2	23	29	630.1	22.9	29.4	637.3	10.1	0.12674	640.7	22.95	29.2
800	30.26	21.2	16.2	290.4	21	17.2	303.6	11.5	0.0594	509.4	21.1	16.7
800	40.15	22.2	18.8	363.4	22.3	18.7	374.2	10.3	0.07376	544.3	22.25	18.75
800	50.93	22.5	21.1	419.4	22.6	21	430.2	10.2	0.08496	599.5	22.55	21.05
800	60.15	22.7	22.7	477.2	22.9	22.5	484.2	10.1	0.09614	625.7	22.8	22.6
800	70.56	22.8	24.3	520	22.6	24.6	529.8	10.1	0.10498	672.1	22.7	24.45
800	80	22.9	27.7	601.4	22.9	28.3	605.8	10	0.12072	662.7	22.9	28
* calculated average value for 850 kPa												
850	70.82	22.85	24.05	517.0	22.75	24.4	528.3	10.1	0.10452	677.6	22.80	24.23
900	30.26	21.1	16.6	296.4	21.6	17.3	308.7	11.1	0.06051	500.1	21.35	16.95
900	40.3	22.3	19	367	22	19.1	367.6	10.5	0.07346	548.6	22.15	19.05
900	50.73	22.7	20.4	421.1	22.6	21.5	440.3	10.1	0.08614	588.9	22.65	20.95
900	60.86	22.8	22.3	468.4	22.7	23.9	488.9	10.1	0.09573	635.7	22.75	23.1
900	71.08	22.9	23.8	513.9	22.9	24.2	526.7	10.1	0.10406	683.1	22.9	24
900	80	23	26.5	572.8	23.1	27.1	593.2	10	0.1166	686.1	23.05	26.8

Tabel 38. Super-single rehvitüübil kontaktsurve sõltuvus koormusest ja rehvisurve (VTT, Korkkiala-Tanttu doktoritöö)

Low-volume road test						
Tyre pressure	Wheel load	Width	Length	Measured area	Contact pressure	Measured area
kPa	kN	cm	cm	cm ²	kPa	m ²
500	31.01	24.40	30.90	652.40	475.32	0.06524
500	40.34	29.60	31.00	814.40	495.33	0.08144
500	50.79	34.50	31.20	941.40	539.52	0.09414
500	61.16	37.20	31.40	1064.30	574.65	0.10643
500	70.90	38.00	31.40	1141.10	621.33	0.11411
600	31.00	23.00	30.60	594.90	521.10	0.05949
600	40.44	27.50	31.00	730.60	553.52	0.07306
600	51.01	32.30	31.20	855.70	596.12	0.08557
600	61.19	34.00	31.40	954.30	641.20	0.09543
600	71.31	36.90	31.60	1073.40	664.34	0.10734
600	80.00	38.80	31.70	1171.60	682.83	0.11716
700	31.01	21.70	30.00	543.40	570.67	0.05434
700	39.90	25.40	30.90	667.40	597.84	0.06674
700	51.17	28.50	31.10	778.20	657.54	0.07782
700	60.94	31.80	31.30	883.30	689.91	0.08833
700	71.15	33.70	31.40	977.50	727.88	0.09775
700	81.80	36.30	31.60	1081.10	756.64	0.10811
800	31.01	20.70	29.30	520.30	596.00	0.05203
800	40.08	23.80	29.60	625.90	640.36	0.06259
800	49.99	25.40	31.00	707.60	706.47	0.07076
800	60.85	28.70	31.40	825.10	737.49	0.08251
800	70.91	30.00	31.40	889.10	797.55	0.08891
800	82.10	34.00	31.60	1019.50	805.30	0.10195
900	30.98	20.30	30.30	511.20	606.03	0.05112
900	39.88	22.10	30.60	581.20	686.17	0.05812
900	50.79	25.10	31.00	715.30	710.05	0.07153
900	60.90	28.00	31.20	809.20	752.60	0.08092
900	71.12	29.00	31.20	869.20	818.22	0.08692
900	82.00	32.00	31.60	990.60	827.78	0.09906

LISA 3. SÕIDUKITE LIIGILINE JAOTUS

Tabel 39. Sõidukite liigiline jaotus

	M	N	Lxe	O
	Reisijatevedu	Kaubavedu	2...4 rattalised	Haagised
1	J&1..8	≤3,5t	Mopeed 2r, 45 km/h, 50 cm ³ või 4 kW	≤750 kg
2	J&9+; ≤5t	3,5...12t	Mopeed 3r, 45 km/h, 50 cm ³ või 4 kW	750 kg...3,5 t
3	J&9+; >5t	>12t	Mootorratas soolo	3,5...10t
4			Korviga mootorratas	>10t
5			Kolmratas	
6			Kerge neliratas, 45 km/h, ≤350 kg (akudeta)/ ≤4kW	
7			Neliratas, ≤400 kg (kaubavedu 550 kg), ≤15kW	

Tabel 40. Veokite ja haagiste lubatud täismassid ning teljekoormused

Veoki teljed		Haagise teljed			Veduki (sh sadul) teljed				veotelik	Haagisel	
			täis	kesk	2	3	4+	teljevahe	tandem	tandem	Tridem
	Mass	1			28	36	40	d<1	11,5	11	21
2	18	2	18	18	36 (p38*)	40 (p44 _{ISO})	40	d1...1,3	16	16	
3	25/26	3	24	24	40	44	44	d1,3...1,8	18/19	18	24
4	31/32	4+	30					d1,8+		20	

*Juhttelje koormus vähemalt 20% täismassist

LISA 4. SIIRDETEGURID SÕIDUKITELE (JUHENDIST 2009-7) TAANI SÜSTEEMIS

Tabel 41. Siirdetegurid juhendis 2009-7 loetletud sõidukitele

Liik	Mark	Tühi/täis	Telg/MP a	Telg/MP a	Telg/MP a	telg	Tel g	Tegu r
BV	Ford Transit	19,5/36	16/3,5	20/3,5				0,002
BV	Renault Master	35,7/38,9	18,4	20,4				0,004
BV	VW Transporter	16/26	14	13,3				0,001
BK	Setra S209H	89,5/115	43/7,5	85,6/8				0,83
BK	Scania Kutter	85,4/117,2	42/7,5	75,1/8				0,53
BR2	Volvo B10M	118,8/173,7	69,1	104,7				3,01
BR2	Neoplan N316	118,6/177,2	64,5	112,7				3,34
BR2	Scania Berkhof	127,7/179,5	69,2	114,5				3,79
BR2L	Ikarus 260	91/143	55	89				1,43
BR2L	Scania L113CLB	97,4/171	62/8	109/8				2,46
BR2L	Scania L94UB	107/178	71/8	115/8				3,35
BR2L	Scania K270	118/191	71/8	120/8				3,77
BR3	Setra 328DT	162/250	80	57,5	115			5,32
BR3	Neoplan N122	165,1/229,6	69,1	62,6	100,7			3,49
BR3	Scania CL94	177/286	71/8	95/8	61/8			2,66
BR3	Volvo B12MA	158/270	75/8	115/8	80/8			5,17
BR2+BK	Scania L94UB+A	177/321	71/8	120/8	65/8	65/8		5,13
Tr	Skoda 14 Tr	100/160,8	60/7,8	100,8/8,2				1,90
Tr	Skoda 15 Tr	164/266	60/7,8	107/8,2	103/8,2			3,79
Tr	Solaris Troll 12	114/185	70/7,8	115/8,2				3,30
Tr	Solaris Troll 18	155/280	70/7,8	95/8,2	115/8,2			4,40
PAK	Citroen Jumper	17,55/32,5	16,5/4	16,5/4,5				0,003
PAK	VW Transporter	17,12/27	15,1	13,3				0,002
PAK	VW Transporter	16,49/26	14,8	13,3				0,002
PAK	Toyota HiAce	15,7/26,6	13	16,1				0,001
VV	Iveco 2000 65C	20/65	23	50				0,07
VV	Gaz3507	35,5/77,5	19/4	58,5/6,3				0,12
VA2	MB Atego 815	46,7/80	34/5	50/5,5				0,10
VA2	ZiL MMZ 4502	48/108	28,5/7	79,8/7,5				0,52
VA2	Volvo FL611	57,2/110	41,2	71,9				0,55
VA2(VR2)	MAZ5335	67,25/149,5	49,5	100				1,82
VA2	Volvo FH12L	73,2/180	67,1	115				3,70
VA2	MB1840LS	71,1/180	71,2	115				3,99
VA2	MAZ5549	72/154	54	100				1,95
VR3	KamAZ5320	70,8/153	43,8/7,3	54,7/5	54,7/5			0,43
VR3	Sisu SL210	110/270	73,5	99,5	81			5,08
VR3	Volvo FL7	135/247	75/8,5	100/8	72/8			3,83
VR3	KamAZ5511	91,2/192,5	45,7/7,3	73,2/5,5	74,5/5,5			0,69

S2+2	MB1748/SRP32 T	110/362	67	115	90	90		4,03
S2+2	MAZ504B/5205	134/334	54	100	90	90		2,28
S2+3	V FH12/Schmitz	160/423	65	115	83	80	80	5,98

Märkus: kui lisas ei olnud rehvisurvet ette antud, on valitud tõenäoline

LISA 5. ERINEVATE VEOKILIIKIDE LÄBISÕIT (ESA, ARUANNE TS52)

Tabel 42. Raskeveokite läbisõidud ESA andmetel

	2001	2014
Kokku (tuhat kilomeetrit)	512486	456226
2-teljeline veoauto	202363	28404
3-teljeline veoauto	25799	27323
4-teljeline veoauto	79	2016
Muu-teljeline veoauto	0	0
2-teljeline veoauto koos 1-teljelise haagisega	8051	0
2-teljeline veoauto koos 2-teljelise haagisega	23869	0
2-teljeline veoauto koos 3-teljelise haagisega	39748	0
3-teljeline veoauto koos 1-teljelise haagisega	1456	0
3-teljeline veoauto koos 2-teljelise haagisega	41069	17020
3-teljeline veoauto koos 3-teljelise haagisega	7794	9839
3-teljeline veoauto koos 4-teljelise haagisega	369	0
Muu veoauto ja haagise telgede arvu kombinatsioon	1108	0
2-teljeline sadulauto koos 1-teljelise haagisega	1514	0
2-teljeline sadulauto koos 2-teljelise haagisega	3812	7464
2-teljeline sadulauto koos 3-teljelise haagisega	127642	293516
2-teljeline sadulauto koos 4-teljelise haagisega	0	0
3-teljeline sadulauto koos 1-teljelise haagisega	174	0
3-teljeline sadulauto koos 2-teljelise haagisega	16333	0
3-teljeline sadulauto koos 3-teljelise haagisega	5141	60880
3-teljeline sadulauto koos 4-teljelise haagisega	0	0
Muu sadulauto ja haagise telgede arvu kombinatsioon	6165	0
Statistiliselt mitteusaldusväärne	0	9764

LISA 6. SIIRDETEGURID TÜÜPSÕIDUKITELE

Tabel 43. Siirdetegurite arvutus

	2V-18	3V-26	4V-32	2V2H-36	2V3H-40	3V2H-40	3V3H-44	3V4H-44	2S1H-28	2S2H-38	2S3H-40	2S4H-40	3S2H-40	3S3H-44
D	65-115	70-190	50-50-110-110	65-115-180	65-115-220	75-125-200	65-135-240	40-100-300	65-115-100	65-115-200	65-115-220	60-100-240	75-190-135	65-135-240
0,6E	1,8273	1,254	2,8979	2,6579	2,2999	3,879	1,0978	0,904	2,7773	3,0932	2,2999	1,3985	1,5877	1,0978
0,9	3,5692	2,901	5,0533	4,88	4,315	7,3367	2,418	1,5249	5,0685	5,567	4,315	2,7046	3,7205	2,418
0,9N	3,5692	3,7161	5,0533	5,5366	4,87	8,3375	3,4118	2,2207	5,0685	6,5678	4,87	2,9641	4,7434	3,4118
D	75-105	75-185	45-45-115-115	75-105-180	45-115-240	40-160-200	50-190-200	50-190-200	75-105-100	75-105-200	45-115-240	45-115-240	65-135-200	50-190-200
0,6E	1,4485	1,2206	3,3993	2,2791	2,3689	1,8081	1,4119	1,2473	2,3985	2,7144	2,3689	2,0277	1,6944	1,4119
0,9	3,501	3,1412	5,6796	4,8117	3,896	2,9519	2,4682	2,2085	5,0002	5,4987	3,896	3,3576	3,3595	2,4682
0,9N	3,501	3,8738	5,6796	5,4683	4,6821	4,3626	3,6624	3,1487	5,0002	6,4995	4,6821	3,617	4,568	3,6624
			60-60-100-100	65-115-180	65-115-220	75-125-200	65-135-240			65-115-200	65-115-220	60-100-240	75-190-135	65-135-240
0,6E			1,921	2,5618	2,2452	1,6065	1,0204			2,9468	2,2452	1,3605	1,5573	1,0204
0,9			7,8785	6,4121	5,1867	6,3136	3,6526			7,9021	5,1867	3,7106	4,2053	3,6526
0,9N			7,8785	7,8361	6,3905	8,6396	5,5652			10,073	6,3905	4,47395	5,471	5,5652
S			75-75-85-85	75-105-180	45-115-240	40-160-200	50-190-200			75-105-200	45-115-240	45-115-240	65-135-200	50-190-200
0,6E			1,4648	2,1831	2,2915	1,6618	1,3745			2,56805	2,2915	1,9898	1,5481	1,3745
0,9			6,752	6,3438	5,1306	5,287	3,0636			7,8339	5,1306	4,3636	5,6946	3,0636
0,9N			6,752	7,7679	6,8355	7,8674	4,70085			10,004	6,8355	5,1269	8,0729	4,70085
SS%			20%	23,40%	14,80%	23,40%	14,80%	0%	0%	21,30%	93,40%	7,80%	21,30%	93,40%
S- 0,6	1,6379	1,2373	2,8575	2,4460	2,3246	2,5606	1,2464	1,0757	2,5879	2,8726	2,2727	1,7101	1,6222	1,2012
S- 0,9	3,5351	3,0211	5,7562	5,2044	4,2614	5,2978	2,5785	1,8667	5,0344	6,0302	5,0891	3,1096	3,8403	3,2977
S- w09	3,5351	3,7950	5,7562	6,0405	5,0479	6,7955	3,7733	2,6847	5,0344	7,2802	6,4918	3,4083	5,1065	5,0277
S-AVG	3,5351	3,4080	5,7562	5,6225	4,6546	6,0466	3,1759	2,2757	5,0344	6,6552	5,7905	3,2589	4,4734	4,1627

LISA 7. SIIRDETEGURI MUUTUSE MÕJU EHITUSMAKSUMUSELE

Tabel 45. Siirde teguri muutuse mõju riigimaanteede katendi ehitusmaksumusele

Tee klass	I	II	III	IV	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
	Põhimaanteed				Tugimaanteed				Kõrvalmaanteed				
tee pikkus km	28,4	475,6	378,9	724,5	46	150,9	1962,8	245,8	4,5	25,3	59,7	1358,7	7811,4
VAAB 2014	612	318	131	102	167	103	35	7	256	212	226	37	12
AR 2014	875	927	355	265	188	179	77	20	79	104	195	42	14
kasv 2014-2034	1,173	1,299	1,306	1,288	1,14	1,083	1,111	1,21	1,131	1,052	1,175	1,088	0,923
VAAB 2034	718	413	171	131	190	112	39	8	290	223	266	40	11
AR 2034	1026	1204	464	341	214	194	86	24	89	109	229	46	13
Q/rajale (seni)	1827	1909	818	611	466	413	170	44	347	366	601	111	34
E (senine tegur)	282	283	258	250	242	238	212	180	240	235	249	200	180
Q/rajale (uus)	3517	3640	1561	1166	901	793	325	83	687	717	1168	215	65
E (uus tegur)	301	302	277	269	261	257	231	191	253	254	269	219	184
Muutus Mpa	19	19	19	19	19	19	19	11	13	20	19	19	4
Katte laius m	22	11	9	8	11	9	8	7	22	11	9	8	7
Baasvariant	P1	P2	P3	P4	T2	T3	T4	T5	K1	K2	K3	K4	K5
SMA cm	4	4							4				
AC bin cm	5	5	5	5	5	4	4	6	5	6	6	4	5
AC base cm	7	7	8	7	7	7	7		7	7	8	6	
graniit cm	10	10											
paekillustik cm	23	23	27	26	29	28	23	22	23	30	25	26	25
liiv cm	30	30	24	30	31	28	24	25	26	31	26	30	26
€/j.m	1019	509	277	239	337	254	210	148	878	363	291	212	141
tuh.€	549 122				502 453				1 421 630				
Perspektiivne suurendades aluse paksust													
SMA cm	4	4							4				
AC bin cm	5	5	5	5	5	4	4	6	5	6	6	4	5
AC base cm	7	7	8	7	7	7	7		7	7	8	6	
graniit cm	10	10	10										
paekillustik cm	30	30	24	33	38	35	27	26	25	31	27	27	26
liiv cm	30	31	24	31	31	28	26	25	28	29	24	29	27
€/j.m	1068	535	323	258	369	274	222	157	896	364	295	214	144
tuh.€	1,048	1,050	1,166	1,080	1,094	1,080	1,056	1,061	1,021	1,004	1,014	1,008	1,021
tuh.€	593 851				532 446				1 447 527				
kallinemine	1,081				1,060				1,018				
Perspektiivne suurendades asfaldi paksust													
SMA cm	4	4							4				
AC bin cm	5	5	5	5	5	4	4	6,5	5	6	6	4	5
AC base cm	8	8	9,5	8,5	9	8	8		8	7	8	6	
graniit cm	10	10	10										
paekillustik cm	23	24	17	27	29	30	24	23	22	30	27	27	26
liiv cm	32	30	25	29	31	28	23	24	25	32	24	29	27
€/j.m	1052	527	321	256	366	271	222	156	897	364	295	214	144
tuh.€	1,032	1,035	1,160	1,073	1,084	1,069	1,058	1,058	1,022	1,003	1,014	1,008	1,021
tuh.€	587 905				532 344				1 447 527				
kallinemine	1,071				1,059				1,018				

Märkus: Kollasega märgitud kandevõime väärtuste puhul rakendus tee klassist tulenev minimaalse kandevõime nõue