

Raskeveokite mõju sildadele. Nende koormuste valideerimine reaalsetel koormustel ning mõju analüüs.

Lõpparuanne (v.1.1)

Töö nr: 1-9/18/0970-1 (Maanteeamet), 4-14/419 (Tallinna Tehnikakõrgkool)



23.03.2020

EESSÕNA

Käesoleva uurimistöö aluseks on Maanteeameti ja Tallinna Tehnikakõrgkooli vahel 11.06.2018 sõlmitud leping nr 1-9/18/0970-1 „Raskeveokite mõju sildadele. Nende koormuste valideerimine reaalsetel koormustel ning mõju analüüs“.

Uurimistöö jaguneb kolmeks etapiks:

- I vahearuanne (valmimisaeg: november 2018);
- II vahearuanne (valmimisaeg: juuli 2019);
- lõpparuanne (valmimisaeg: detsember 2019).

Käesolev dokument sisaldab lõpparuannet, mille autorid on

- [Martti Kiisa](#) (ptk. 1, 2, 3 ja 4);
- [Karin Lellep](#) (ptk. 3 ja 4);
- [Sander Sein](#) (ptk. 1 ja 4);
- [Tarvo Mill](#) (ptk. 3);
- [Julija Šommet](#) (ptk. 1).

Uuringu teostaja andmed:

Asutus: Tallinna Tehnikakõrgkool
Registrikood: 70003773
Aadress: Pärnu mnt 62, 10135 Tallinn
Telefon: 6664500
E-post: tktk@tktk.ee
Veebiaadress: www.ttkk.ee
Vastutav täitja: Martti Kiisa (telefon: 5299321, e-post: martti.kiisa@tktk.ee)
/allkirjastatud digitaalselt/

Tellija andmed:

Asutus: Maanteeamet
Registrikood: 70001490
Aadress: Teelise 4, 10916 Tallinn
Telefon: 6119300
E-post: maantee@mnt.ee
Veebiaadress: www.mnt.ee
Kontaktisik: Taivo Kurg (telefon: 58862220, e-post: taivo.kurg@mnt.ee)

Lõpparuande valmimise kuupäev: 17.12.2019 / versioon 1.0.

Korrektuuride teostamise kuupäev: 23.03.2020 / versioon 1.1 (kokkuvõtte täiendamine).

Uuringu autorid tänavad konstruktiivse abi ja heade nõuannete eest Ando Funki, Tõnis Liigmanni, Peeter Prosest, Siim Viini, Taivo Kurge, Marko Jürimaad, Hannu Ploompuud, Villem Tori, Kaupo Nõmmemeest, Raivo Metsalu, Allan Themast, Paul Toomikut, Kauri Kiimani, Romet Jürgensoni, Raul Orglat ja Eerik Peekeri.

ISBN 978-9949-7274-8-3 (pdf)

SISUKORD

Sissejuhatus	4
1. Varasemate uuringute ülevaade	5
1.1. Eesti uuringud	7
1.2. Lähiriikide uuringud	32
2. Sildade liikluskoormused Eestis ajavahemikus 1945 kuni tänapäev	41
2.1. Liikluskoormused ajavahemikus 1945 kuni 2000	43
2.2. Liikluskoormused ajavahemikus 2000 kuni tänapäev	56
3. Sildade koormamine raskeveokitega	68
3.1. Üldosa	68
3.2. Katsetulemused	90
4. Analüüs	111
4.1. Katsetulemuste analüüs	111
4.2. Katsetatud sildade kontrollarvutused	125
4.3. Üleminekutegurid algsete projektkoormuste ja 52 t veoki vahel	142
4.4. Sildade seisukord	150
4.5. Töökindluse ja purunemistõenäosuse analüüs	154
4.6. Riskigruppi kuuluvad sillad	159
4.7. Investeeringute vajadus	162
Kokkuvõte	164
Summary	168
Kasutatud kirjandus	169
Lisad	172
Lisa 1. Katsetatud sildade kirjeldused	173
Lisa 2. Fotod sildade katsetamistest	201
Lisa 3. Sildade töökindluse ja purunemistõenäosuse analüüs	215

SISSEJUHATUS

Vabariigi Valitsuse tegevusprogrammis aastateks 2015-2019 on püstitatud eesmärgiks suurendada investeeringuid riigimaanteedesse, et tõsta veoautode massipiiranguid ja seeläbi parandada Eesti maanteetranspordi- ja kaubavedude konkurentsivõimet. Samuti kavatakse diferentseerida massipiiranguid lähtudes sõidukite tegelikust mõjust teedele ja uurida ümarpuiduveol katseliselt rakendatud 52 t täismassipiirangu laiendamise võimalusi teistele veoliikidele. Eesti teedel liigub järjest rohkem raskeveokeid, kus veost optimeerides on kogumassid lubatu/mittelubatu piiril. Sagenenud on ka ülekaalulised raskeveosed, sest kogumassi kontroll on puudulik. Seetõttu võib esineda olukordi, kus raskeveoki kogumass ületab silla projekteerimisel arvesse võetud eriveoki massi.

Riigiteedel asub tänasel päeval orienteeruvalt 1000 silda, millest 93% on ehitatud peale teist maailmasõda (61% vahemikus 1945-1990 ja 32% vahemikus 1991-2017). Kohalikel teedel asub hinnanguliselt 800 silda, mille kohta terviklik andmestik puudub. Selleks, et teha kaalutletud otsuseid teedesse investeerimise vajaduste ja massipiirangute leevendamise võimaluste kohta, on Eestis alates 2010. aastast läbi viidud viis vastavasisulist uurimistööd (ning lisaks ka mitmed Tallinna Tehnikaülikooli magistratööd), mis puudutavad suurendatud massiga veokeid või sildade kandevõimet. Samuti on kahel sillal viidud läbi purustav katsetamine, mille põhjal on teostatud põhjalikud analüüsid. Käesolevat uurimistööd võib lugeda nende jätkuks.

Uurimistöö eesmärgiks on olemasolevatel nõukogudeaegsetel enamlevinud tüüpsildadel teostada reaalsed koormuskatsetused raskeveokitega, mille käigus kontrollitakse ja valideeritakse vastavaid arvutusmudeleid. Saadud andmete põhjal on võimalik hinnata suuremat osa Eesti riigiteedel asuvatest sildadest, mis on ehitatud analoogsete tüüpprojektide alusel. Tulemused on rakendatavad ka kohalikel teedel paiknevatele sildadele, kuna sildade olem on üle Eesti suhteliselt sarnane.

Lõpparuanne sisaldab:

- varasemate analoogsete uuringute ülevaadet ([peatükk 1](#));
- ülevaadet Eesti riigiteede sildade projekteerimisel kasutatud liikluskõormustest ([peatükk 2](#));
- 14 silla koormuskatsetuste tulemusi ([peatükk 3](#));
- analüüsi selle kohta, milline on 52-tonniste sõidukite mõju Eesti sildadele ([peatükk 4](#)).

Kuna informatsiooni on katsetatavate sildade suure arvu tõttu väga palju, siis on aruande põhiosas esitatud need kokkuvõtlikul kujul ning detailsem ülevaade on koondatud [lisesse](#). Parema ülevaate saamiseks on lisad sõltuvalt sisu tüübist grupeeritud kaheks ning tähistatud vastavalt araabia numbritega (lisad paiknevad põhjaruande lõpus) või ladina tähtedega (edastatud Maanteeametile eraldi failidena).

1. VARASEMATE UURINGUTE ÜLEVAADE

Raskemate veoste mõju uurimine Euroopas on alguse saanud juba enne Eesti liitumist Euroopa Liiduga, kui välja anti Euroopa nõukogu direktiiv 96/53/EC [1], millega kehtestati ühenduses liikuvatele maanteeõidukitele siseriiklikus ja rahvusvahelises liikluses lubatud maksimaalmõõtmed ning rahvusvahelises liikluses lubatud täismass. Pärast seda on valdkonda edasi uuritud ning Eestis on peamiselt lähtutud kahest kokkuvõttest. Esimene on CEDR¹ poolt 2007. aastal koostatud „Report on 60-t vehicles“ [4], kus on uuritud lähtuvalt 2001. aastal välja antud Euroopa komisjoni Valges raamatus välja toodud prognoosidest, et kaubatransport suureneb teedel 55% aastaks 2020. CEDR raport tõi teisest küljest välja, et paljude Euroopa Liidu riikide teede kandevõimed on juba ammendunud või ammendumas. Lisaks CEDR raportile andis Euroopa komisjon 2008. aastal välja direktiivi põhise raporti “Effects of adapting the rules on weights and dimensions of heavy commercial vehicles as established within Directive 96/53/EC” [3], kus selgitati taristule kaasnevaid mõjusid lähtuvalt direktiivis 96/53/EC välja toodud veokite parameetritest. Antud direktiivi on pärast raporti ilmumist üle vaadatud viimati 2015. aastal, mil anti välja uus direktiiv 2015/719/EC [2], millega muudeti nõukogu direktiivi 96/53/EÜ.

Pärast seda on Euroopas teemat samuti edasi uuritud ning taaskord on peamiseks eestvedajaks CEDR, mis andis 2017. aasta juulis välja raporti “Conditions for efficient road transport in Europe” [5]. Seal on jätkuvalt juhitud tähelepanu asjaolule, et kaubatransportide mahud suurenevad märgatavalt 2030. aastaks ja et probleemi ei saa lahendada ainult raudtee-, mere- ja siseveekogude transpordiga, mis tähendab, et nõudlus suuremate koormuste ja mahtude vedamiseks teedel jätkub. Sellest tulenevalt on ka uues direktiivis 2015/719/EC ja CEDR 2017. aasta raportis soovitud juhtida tähelepanu sellele, et EMS² platvormi (pikkus 25,25 m ja täismass 60 tonni) asemel tuleks uurida võimalusi hoopis pikemate veoste kasutuselevõtuks.

Alates 2010. aastast on Eestis läbi viidud kaheksa suuremat uuringut (millele lisanduvad mitmed Tallinna Tehnikaülikooli magistritööd), mis kõik puudutavad suurendatud massiga veokeid või sildade kandevõimet (tabel 1). Nende hulgas on kahe silla purustav katsetamine koos põhjaliku analüüsiga. Peamiselt on käsitletud vanade sildade sobivust tänapäevastele koormustele ning lisaks on kaalutletud laiendamist ja tugevdamist, viies parendustegevustega projekteeritud kandevõimed vastavusse uute nõuetega. Kajastatud uuringutes on üldiselt leitud, et vanemad sillad suudavad suurendatud koormust enamjaolt vastu võtta. Samas on välja toodud, et kõikide sildade seisukord ei ole uueväärne ja tulenevalt madalast seisundiindeksist (SI) on välja toodud rajatised, mis ei ole sobilikud suuremate koormuste vastuvõtmiseks. Selliseid rajatisi on eelnevates uuringutes välja toodud kuni paarsada. Mõnes uuringus on käsitletud ka teisi taristuga seotud toimivusnäidikuid nagu näiteks ohutus, keskkonnasäästlikkus ja investeeringute vajadus.

Enamuste varasemate uuringute suureks puuduseks tuleb lugeda asjaolu, et hinnangute andmiseks kasutatud seisundiindeks (SI) ei anna informatsiooni kandevõime seisukohalt ja seetõttu ei ole sobilik näidik kirjeldamiseks rajatise puudulikku kandevõimet. SI iseloomustab hästi küll üldiseid tendentse, kuid ei ole sobivaim parameeter otsustamiseks silla (eba)sobiva kandevõime üle. Seetõttu tuleb kriitiliselt suhtuda ka uuringutes väljatoodud investeeringuvajadustesse, kuna need baseeruvad enamasti seisundiindeksite põhjal välja valitud sildadel. Samuti tuleb juhtida tähelepanu asjaolule, et üheski uuringus ei ole arvesse võetud tänapäeval maailmas laialt levinud liikluskoormusega ja

¹ CEDR – Conference of European Directors of Roads.

² EMS – European Modular System.

kandevõimet vähendavate kahjustusprotsessidega arvestavaid arvutusmudeleid ega hinnatud terviklikult rajatiste töökindlust (kandevõime säilimine ajas) uutes liiklustingimustes.

Siinkohal tuleb eraldi mainida, et 2019. aastal alustati SA Eesti Teadusagentuuri tellimusel teadustööd „Uuringu läbiviimine raskete eriveoste mobiilsuse ning taristu seisukorrateadlikkuse parandamiseks“, mille viib läbi Stricto Project OÜ ja mis valmib 2020. aastal. Töö käigus viiakse läbi sildade katsetamine ja analüüs, mis keskendub sõjaväelisest koormusklassifikatsioonist MLC³ tulenevatele koormustele.

Enne käesoleva ja eespool mainitud Stricto Project OÜ uurimistööde läbiviimist (millest mõlema raames teostatakse suurel hulgal proovikoormamisi) on Eestis katsetatud üle paarikümne silla (nii staatiliselt kui ka dünaamiliselt). Kuid kuna ainult kahel juhul (Loobu ja Särevere sild) on neid proovikoormamisi käsitletud suuremahulise uurimistööna ja avalikult publitseeritud, siis teisi siinkohal ei vaadelda.

Tabel 1. Eestis läbi viidud uuringud

Valmimise aasta	Uuringu pealkiri	Link kirjeldusele
2010	Ülekaaluliste (52 t) veoste võimalike marsruutide kaardistamine riigimaanteedel [6]	Jaotis 1.1.1
2010	Puidutranspordi makromajanduslik uuring [7]	Jaotis 1.1.2
2011	Töötlemata ümarpuidu veoks eriveosena vajaliku muldkehade läbikülmumise ilmastikutingimuste ja erinevate teede kandevõime seose uuring [8]	Jaotis 1.1.3
2011	Riigimaanteede ja sildade tugevdamise maksumuse hindamine tulenevalt 52 t veoste aastaringse liikumise võimalusest [9]	Jaotis 1.1.4
2012	Eestis toimunud BMS-uuringute analüüs. Tulemuste kasutamine sildade halduse planeerimisel [13]	Jaotis 1.1.5
2013	Tallinn-Narva mnt asuva Loobu silla katsekoormamine [10]	Jaotis 1.1.6
2015	Eestis ehitatud nõukogudeaegsete raudbetoonaladest tüüpsildade laiendamise ja kandevõime analüüs [14]	Jaotis 1.1.7
2015	Vana Särevere silla koormuskatsetused ja teaduslikud analüüsid ning hüdroisoleerivate betoonide ja betoonpinna hüdrofoobsete pinnakaitsevahendite teaduslik uuring [11]	Jaotis 1.1.8
2016	Nõukogudeaegsete tüüpsildade kandevõime viimine vastavusse euronõuetega ja võimalike tugevdamise meetodite analüüs [12]	Jaotis 1.1.9
2018	Levinuimad nõukogudeaegsed sillatüübid Eestis ja nende sobivus tänapäevastele koormusmodelitele [16]	Jaotis 1.1.10
2018	Sõidukite masside ja teljekoormuste seire [99]	Jaotis 1.1.11
2019	Sildade toimivuse hindamine ja arenguvõimalused Eestis [100]	Jaotis 1.1.12

Järgnevates jaotistes on kirjeldatud Eestis läbi viidud uuringuid, mis on järjestatud vastavalt läbiviimise ajale. Samuti on vaadeldud Läti, Leedu ja Venemaa analoogseid uurimistöid. Ülevaate koostamisel on muuhulgas refereeritud ka Martin Juuli 2018. aastal kaitstud magistritööd [16], mille juhendaja oli käesoleva peatüki koostaja Sander Sein.

³ MLC – Military Load Classification.

1.1. Eesti uuringud

1.1.1. Ülekaaluliste (52 t) veoste võimalike marsruutide kaardistamine riigimaanteedel

Aasta: 2010
Teostaja: Maanteeamet
Autorid: T. Tõnts, M. Kiisa

Uuringu [6] peamine eesmärk oli olemasoleva informatsiooni põhjal luua ülevaade Eesti põhi- ja tugimaanteedel konstruktioonide tugevusest, mõistmaks, kas võrgustik suudaks kanda kuni 60 tonnist raskeliiklust.

Uuringu alguses toodi välja, et kõige keerulisem on olukord Eesti kõrvalmaanteedega, kus vajalikud algandmed on puudu, kuid mille sobivus raskeveokite jaoks on kõige halvem. Teede puhul uuriti kandevõimet lähtuvalt langeva raskusega koormusseadme mõõtetulemustest, mis omakorda jaotati kolme eri rühma:

- 1) < 200 MPa – nõrk kandevõime;
- 2) 200-270 MPa – keskmine kandevõime;
- 3) > 270 MPa – tugev kandevõime.

Selgus, et 16% maantee lõikudest on alla 200 MPa, 48% on alla 270 MPa ning 52% on üle 270 MPa. Nõrgemad kohad asuvad enamasti tugimaanteedel. Alla 270 MPa kandevõimega lõikudel tuleks piirata raskeveokite parameetreid, vältimaks konstruktiooni sügavat kahjustumist ja jäävaid deformatsioone. Alla 200 MPa lõikudel peaks andmeid täpsustama ja koostama tingimused raskeveokite lubamiseks. Mainiti ka seda, et alla 2 m telgede vahekaugusega raskeveokid tekitavad soojal ajal kiirelt pikiroopaid, sest deformatsioon ei jõua piisava kiirusega taastuda.

Sildade kandevõime hindamisel oli juba 2009. aastal välja toodud, et iga rajatis vajab individuaalset lähenemist, mis on olemuselt mahukas ning aja- ja inimressurssi nõudev töö. Erinevalt teede rühmitamisest kandevõime järgi toodi sildade puhul välja kolm eri aspekti, millest tulenevalt ei tohi lubada sinna suuremaid koormuseid:

- 1) ebapiisav silla projektkoormus;
- 2) silla kehv seisukord;
- 3) silla ebasoodsad eripärad, nt hilisemad muudatused kandekonstruktioonides.

Seisukorra põhjenduseks toodi, et vaatamata suhteliselt suurele normatiivsele projektkoormusele on meie kliimasse ebasobivate (tüüp)lahenduste kasutamise ja puuduliku hoolde tegemise tagajärjena palju kehvast seisukorras olevaid rajatisi. Piiriks, kust alates tuleks praegusega võrreldes täiendavat massipiirangut rakendada, on seisundiindeks väärtusega alla 60%. Nende sildade halb seisukord on reeglina oluliselt vähendanud konstruktiooni kandevõimet, remontimine ei ole enamasti majanduslikult otstarbekas ning sillad tuleb lähiaastatel asendada uutega. Seisundiindeksiga alla 60% oli sel hetkel 170 silda, seisundiindeksiga 60-70% oli 283 silda ning seisundiindeksiga üle 70% sildu oli 466.

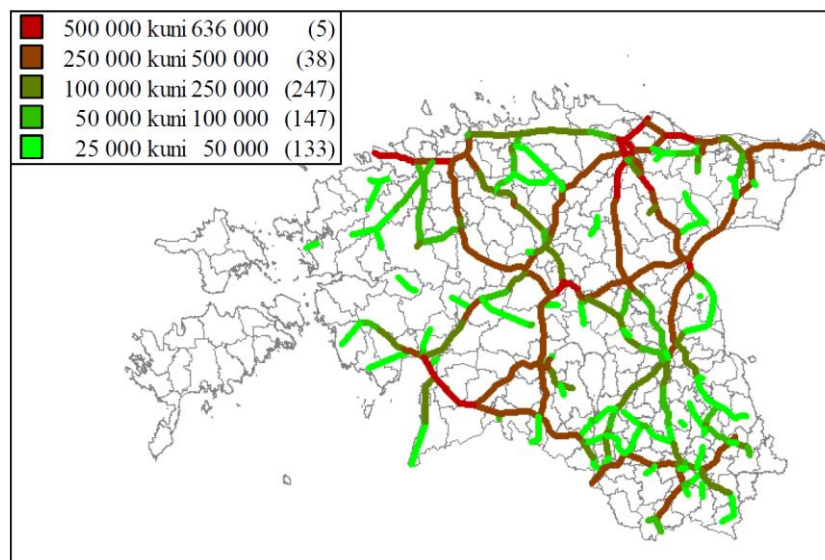
Uuringus soovitati kasutada Soome ja Rootsi spetsialistide teadmisi ja kogemusi ning tellida neilt konstruktioonide uuringud ja tasuvusarvutused. Soovitati mõõta kõrvalmaanteedel kandevõimet ja hinnata sealsete sildade olukorda. Viimaks soovitati ka tugevdatud võrgustiku loomisel täiendada seadusandlust raskeveokite pikkuse, telgede arvu ja masside osas.

1.1.2. Puidutranspordi makromajanduslik uuring

Aasta: 2010
Teostaja: Tallinna Tehnikakõrgkool, Tartu Ülikool, Eesti Maaülikool
Autorid: S. Andresen, P. Kaimre, A. Kaldas, M. Kiisa, R. Lend, R. Lind, O. Lukason, J. Lupp, A. Padari, P. Siitan, U. Varblane
Tellija: Eesti Metsatööstuse Liit

Uuringu [7] eesmärgiks oli selgitada puidutranspordi (joonis 1) raskeveokite sotsiaalmajanduslikku mõju, milles uuriti seoseid vedude arvu, liiklusohutuse, taristu investeeringute ja hoolduse vahel. Muu hulgas pidi uuring vastama küsimustele:

- 1) kuidas mõjutavad täismassid (44 t, 52 t, 60 t) ja sõidukite konfiguratsioonid liiklusohutust; teede aluse, mullete ja katendite, sildade ja teiste ristmerajatiste kandevõimet, eluiga ja remondi-/taastamiskulusid; keskkonda; metsa- ja puidutööstuse konkurentsivõimet;
- 2) millistel tingimustel võiks lubada täismassi piirangu tõstmist (nt teatud marsruudid, kiirusepiirangud, sõidukite konfiguratsioonid, juhtide väljaõpe jm).



Joonis 1. Proгноositavad puiduveo mahud Eesti maanteedel 2010. aastal [tm] [7]

Üldiselt toodi välja, raskeveo piirangud on Euroopa Liidu maades sarnased, samas Põhjamaades kehtivad täismassi suhtes mõõndused. Teiselt on masinate sage koormamine üle lubatud 40 t piiri tingitud tihedast konkurentsiolekorrast puidusektoris, seega juba 2010. aastal liikusid teedel ja sildadel 44 t täismassiga 5-teljelised veokid.

Teedel on kandevõime puhul määravaks teljekoormused ja telgede vahelised kaugused, mitte täismass, millest tulenevalt on kõige ebasoodsam 44 t veok, mis oli sellel hetkel eriloaga Eestis lubatud. Uuringus tõdeti, et koormust ei tohiks mõtle mata tõsta, sest taastusremondi sagedus ei suuda ka praeguse liikluse korral katendite töökorda tagada. Soovitati ka kehtivaid siirdetegureid uutega täiendada, arvestamaks uute raskete autorongidega. Lisaks toodi välja, et teehaldajad peaks leidma meetmeid katendite tugevdamiseks kohe või perspektiivis ning vedajad peaks kaaluma kahjude või kulude kompenseerimist.

Sildade uurimisel kasutati sarnaseid kriteeriumeid eelmises jaotises kirjeldatud tööle: ebapiisav projektkoormus, kehv seisukord ja silla ebasoodsad eripärad. Uurimus hõlmas endas riigimaanteedel asuvat 922 silda, kuid välja oli jäetud kohalikke omavalitsuste umbes 820 silda, sest nende seisukorrast ühtne ja usaldusväärne ülevaade puudus.

Ebapiisava projektkoormusega sildade arv oli uuringus väidetavalt pigem alahinnatud, sest uute standardite järgi ehitatud sildu oli sellel hetkel riigimaanteedel alla 50. Samas toodi välja, et eriveoki koormusmodeli HK-80 järgi projekteeritud umbes 400 silda suudavad kanda praegu lubatud koormust (44 t). See tähendab, et umbes 500 silda sellele nõudele ei vasta ja sellest tulenevalt üle 52 t kogumassiga veokeid Eesti teedele tervikuna lubada ei tohi. Iga sild vajab veel täiendavat uurimist, kas lubada sinna üle ühe veoki või tuleb rakendada ainult täiendavat teljepiirangut. Lisaks projektkoormusele toodi samuti välja, et piiranguid peaks kindlasti rakendama alla 60% seisundiindeksiga sildadel, sest nii halb olukord mõjutab märkimisväärselt projektijärgset kandevõimet. Selliste sildade remont pole enamasti majanduslikult tasuv ning mõttekam oleks need asendada uutega. Tuleb arvestada ka seda, et on kõrge seisundiindeksiga sildu, millel on vähenenud kandevõime tunnuseid või ebasoodsaid asjaolusid (nagu näiteks laiendamisel lisandunud täiendavad konsoolsed osad). Mainitud kriitilisi sildu on riigimaanteedel kokku paarsada, millest umbes poolsada asuvad intensiivse puitmaterjali veo lõikudel ([tabel 2](#)).

Lisaks toodi välja, et massipiirangu suurendamine ja sellest tulenevalt sõitude vähendamine tooks endaga kaasa mitmeid positiivseid muutusi nagu liiklusõnnetuste ja õhku paisatava süsihappegaasi vähenemine. Samuti paraneks kodumaine konkurentsivõime ja alaneks hinnatase.

Tabel 2. Kokkuvõtte probleemsetest riigimaanteedest [\[7\]](#)

Selgitus	Sildade arv [tk]	Sillateki pindala [m ²]
Kõik ohtlikud sillad:	208	39 561
Neist remonti kindlasti minemas:	12	1 955
remont on plaanis:	69	12 743
remondiaeg teadmata:	127	24 863
Trassidele ¹⁾ jäävad ohtlikud sillad:	42 ²⁾	15 775
Neist remonti kindlasti minemas:	2	102
remont on plaanis:	15	4 231
remondiaeg teadmata:	25	11 442
Märkused: 1) Siinkohal on mõeldud puitmaterjali transpordiks kasutatavamaid teelõike. 2) Neist põhimaanteedele jääb 14, tugimaanteedele 23 ja kõrvalmaanteedele 5 silda.		

Edasiste tegevuste jaoks tehti kaks ettepanekut:

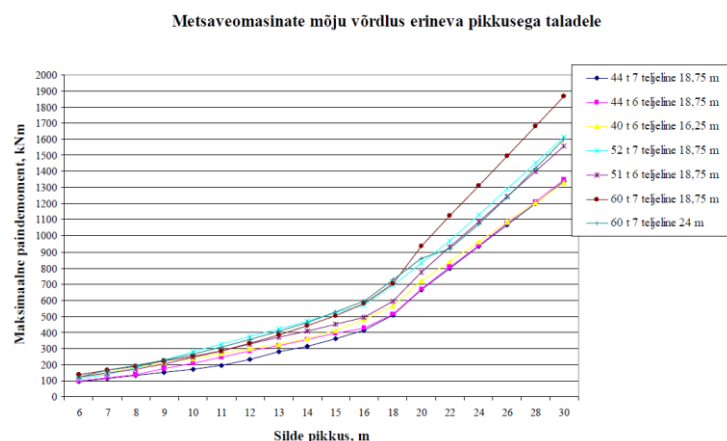
- 1) Esimese sammuna tuleks hinnata varianti lubamaks 52 t veokeid riigi osadele põhimaanteedele, kus toimub intensiivne ehitustegevus ja olemasolevate sildade projektkoormus on reeglina piisavalt suur. Tol hetkel oli väljavahetamist vajavate sildade arv orienteeruvalt 20, millest mõnede remont oli juba ka plaani võetud. Lisaks oli vajalikel teedel veel samapalju sildu, mis asuvad „ohtlikus tsoonis“ ehk neid on lähiaastatel vaja remontida, kuid hetkeseisuga võiks neist veel 52 t massiga veokeid üle lubada.
- 2) Teisena soovitati kaaluda raskeveokite piirkiiruse vähendamist sildadel, kus näiteks alates 44 t massiga veokitel oleks piirkiirus 80 km/h. See vähendaks oluliselt sildadele mõjuvaid dünaamilisi koormusi.

1.1.3. Töötlemata ümarpuidu veoks eriveosena vajaliku muldkehade läbikülumise ilmastikutingimuste ja erinevate teede kandevõime seose uuring

Aasta: 2011
Teostaja: AS Teede Tehnokeskus
Autorid: T. Kaal, M. Jentson, O. Talvik, T. Plakk, T. Kolts, V. Annus, P. Vahter
Tellija: Maanteeamet

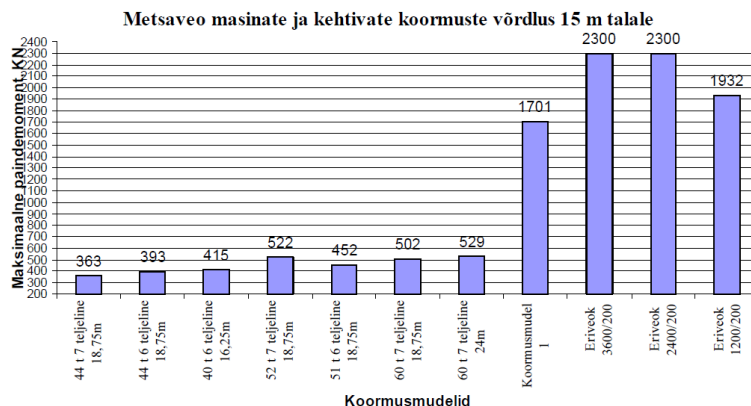
See uuring [8] oli esimene, kus läheneti sildade kandevõime uurimisele arvutuslikult. Töö eesmärgiks oli leida seosed erinevate teekonstruktsioonide tugevus- ja muude näitajate vahel, aitamaks Maanteeametil määratleda ajaline periood suurendatud piirkoormusega veokite liiklemiseks. Sildade puhul oli eesmärk analüüsida riigimaanteedel asuvate sildade seisundiindeksi (SI) ja projektijärgsete normatiivsete koormuste põhjal riski 52 t veoste lubamise kohta sildadele. Töö teostamisel koguti andmeid temperatuuride kohta, mõõdeti teekonstruktsioonide kandevõimed erinevate temperatuuride korral ja kontrolliti ning täpsustati kõikide riigimaanteedel sildade projektdokumentatsioonist nende projektkoormuste väärtused. Töös kirjeldati kuni 1991. aastani kehtinud koormusmudeleid, Eestis esinevate veokite kombinatsioone (6- ja 7-teljelised autorongid, 6-teljelise poolhaage) ja nende teljekoormusi.

Arvutusliku lähenemisega võrreldi erinevate koormuste tekitatud paindemomentide mõju erineva pikkusega raudbetoonist 1 meetri kõrguse T-talaga sildadele. Töös toodi välja, et arvutustulemused ei ole realistlikud, kuna tala on kõikidel pikkustel sama ristlõikega. Samas toodi välja, et peamine eesmärk oli võrrelda koormusmodelite mõju ja nende omavahelisi seoseid (joonis 2).

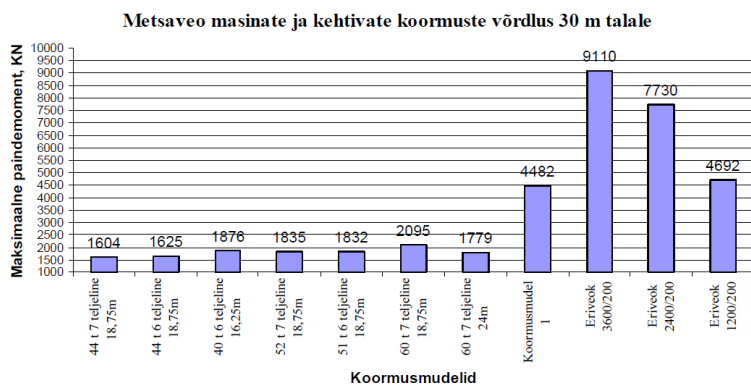


Joonis 2. Metsaveomasinate mõju erineva sildega taladele [8]

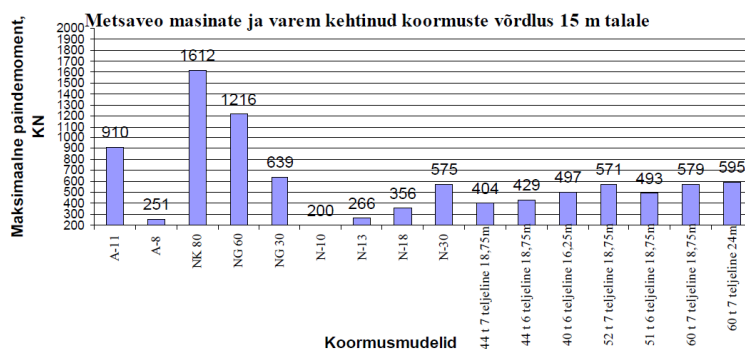
Joonistel 3 ja 4 on toodud võrdlus metsaveo masinate ja tänapäevaste koormuste poolt põhjustatud maksimaalsete paindemomentide kohta talades pikkustega 15 m ja 30 m. Nimetatud graafikutel toodud andmeid võrreldes järeldub, et 52 t 7-teljelise 18,75 m pikkuse autorongi mõju silla talale on samaväärne 60 t 7-teljelise 24 m pikkuse autorongi omaga. Seega oleks igati mõistlik veokite maksimaalse lubatud kogumassi suurendamisel suurendada ka nende kogupikkust. Lisaks nähtub, et sillad, mis on projekteeritud koormusmodelitele A-11, HK-80 ja HF-60, on võimelised kandma 60 t kogumassiga veokeid. Küll aga ei tohiks lubada hetkel lubatust suuremat kogumassi sildadele, mis vastavad koormusmodelitele HF-30, H-10, H-13, H-18 ja H-30. Analüüsi tulemustest selgub küll, et alla 16 m pikkustele sildadele, mis on projekteeritud vastavalt koormusmodelile H-30, võiks lubada veokite kogumassi suurendamist kuni 52 t, kuid siis tuleks vaadelda juba konkreetselt kogu silda, sest antud võrdluses on tegemist koormuse üldistatud mõjuga ühele elemendile, mis ei kujuta aga reaalset olukorda sillal.



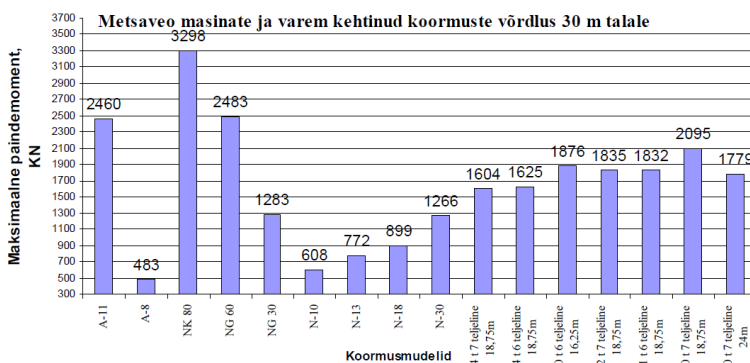
Joonis 3. Kehtivate koormusmodelite ja metsaveo masinate koormuste mõju 15 m pikkuse sildega talale [8]



Joonis 4. Metsaveomasinate mõju 30 m pikkuse sildega talale [8]



Joonis 5. Varem kehtinud koormusmodelite ja metsaveomasinate mõju 15 m pikkuse sildega talale [8]



Joonis 6. Varem kehtinud koormusmodelite ja metsaveomasinate mõju 30 m pikkuse sildega talale [8]

[Joonistel 5 ja 6](#) on toodud võrdlus Eestis kasutatavate metsaveomasinate konfiguratsioonide ja varem Eesti territooriumil kehtinud normides kasutatud koormusmodelite poolt tekitatud toereaktsioonide vahel. Enamik olemasolevaid sildasid Eestis on projekteeritud vastavalt varem kehtinud koormusmodelitele. Välja toodud toereaktsioonide väärtused iseloomustavad valitud koormuskombinatsioonide poolt põhjustatud toereaktsioone maksimaalsete avamomentide korral ning on mõeldud suurusjärgude võrdlemiseks.

Lisaks analüüsiti ka sildade olukorda ning leiti, et seisundiindeksiga kuni 59% oli Eestis 165 silda, indeksiga 60-79% oli 480 silda ja indeksiga 80-100% oli 288 silda. Kuna info oli lünklik, tehti Maanteeameti regioonidest järelepärimisi ning selgus, et seisundiindeksile tuginedes ei võinud lubada 94-le sillale raskemaid masinaid. Teede osas rõhutati, et pinnase sulamine on komplitseeritud protsess ja sõltub mitmetest teguritest. Lisaks on Eesti kliima üsna muutlik, sest mõnel talvel on temperatuurid pikalt alla -20 kraadi, mõnel talvel aga miinuskraade eriti ei esinegi. Enne suuremate piirkoormuste lubamist soovitati analüüsida igat konkreetset marsruuti. Kui lubada koormuste suurendamist, soovitati vähendada nende piirkiiruse vähendamist teatud teelõikudel, vähendamaks dünaamilist lisakoormust sildadele. Lahendusena pakuti sildade juures teekatte parandamist ning tasasemaks muutmist, samas tunnistati, et sild ja teekonstruktsioon on ehitatud erinevatest materjalidest ja kogemusele tuginedes käituvad need temperatuurimuutustele erinevalt.

7-teljeliste veokite puhul on piirkoormuse tõstmine kõige soositum, sest selline teljekombinatsioon tekitab kõige vähem lisakoormust. Samas leiti analüüsi tulemusel, et metsaveokite koormusmodelitest tekkivad paindemomendid on väiksemad kui projekteeritud koormusmodelite tekitatuid. Kui on täidetud kõik vajalikud tingimused, võiks sildadele lubada kuni 60 t täismassiga veokeid. Suuremaid veokeid ei tohiks lubada sildadele, mis projekteeriti koormustele HF-30, H-10, H-13, H-18 ja H-30. Samuti oli riigimaanteedel 119 silda, millel ei saanud piirkoormust tõsta, sest neil polnud teada projektikoormust, projektikoormus oli liiga väike või seisundiindeks ei võimaldanud seda teha. Tuleb arvestada ka seda, et uuringus käsitleti vaid riigimaanteedel sildu ning umbes 800 kohalikele omavalitsustele kuuluvat silda vajavad lisatähelepanu.

Lähtuvalt arvutuslikust analüüsist võiks sildadele põhimõtteliselt lubada teatud mööndustega kuni 60 t raskusi veokeid, kuid mõni raskeveok võib sattuda ka kohaliku omavalitsuse ebakindla seisunditasemega sillale, mille kohta vajalikud andmed puuduvad. Kui saaks kohaliku omavalitsuse sillad registrisse võtta ja külmumisprotsessiga seonduv teaduslikult selgeks teha, oleks 60 t veokite teedele lubamine üsna reaalne.

1.1.4. Riigimaanteed ja sildade tugevdamise maksumuse hindamine tulenevalt 52 t veoste aastaringse liikumise võimalusest

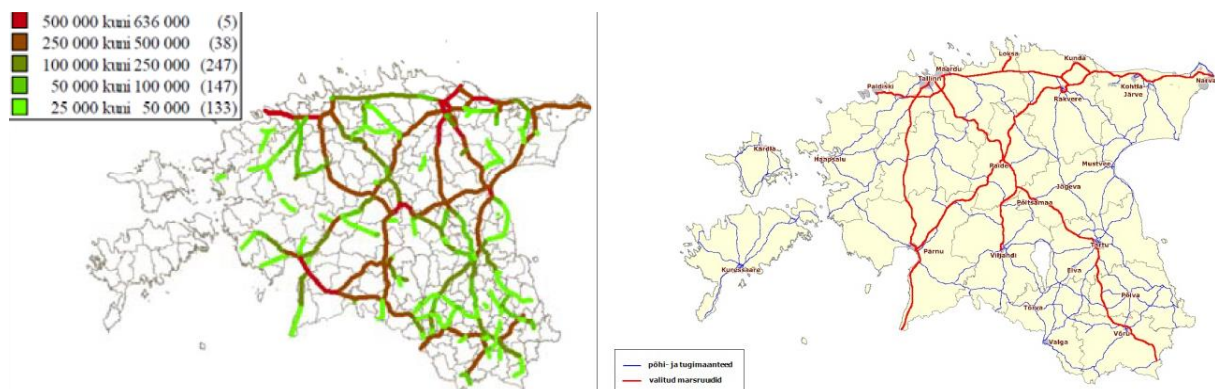
Aasta: 2011
Teostaja: Ramboll Eesti AS
Autorid: A. Kendra, E. Rohelsaar, P. Škepast, A. Brakmann, R. Sõrmus
Tellija: Maanteeamet

Uuringu [9] eesmärk oli uurida, kui palju peab investeerima teedevõrku, et riigiteedel saaks lubada 52 t veokite piiranguteta liiklemise. Töös käsitletakse riigimaanteedel olevat 937 silda, mis jaotatakse erinevate näitajate põhjal. Lisaks on kajastatud Eestis kehtivaid piirmäärasid sõidukitele. Väga põhjalikult on analüüsitud teekonstruktsioone, kuid siinkohal seda ei vaadelda.

Sildade kandevõime uurimise eesmärgiks oli uurida, kui suur osa sildadest vajab ümberehitust ja milliseks kujuneb tööde võimalik maksumus. Sillad jaotati alljärgnevalt:

- 1) sildade vanuseline jaotus vastavalt 2010. aastal teostatud sildade ülevaatuse aruandele, millest sorteeriti välja 203 rajatist;
- 2) sildade pikkuse järgi (arvestades seejuures ka silla seisundiindeksit) on remonti vajavad 140 silda jaotatud kolme gruppi;
- 3) sildade seisukorra analüüsimine vastavalt 2010. aastal arvutatud seisundiindeksitele, mille tulemusena grupeeriti 165 silda kahte eri gruppi.

Lahendusena pakuti välja sildade tugevdamine, mille aluseks võeti keskmised ehitushinnad ajavahemikus 2008 kuni 2010. Uuringu tulemusena leiti, et 140 silla kandevõime vastavusse viimine oleks nende hinnangul maksnud 37,5 miljonit eurot ning 40 seisundile mittevastava silla rekonstrueerimine omakorda 6,7 miljonit eurot, mis oli tänapäeva eelarvet arvestades väga optimistlik hinnang. Samas oli seda ka töös mainitud, et hindasid on vaja korrigeerida vastavalt hindade muutusele. Kulu ja tuluanalüüsis toodi välja, et valitud rajatistel koormuse tõstmine 40 tonnilt 52 tonnile vajab investeeringuid 30,8 miljonit eurot.



Joonis 7. Puiduveedude skeem ja käesolevas töös uuritud valim [9]

Uuringu kokkuvõte:

- 1) FWD-mõõtmiste teel on selgunud, et Soome riigiteede kandevõime on 1,32 korda suurem kui Eesti riigiteedel (kaalutud keskmine võrdlus kandevõimeklasside keskmiste ja Eesti teedevõrgu struktuuri alusel).
- 2) FWD-mõõtmistel väljaselgitatud tegeliku kandevõime väärtuse ja projekteerimismõõtmiste järgse (40 t) arvutusliku vajaliku kandevõime väärtuse vahe (puudujäägi) maksumuseks on 62 miljonit eurot ning kokku ca 3300 km Eesti riigiteedest (20%) ei vasta ka tänastele nõuetele. Tänastele nõuetele ei vasta 40 silda (4%), mille rekonstrueerimise maksumus on orienteeruvalt 7 miljonit eurot.
- 3) FWD-mõõtmistulemuste ja 52-tonnisele koormusele vastava konstruktsiooni kandevõime vahe (puudujäägi) maksumuseks on 417 miljonit eurot ning konstruktsiooni tugevdamine on vajalik kokku 7900 km riigiteedel (47,8% teedevõrgu pikkusest). Kasutades FWD indekseid (mis arvestavad ka tehnoloogilisi võimalusi), on tõenäoline rekonstrueerimise maksumus kokku 1,32 miljardit eurot. 52-tonnisele koormusele ei vasta 140 silda (15%), mille rekonstrueerimise maksumus on 37,5 miljonit eurot.
- 4) Investeeringu tasuvusarvutused on tehtud eeldusel, et infrastruktuuri täna kehtivate nõuetega vastavusse viimist ei arvestata puidutranspordi eeldatavate tuludega võrdlemisel – seega, eeldusel, et tänane teedevõrk koos sildadega vastab kehtivatele nõuetele, on täiendavate kulude kogusumma riigiteedele ja sildadele 766 miljonit eurot.
- 5) Eesti riigiteede katendite kogumaksumuseks on 40-tonnise koormuse korral 2,3 miljardit eurot ja 52-tonnise koormuse korral 3,3 miljardit eurot. Maanteeameti bilansis on riigiteede soetusmaksumuseks (ilma sildadeta) 1,3 miljardit eurot.
- 6) Kulu-tulu analüüsi põhjal ületavad 10-aastase investeeringuperioodi diskonteeritud kulud 25-aastase vaatlusperioodi tulused ligikaudu 5 korda.
- 7) Eesti projekteerimismõõtmised ja mitmesugused juhendid on omavahel vastuolus. Kehtivad normdokumendid ei kajasta täna tegelikult kasutuses olevaid koormusi (rehvitüübid ja rehvisurved). Korrigeerida tuleb ka elastsete teekatendite projekteerimise juhendit. Kuna meil puudub selge ülevaade seni kehtiva süsteemi lähteandmetest (alustest), mistõttu ei ole võimalik põhjendatult sisse viia vajalikke korrekture ja võtta kasutusele uusi materjale, siis soovitame uurida võimalusi Taani katenditarkvara MMOPP2011 kohandamiseks Eesti tingimustele ja selle kasutuselevõtuks.

1.1.5. Eestis toimunud BMS-uuringute analüüs. Tulemuste kasutamine sildade halduse planeerimisel

Aasta: 2012
Autor: A. Papp

Antud Tallinna Tehnikaülikooli magistritööd [13] on kajastatud seetõttu, et siin on analüüsitud sildade hindamise tulemuste tõlgendamiseks kasutatud seisundiindeksit ja uuritud selle näitaja sobivust kandevõime hindamiseks.

Töös anti põhjalik ülevaade ka Eestis kasutusel olnud tarkvarasüsteemist Pontis. Lisaks on kirjeldatud ka seisundiindeksit, mille hindamiseks on välja töötatud seisunditasemete kirjeldused. Olemasolevad kirjeldused olid suhteliselt napisõnaliselt ning mitme elemendi puhul analoogsed. Samuti oli mitme elemendi puhul välja toodud, et elemendile seisunditaseme „4“ omistamiseks peab olema vähenenud elemendi tugevus, kuid puudub täpsem analüüs, millises ulatuses defekte millistel elementidel peaks hindama madalaima seisunditasemega. Autori poolt sõnastatud kokkuvõtlikud ja põhilisi aspekte käsitlevad seisundikirjeldused on toodud tabelis 3.

Tabel 3. Silla elementide seisundihinnangud ja nendele vastavad seisundid [13]

Seisunditase	Seletus elemendi seisundi kohta
S1	Elemendil puuduvad kahjustused ja kulumise tunnused. Element ei vajaks pisiremonti isegi juhul, kui brigaad oleks antud silla juures.
S2	Element on põhimõtteliselt heas seisukorras, kuid siiski edasise lagunemise kiirenemise takistamise huvides peaks teostama pisiremonti.
S3	Element vajab suures ulatuses remonti, kuid ülevaataja hinnangul ei tähenda see otsest ohtu silla tugevusele, liiklusohutusele või teistele silla elementidele. Element vajaks võimalikult kiiresti põhjalikku remonti või asendamist.
S4	Element on amortiseerunud või purunenud. Element ei täida oma funktsiooni ja kujutab tõsiselt ohtu silla tugevusele, teistele elementidele või ohutusele. Element vajaks viivitamatut kapitaalremonti või asendamist.

Tabelis toodud kirjelduste järgi jagatakse ülevaatus käigus iga silla kõik elemendid maksimaalselt neljaks ning hinnatakse, kui suur osa elemendist millisesse seisunditasemesse kuulub. Lisaks seisunditasemetele oli seisundiindeksi arvutamiseks vajalik teada abisuurusi „Kaalufaktor“ ja „Ühikmaksumus“. Eestis tehti see suur ja ajamahukas töö süsteemi juurutamisel. Arvud olid saadud mitmete katsetuste ja proovimistega, et kogu süsteem toimiks selliselt, et tulemused oleksid kõigil juhtudel adekvaatsed. Toona määratud kaalufaktorid ja ühikhinnad justkui määrasid selle taustsüsteemi, mille põhjal Eestis BMS uuringuid läbi viiakse, sest muutes kas mõne elemendi kaalufaktorit või ühikhinda, muutub silla SI paari protsendi võrra.

Ühe silla seisundiindeks on ülevaatus põhjal hinnatud hetkelise väärtuse osa maksimaalsest võimalikust. Selleks võrreldakse kahte näitajat: CEV⁴ (iga elemendi seisundist sõltuv rahaline väärtus) ja TEV⁵ (iga elemendi asendamise rahaline väärtus).

⁴ CEV – Current Element Value.

⁵ TEV – Total Element Value.

Seisunditasemetele on arvutustes määratud koefitsiendid ([tabel 4](#)), mis vähendavad igasse seisunditasemesse hinnatud elemendi osa ühikväärtust.

Tabel 4. Seisundiindeksi arvutamisel kasutatavad koefitsiendid [13]

Seisunditase	Koefitsient
S1	1,00
S2	0,67
S3	0,33
S4	0

Vastavalt varasematele väärtustele arvutati ühe elemendi hetkeväärtus (CEV), koguväärtus (TEV) ja kogu rajatise seisundiindeks (SI) ning uuriti varasemaid sildade ülevaatuseid.

Lisaks põhjalikule ülevaatuste ja investeringute analüüsile keskenduti antud töös ka ülevaatus tulemuste kasutamiseks kandevõime hindamisel. Mitmel puhul on töös rõhutatud, et PONTIS sillahaldussüsteem on eeskätt sillavõrgu investeringuvajaduste planeerimiseks ning nende täpsus sõltub väga suuresti visuaalsete ülevaatuste ja teiste sisendparameetrite omavahelisest suhtest. Sellest tulenevalt defineeritakse silla kandevõime, mis on silla võime võtta vastu projekteerimisel kasutatud koormusmodelite poolt tekitatud mõjud (sisejõud, deformatsioonid, siirded) ning samal ajal täita hetkel kehtivaid kasutus- ja kandepiiriseisundi nõudeid.

Töö autor oli seisukohal, et kõiki elemente sisaldav „kaalutud“ hinnangute põhjal arvutatud näitaja ei ole silla kandevõime iseloomustamiseks kuigi sobilik. Seda mitmel põhjusel:

- 1) Esiteks tekitab valitud kaalufaktorite arv ja omavaheline proportsioon kindlaks määratud taustsüsteemi, milles kogu hindamine edaspidi toimuma hakkab. Ilma selle taustsüsteemi olemust mõistmata on ennatlikud, et mitte öelda valed järeldused arvutustulemustest kiired tekkima.
- 2) Teiseks – selleks, et suhtelises taustsüsteemis olevast hinnangust midagi välja lugeda, on vajalik kaks erinevat ülevaatus, et täheldada muutusi. Need täheldatud muutused ei sõltuks enam otseselt algselt kasutatud kaalufaktoritest. Siinkohal kerkib ülesse probleem, et mitme palli skaalal elemente hinnata. Kui teha lihtne ja kergesti eristatav 3-palliline skaala, võib üks element ühes seisundis olla mitu ülevaatusete tsükli ning seetõttu on andmete kogumine ja nende põhjal otsustamine väga aeganõudev ning uuringute kvaliteet raskesti kontrollitav. Kui teha aga näiteks mõnes USA osariigis kasutusel olev 9-palli skaala, tekiks koheselt vajadus ülevaatusete teostajate koolituse ja „kalibreerimise“ järele.
- 3) Kolmandaks on töö autori hinnangul elementide seisundi kaalutud keskmise leidmine oluline juhul, kui tahta sildu võrrelda (nagu näiteks investeringuvajaduse puhul tarkvaras PONTIS). Erinevate sildade kandevõimet iseloomustavate näitajate võrdlus ei oma töö autori silmis erilist väärtust. Investeringuvajadus on suhteline mõiste ja sõltub kogu sillapargi seisukorrast. Kandevõime on aga üks kindel suurus iga silla puhul ning selle võrdlemine näiteks sillavõrgu keskmisega ei oma erilist tähendust.

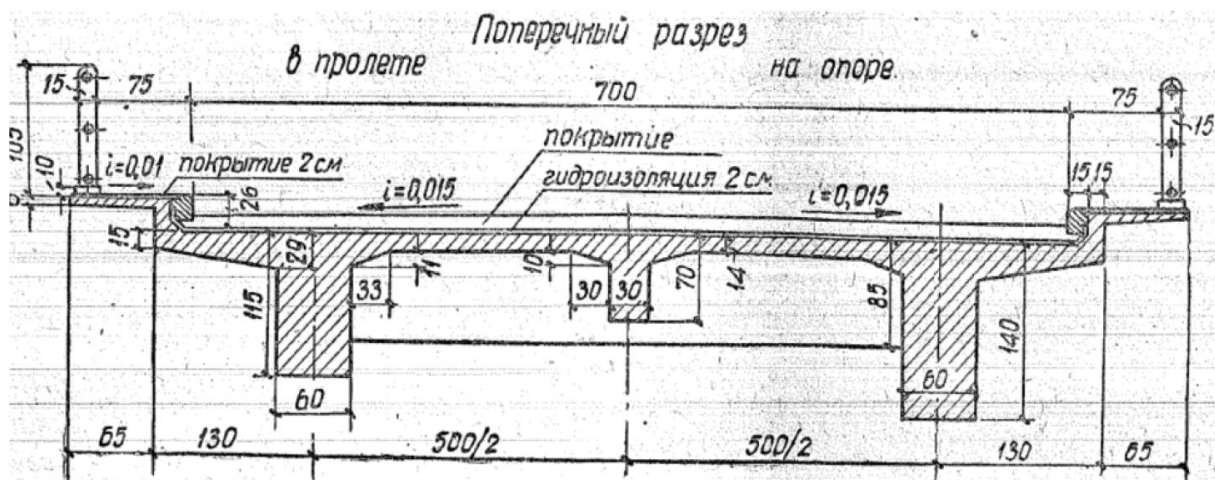
Seega kokkuvõtlikult on visuaalne ülevaatus subjektiivne tegevus ja SI ei ole sobilik hindamaks rajatise kandevõimet.

1.1.6. Tallinn-Narva mnt asuva Loobu silla katsekoormamine

Aasta: 2013
Teostaja: Tallinna Tehnikaülikool
Autorid: S. Idnurm, J. Idnurm, A. Ellmann
Tellija: Maanteeamet

Antud uuringu [10] aluseks oli asjaolu, et Eesti teedel senini teostatud kaalumistulemuste järgi on paljudel juhtudel probleemiks ülekaalulised veokid. Autorongide tegelik mass ületas lubatud piiri (44 t) kümneid tonne, mis põhjustab teedele ja sildadele liialt suuri deformatsioone. Kriitilise punktina toodi välja vanad sillad, kus liialt suured koormused võivad tekitada lubatust suuremaid läbivajumisi. Senini ei olnud täpselt teada, kui palju võtavad NSVL ajal rajatud sillad koormust vastu tegelikult võrreldes projekteeritud teoreetiliselega. Tallinn-Narva mnt asuva Loobu II silla katsekoormamise teadus- ja arendustöö eesmärgiks oli välja selgitada, kui palju tegelikult Loobu sild koormuse all deformeerub ning võrrelda seda sillale ette nähtud koormusmudeli poolt nõutavaga.

Loobu II sild oli ehitatud 1953. aastal 1947. a tüüpprojekti „Сборник типовых проектов железобетонных и каменных искусственных сооружений. Выпуск 6. Железобетонные балочно-консольные пролетные строения. Пролеты L_0 - 12, 16, 20, 25 и 30 м. Габарит Г-7. Нагрузка Н-10 и Н-60. Дориздат, Москва, 1947“ kohaselt (joonis 8). Sild oli üheavaline konsoolidega, mõõtudega 6,9+17,4+6,9 m ning kogupikkusega 31,2 m.



Joonis 8. Loobu II silla ristlõige [10]

Silla ülevaatuse tulemusena märgiti, et kandetalastiku olukord oli halb. Piki ja põikarmatuurid roostetasid ja betoonkaitsekihis olid sellest tingituna märgatavad praod, osaliselt oli armatuur paljandunud. Silla keskel olid omakaalu ja liikluskoormuse mõjust vertikaalsed praod laiussega ~0,1 mm ja sammuga ~45 cm (foto 1). Silla plaadi alapinnal olid näha lagunenud hüdroisolatsioonist vee läbijooksujäljed (foto 2).

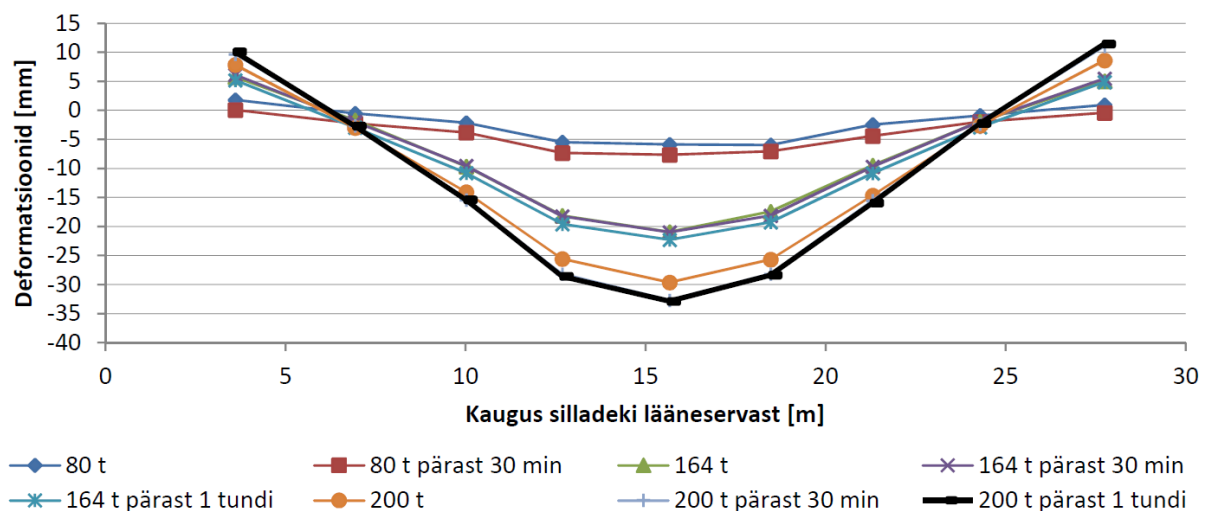


Foto 1. Loobu II silla peatala külgsuurt, kus on näha praod [10]



Foto 2. Loobu II silla altvaade peataladele ja tekiplaadile [10]

Sillale rakendatud maksimaalse koormuse 200 t korral, mis ületas projektikohase eriveoki kaalu üle 3 korra, tegelikku purunemist ei toimunud (joonis 9). Oodatav purunemispilt oli suurte deformatsioonide arenemine talade tõmbetsoonis, tõmbearmatuuri voolumine, pragude avanemine ja nende levik survetsoonini, tõmbetsooni betooni pudenemine ning sild jääb armatuurvarraste külge rippuma. Kuni koormuseni 164 t oli talade keskkoha deformatsioonide graafik praktiliselt lineaarne, kuid selle graafiku muutumine mittelineaarseks viimase koormuse 200 t korral ja deformatsioonide suurenemine ajas viitab piirkoormuse lähenemisele. Tõenäoliselt sild puruneks 250-300 t koormuse rakendamisel, mis on projektikohasest koormusest ca 4-5 korda suurem.



Joonis 9. Silla deformeerunud kuju erinevatel koormustel [10]

Loobu II silla katsetamine andis väärtuslikke kogemusi sellise purustava koormusega katsetamise läbiviimise kohta ja tõestas asjaolu, et väga sageli alahinnatakse vanade sildade tegelikku kandevõimet.

1.1.7. Eestis ehitatud nõukogudeaegsete raudbetoontaladest tüüpsildade laiendamise ja kandevõime analüüs

Aasta: 2015
Autor: T. Liigmann

Tõnis Liigmann uuris aastal 2015 oma magistritöö [14] raames nõukogudeaegseid sildasid ja nende kandevõimet. Peamine uuringu eesmärk oli teada saada, kas laiendatud sildadele saaks lubada ka suurema massiga autoronge või mitte.

Andmed koguti kasutades teeregistri andmebaasi, täpsemalt punktandmete aruande vormi. Valimisse läksid kõik riigimaantee sillad, kaasa arvatud ka suletud ja mitte kasutusel olevad sillad. Algsest 999 sillast jäi andmetöötamise tulemusel järgi 948 silda, sest 51 silda olid kas topelt sissekandega, mõeldud jalakäijatele, polnud kasutusel või nende kohta puudusid andmed. Lisaks toodi välja, et tänu andmeliikide sisulisele erinevusele sisalduvad mõned sillad registris topelt. Põhjus on selles, et teid käsitletakse joonandmetena, sildu aga punktandmetena. Tihti on joonandmete jaotuspunktideks just sillad, mis tekitabki ebatäpsusi. Töös ei käsitletud kohalike omavalitsuste sildu (umbes 820 tk), sest nende kohta polnud terviklikke andmeid.

Peakanduri tüübi järgi oli registris kõige rohkem monteeritavaid lihttala sildu. Andmed pole aga piisavalt täpsed, sest registris ei eristata monteeritavaid ja monoliitbetoonist valatud sildu. Ehitusmaterjali põhjal oli kõige rohkem raudbetoonist sildu. Andmebaasi põhjal järeldati, et kõige enam on Eestis monteeritavaid raudbetoonist lihttalasildu. Uuringu hetkel oli Eesti riigitee sildade keskmine vanus 45 aastat, keskmine seisundiindeks 79%.

Järgnev analüüs pidi selgitama, kui palju oli laiusgabariidilt alamõõdulisi sildu. Selleks koostati arvutuslikud ristlõiked ning teostati kandevõime kontroll. Analüüsis koostati olemasoleva silla arvutusmudel ning selle järel projektkoormusmudel. Võrdluse tarbeks koostati erinevaid laiendatud silla arvutusmudeleid, millele rakendati esialgsed koormusmudelid, euronormide koormused ja reaalsed metsaveo autorongid. Arvutuslike ristlõikega koostamisel lähtuti eelkõige sillatüübist, mida on laiendamist vajavate sildade hulgas enim (raudbetoonist monteeritavad lihttalasillad). Andmetöötlemisest järeldus, et tervelt 417 silda ehk 44% ei vastanud minimaalsetele sõidutee laiusnõuetele, kusjuures suurim probleem oli 5. klassi teedega.

Nõukogudeaegsed Eesti lihttala raudbetoonsillad projekteeriti peamiselt kahe tüüpprojekti kataloogi põhjal aastatest 1958 (tüüpkataloog 56) ja 1962 (tüüpkataloog 56 lisa). Antud töös keskenduti ainult seda tüüpi rajatistele. Modelleerimisel kasutati nn *grillage* meetodit ehk silla pikikandurid ja tekiplaat modelleeriti diskreetsetest talaelementidest. Töös järeldati, et ekstsentrilise surve meetodi tulemused sarnanesid *grillage* meetodi omadega. Põikjõukandevõime kontroll näitas, et põikarmatuur oli kandevõime tagamiseks piisav, kui teha 1 m laiendus. Üks peamine tegur on ka see, et laiendamine sõltub paljuski silla tehnilisest seisundist, mitte seisundiindeksist. Arvutuslikest tulemustest vajasis sildadest laiendamist 141 tk, millest 111 tk vastasid neile tüüpkataloogidele. Tavaliselt jäi talade arv 2 ja 10 vahele; kõige enam projekteeriti need 5 või 6 peakanduriga (80 silda). Analüüsi tarbeks oli andmete põhjal arvestatud sõidutee keskmiseks laiuks 7 m.

Tabel 5. Arvutuslike ristlõigete paindemomentide koondtabel [14]

Erinevate arvutusmodelite tulemuste võrdlus. Arvutuslik paindemoment talas, kNm													
	Koormusmodel	Esiagne laius, ekstsentriline surve				1m laiendus, ekstsentriline surve				1m laiendus, LEM mudel			
		Vanema tüübi 5 talaga	Vanema tüübi 6 talaga	Uuema tüübi 5 talaga	Uuema tüübi 6 talaga	Vanema tüübi 5 talaga	Vanema tüübi 6 talaga	Uuema tüübi 5 talaga	Uuema tüübi 6 talaga	Vanema tüübi 5 talaga	Vanema tüübi 6 talaga	Uuema tüübi 5 talaga	Uuema tüübi 6 talaga
EVS-EN 1991-2:2004	KM1, $\alpha_q1=0,8$									1611	1262	1540	1205
	KM3, 1200/200									1342	1061	1299	1061
SN 200-62	N-10, $\mu=1,25$	644	539	667	567	749	616	758	635	762	594	766	599
	N-13, $\mu=1,25$	755	627	772	651	886	722	885	734	884	683	878	683
	N-18, $\mu=1,25$	829	689	847	715	990	807	986	817	1009	775	964	777
	N-30, $\mu=1,25$	829	689	847	715	990	807	986	817	1012	776	966	778
SNIp 2.05.03-84	A-11, $\mu=1,30$	952	787	962	808	1144	926	1128	928	1145	779	1083	875
	NG-60	780	637	783	654	798	653	802	670	776	625	777	647
	NK-80	944	767	937	774	963	783	956	790	890	720	869	747
Metsaveok	53,5t metsaveok									886	701	883	688
	61,5t metsaveok									1040	829	1037	797

Tabel 6. Viie talaga tüüpkataloogide põikjoa kandevõime arvutustulemused [14]

Koormusmodel		VANA TÜÜP	UUS TÜÜP
		Max arv. Qz, kN	Max arv. Qz, kN
EVS-EN 1991-2:2004	KM1, $\alpha_q1=0,8$	602	533
	KM3, 1200/200	485	444
SN 200-62	N-10, $\mu=1,24$	313	289
	N-13, $\mu=1,24$	343	333
	N-18, $\mu=1,24$	408	349
	N-30, $\mu=1,24$	408	349
SNIp 2.05.03-84	A-11, $\mu=1,3$	382	328
	NG-60	320	284
	NK-80	390	333
Metsaveok	53,5t metsaveok	396	377
	61,5t metsaveok	440	418

Uuringust selgus, et enamusel uuritud sildadest oli piisav kandevõime varu (tabelid 5 ja 6) ning neid võis laiendada vähemalt ühe meetri võrra, kuid kandevõimet pidi sealjuures kirjeldama endisaegsete koormusmodelite abil. Lihtsate ja ökonoomsete võtetega ei saa NSVL aegsete sildade tüüptalade kandevõimet tagada, et kanda tänapäevaseid normkoormusi. Tüüpkataloogi 56 järgi ehitatud viie talaga sildadele metsaveo autoronge lubada ei saa. Samas muudel juhtudel on tagatud kandevõime 53,5 t autorongidele, suurematele koormustele (vähemalt H-18/HK-80) projekteeritud sildadel ka 61,5 t autorongidele. Eurokoodeksi koormusmodelitele KM1 ja KM3 on kõikidel uuritud sildadel kandevõime ebapiisav. Lisaks toodi välja, et laiendamist on sobilik kaaluda ainult heas seisukorras sildadele, mille SI on üle 60%, sest alla selle peaksid olema sillal sellised kahjustused, et ka kandevõime on vähenenud.

1.1.8. Vana Säreveere silla koormuskatsetused ja teaduslikud analüüsid ning hüdroisoleerivate betoonide ja betoonpinna hüdrofoobsete pinnakaitsevahendite teaduslik uuring

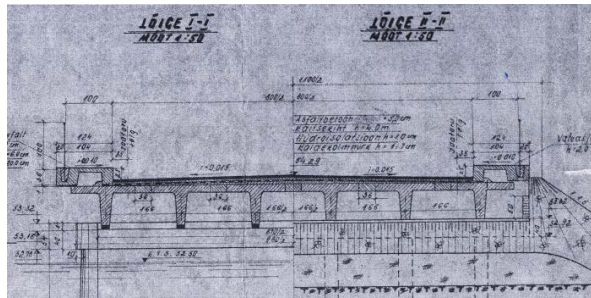
Aasta: 2015
Teostaja: Tallinna Tehnikaülikool
Autorid: S. Idnurm, J. Idnurm, E. Peeker, A. Ellmann
Tellija: Maanteeamet

Uuringus [11] käsitleti vana Säreveere silla katsetamist, mis oli jätkuks Loobu II silla katsetusele. Kui Loobu II silla puhul koormati tüüp-kataloogile vastavat, kuid Eestis vähem levinud sillatüüpi (riigiteedel on selliseid vähem kui 40), siis nüüd sooviti sarnast uuringut teostada rohkem levinud tüübile (kataloog 56). Katsetamisel oli kaks eesmärki:

- 1) uurida, kas ligi 50 aastaste lihttala sildade korral, rakendades projektseid koormusmudeleid (reaalse sillaplaadi koormamise teel), tekib koormuse all projektsest suuremat läbivajumist ning ilmneb projektsest suuremat kandevõimekadu silla vananedes;
- 2) määrata Säreveere silla keskmise ava purustav koormus, mille määramiseks koormati silda HK-80 ja teiste projektijärgsete koormusmodelite kohaselt (foto 3).



Foto 3. Säreveere silla katsetamine



Joonis 10. Väljavõte Säreveere silla esialgsest projektist [11]

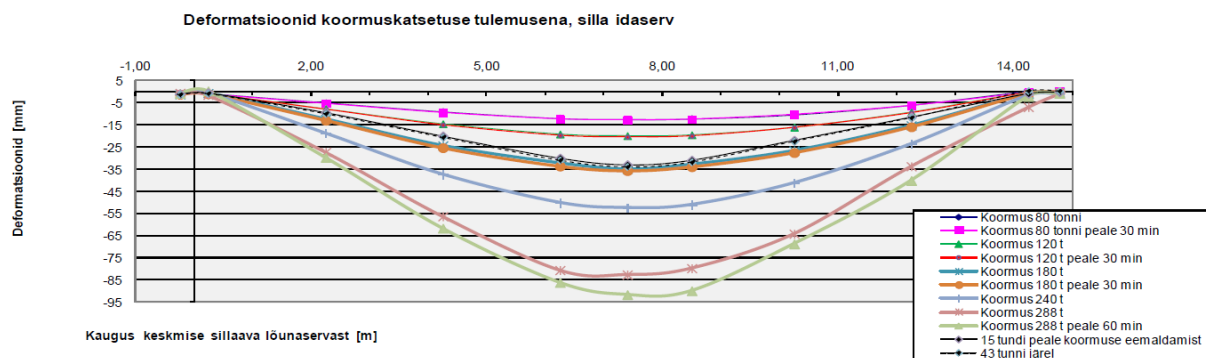
Enne renoveerimist oli silla laiusgabariit G-8 (st sõidutee laius oli 8 m) ja sillatalade arv 6. Peale renoveerimist oli silla kogulaius 11,6 m ja sõidutee laius 11,5 m. Sõidutee laiendamine toimus varem olnud kõnniteede ärajätmise ja sillale täiendava tala lisamise arvel. Esialgse projekti ristlõige on toodud joonisel 10.

Kontrollarvutused teostati nii projektikohaste omaduste kui ka mõõdetud väärtustega. Lisaks tüüpsetele koormuskombinatsioonidele kasutati antud töös koormustena ka NATO MLC klassifikatsiooni põhist arvutusmodelit. Arvutustulemustest järeldus, et tüüpprojekti kohastele taladele ei saa otseselt tavaliiklusradade korral rakendada eurokoodeksi põhiseid liikluskoormuste mudeleid LM1 ja LM3 Eestis kasutatavate vähendusteguritega. Põhjuseks on võrreldes varasemate normidega suuremad koormuste osavarutegurid ja LM3 korral suuremad koormuste väärtused. Eriveoste kohapealt toodi välja, et need tuleb paigutada võimalikult tee telje lähedusse, mis tagab koormuse ühtlasema jaotuse talade vahel. Eurokoodeksi kohaste veoste paiknemine silla serva läheduses pole antud talade korral võimalik. Üsikute raskeveokite jaoks kasutatud NATO MLC mudelite kasutamisel jäi ka silla servas toimuva liikluse korral silla lühem ava kategooriasse MLC150 ja keskmine pikem ava kategooriasse MLC100. Vaadates eri raskeveokitega teostatud võrdlusarvutusi, võis järeldada, et sild kannatas paaristelgede korral kuni 13 t teljekoormust ja kolmeste telgede korral

teljekoormust kuni 11 t, mis ümberarvutatult üksikule teljele ületab 18 t tingimusel, et telgede vahe on vähemalt 4,7 m. Kõikidel juhtudel olid rahuldatud kasutuspiirseisundi tingimused.

Reaalsete raskeveokite poolt põhjustatud sisejõud jäid väiksemaks talade piirkandevõimest ning samuti koormuse HK-80 poolt põhjustatud sisejõududest. Seega puudus alus vastava pikkusega taladele sarnaseid veokeid mitte lubada (kui talade kandevõime vastab HK-80-le). Kui tüüptalade pikkus ületab 13,7 m, siis on võimalik, et silla sildeavasse mahub rohkem kui üks telgede grupp ja sellisel juhul võivad sisejõud ületada eriveoki HK-80 omi.

Katsetuste käigus selgus, et hoolimata talade halvast seisust ületab silla kandevõime projektikohaseid suuruseid, seega puudub alus seisundihinde alusel kandevõime otseseks vähendamiseks, sest osavarutegurite süsteemi tõttu on silla tegelik kandevõime oluliselt suurem kui arvutustega saadud arvutuslik kandevõime. Et hinnata arvutusliku kandevõime vähenemist 3. ja 4. seisundi talades, tuleks määrata talade arvutuslik kandevõime lähtudes betooni tugevnemisest sõltuvalt kivinemisperioodi kestusest ja armatuuri ristlõikepindala vähenemisest korrosiooni tõttu.



Joonis 11. Keskmise ava äärmise tala läbipaanded (mõõdetud nivelleerimise teel) [11]

Tulemustest järeldus, et sild ei purunenud täielikult suurima koormuse all, kuid tulenevalt siirete jätkuvast suurenemisest võis kandevõime lugeda ületatuks. Kõikide koormusmodelite juures käitus sild jäigemalt, kui erinevad arvutusmodelid seda näitasid.

Lisaks staatilisele koormamisele teostati Tallinna Tehnikakõrgkooli poolt konstruktsioonide uuringud, mille tulemusena anti sillale rahuldav hinnang ja toodi välja, et suuremad kahjustused on seotud ebakvaliteetsete betoonitööde teostamisega, vete juhtimisega üle serva, korrektsete tugiosade puudumisega, hüdroisolatsiooni lekkimisega ja liiga väikese betoonist kaitsekihiga. Ühel talal esinevad kahjustused on sedavõrd suured, et see on ilmselt vähendanud tala kandevõimet.

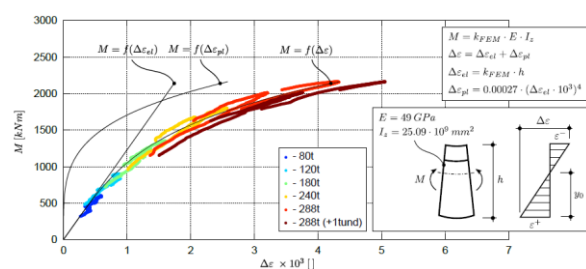
Samuti teostati EM Engineering Solutions OÜ poolt eksperimentaalne modaalanalüüs, mille lähteandmete saamiseks teostati silla moodaaltestimine. See seisnes sillateki dünaamilises ergutamises löökvasaraga ning ergutusest põhjustatud teki vertikaalsihilise kiirenduse ja ergutusjõu samaaegses mõõtmises. Modaalttestimine sooritati kahes etapis – enne ja pärast silla staatilisi koormuskatseid. Omavõnkeparameetrite analüüs näitas, et silla sumbuvusomadused on head. Heade sumbuvusomaduste põhjusena saab välja tuua: 1) eelpingestamata raudbetooni kui suhteliselt heade sumbuvusomadustega konstruktsioonimaterjali mõju, 2) lokaalsete kahjustuste ja pragude mõju, 3) toetingimuste mõju ning 4) piirete mõju.

Modaalanalüüsi tulemustest lähtudes teostati Särevere silla võrdlus varasemalt katsetatud sarnaste Eesti raudbetoonrajatistega. Võrdluse aluseks olid eurokoodeksi EVS-EN 1991-2 jaotise 6.4.4 dünaamikaarvutuste vajalikkuse/mittevajalikkuse kriteerium ning kaks tegurit: alumise paindeomasageduse kaudu arvatud paindejäikuse ja massi suhet iseloomustav tegur ning teki saledust iseloomustav tegur. Võrdlus näitas, et Särevere sild kuulus 12 katsetatud raudbetoonrajatise seas pigem nõ keskmike gruppi. Näitena eksperimentaalse modaalanalüüsi tulemuste ühest rakendusvaldkonnast koostati Särevere silla lineaarne lõplike elementide mudel ning kalibreeriti see modaalanalüüsi tulemuste abil. Mudeli kalibreerimisel oli muutujaks tekiplaadi elastsusmoodul ning kalibreerimisprotsess seisnes elastsusmoodulile sellise väärtuse leidmises, mille puhul kõigi kolme ava teoreetilised omasagedused vastavad kõige täpsemalt vastavatele eksperimentaalsetele väärtustele ning lisaks peavad ka teoreetiliste sageduste vastavad omavõnkevormid kattuma eksperimentaalsete vastavate võnkevormidega. Kalibreerimine mõõdetulemustega andis elastsusmooduli väärtuseks $E = 49 \text{ GPa}$. Mudeli valideerimiseks võrreldi teki mõõdetud vertikaalsiirdeid mudelil arvatud vastavate siiretega. Võrdlus näitas mõõte- ja arvutustulemuste head kokkulangevust, mis lubab oletada, et valitud arvmudel on võimeline suhteliselt realistlikult matkima nii Särevere silla teki dünaamilist kui staatilist lineaarset käitumist.

Veel ühe eksperimentaalse modaalanalüüsi rakendusnäitena püüti silla teki staatilisel katsekoormamisel lisandunud kahjustumise taset hinnata omavõnkeparameetrite muutumise kaudu. Kuna enne ja peale staatilise koormuskatseid mõõdetud vastavad omasagedused ja sumbuvestegurid oluliselt ei erinenud, siis sellisel moel kahjustumise hindamine antud töös vilja ei kandnud. Ka omavõnkevormide analüüs ei andnud tulemusi – teki talade staatilise koormamise järgselt määratud omavõnkevormide graafikud küll näitasid, millise võnkemoodiga on tegu, aga talade kahjustumise hindamine nende vormide alusel oleks spekulatiivne.

Teostatud töö uudseimaks tulemuseks oli see, et silla staatilise katsekoormamise raames teostatud teki 3D laserskaneerimise punktipilvest õnnestus spetsiaalse filtreerimisprotseduuri abil arvutada teki talade kõverused, kõveruste kaudu paindemoonded ning kalibreeritud lõplike elementide mudelit rakendades ka paindemomendi-moonde graafik ([joonis 12](#)).

Graafik näitas, et keskmise ava 2 tala materjalikäitumine oli kõigis analüüsitud ristlõigetel sarnane, selgelt mittelineaarne ning et plastsed deformatsioonid alates paindemomendist 800 kNm järk-järgult suurenesid. Ka oli graafikult näha koormuse 288 t ühe tunni pikkuse mõjumise jooksul tekkinud roomeformatsioonid ning see, et keskmise ava talade katsega kinnitatud paindekandevõime on vähemalt 2150 kNm .



Joonis 12. Keskmise ava talade 1 ja 2 paindemomendi-moonde graafik [\[11\]](#)

Keskmise ava talade paindekandevõime hindamiseks teostati painutatud betoonristlõike mittelineaarset lihtsustatud mudelit kasutades ja betooni ning tõmbearmatuuri materjaliomadusi varieerides umbes 1500 Monte Carlo simulatsiooni. Simulatsioonitulemusi võrreldi talade arvutusliku paindekandevõimega ning paindemomendi-moonde graafiku ekstrapoleerimise teel leitud paindekandevõimega. Analüüsitulemuste kokkuvõtteks tõdeti, et Särevere silla keskmise ava talade tegelik keskmine paindekandevõime on eeldatavalt vähemalt 2800 kNm ehk siis sama tõdemust teisiti sõnastades: keskmise ava enimkoormatud tala (s.o. tala 1) purustamiseks oleks staatilisel koormuskatsel olnud vaja rakendada eeldatavalt vähemalt 366 t raskust koormust.

1.1.9. Nõukogudeaegsete tüüpsildade kandevõime viimine vastavusse euronõuetega ja võimalike tugevdamise meetodite analüüs

Aasta: 2016
Teostaja: Tallinna Tehnikaülikool
Autorid: E. Reinsalu, S. Idnurm, J. Idnurm
Tellija: Maanteeamet

Uurimistöö [12] põhilisteks eesmärkideks oli anda hinnang, kas 44 t, 50 t, 54 t ja 60 t metsaveokite lubamine nõukogudeaegsetele sildadele on võimalik ning teha ülevaade sobivatest tugevdusmeetoditest. Töö põhineb kandepiirselundil. Kasutuspiirselundit ei uurita, sest on eeldatud, et tegemist on erakordsete koormustega. Lisaks uuriti põhjalikumalt ühte tugevdusmeetodit – süsinikkiududega tugevdatud polümeeride kasutamine paindekandevõime tõstmisel.

Täpsemalt uuriti tüüpkataloogide (56 ja 56 lisa) raudbetoonist monteeritavaid lihttalasildu, mis on ehitatud aastatel 1959-1970 ning mis projekteeriti HГ-60 või HK-80 eriveokist lähtudes. Talade kasuks otsustati pärast registrite uuringut, mille põhjal leiti, et üle kolmandiku Eesti riigiteede sildadest on monteeritavad lihttala sillad (tabel 7).

Tabel 7. Sildade tüüpilised avaehitused [12]

Tüüp	Kogus	Kandevõime ei vasta	Keskmine SI	Vajab laiendust	Keskmine laiendus, m
Monteeritav lihttalasild	463	47	85	160	1,32
Raudbetoon plaat	226	38	73	118	1,25
Terastoru	83	-	97	15	0,93
Raudbetoon tüli	76	3	78	7	0,57
Teraskaar	24	-	99	7	1,47
Võlv	18	3	86	12	2,22
Tala konsoolidega	16	2	81	9	1,75
Teadmata	14	-	100	10	-
Karptala	11	-	98	-	-
Kaar (sõiduosa peal)	6	-	94	4	2,25
Raam	4	-	100	1	5
Muu	2	-	92	2	1,75
Sõrestik	2	2	96	2	3,73
Kaar (sõiduosa all)	1	-	100	-	-
Rippsild	1	-	98	1	1,9

Lisaks tüüpide järgi jaotusele kategoriseeriti ümberehitust vajavad sillad ka ehitusaasta ja normkoormuse abil alljärgnevalt:

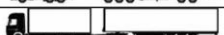
- 1) Esimese grupi moodustavad arhitektuurset väärtust omavad ja muinsuskaitse all olevad sillad, millele on kehtestatud ehituspiirangud (ei saa kandevõimet suurendada ega laiendada). Sellesse gruppi loeti sillad, mille ehitusaasta on 1929 või varasem. Riigimaantee sildade seas on selliseid 23.
- 2) Teise grupi moodustavad sillad ehitusaastaga 1930–1958, mille projekteerimisel kasutati normkoormusi H-8, H-24 või H-30. Kokku 120 silda, mis vajavad rekonstrueerimist.
- 3) Kolmanda grupi sillad on ehitusaastaga 1959–1970 ja mille projekteerimisel kasutati normkoormusi A-11, H-10, H-13, H-18, HГ-60, HK-80 määramaks tüüpkataloogide nr 56 ja nr 56 lisa kohaseid võimalikke sillatalasid. Kokku 173 silda, millest 60 vajavad laiendamist ja 13 tugevdamist.
- 4) Neljanda grupi moodustavad sillad ehitusaastaga 1971-2000. Nende puhul ei saa olemasoleva registri põhjal teha kindlaks kasutatud raudbetoonialade tüüpi, kuigi endiselt projekteeriti sildu СНП koormusmodelitele.
- 5) Viienda grupi moodustavad sillad, mis on ehitatud peale 2000-ndat aastat ja projekteeritud tänapäevaseid koormuseid silmas pidades. Laiendamist vajavaid silda on 71, millest 1 sild vajab ümberehitust halva seisundi tõttu (seisundiindeks alla 60%).

Uuringu raames tehti ka lühiülevaade Euroopa komisjoni uuringust „Effects of adapting the rules on weights and dimensions of heavy commercial vehicles with Directive 96/53/EC“ (2009), kus hinnati raskeveokite mõju taristule. Uuring kirjeldab kõige täpsemini ka Eesti seadusandlust ja arengukavasid. Omavahel on võrreldavad 4 peamist stsenaariumi:

- 1) nõudeid ja piirmäärasid ei muudeta;
- 2) üleeuroopaliselt 20,75 m pikkuste ja 44 t täismassiga veokite lubamine;
- 3) üleeuroopaliselt 25,25 m pikkuste ja 60 t täismassiga veokite lubamine;
- 4) valitud Euroopa riikides lubada 25,25 m ja 60 t veokeid, üldiselt säilitada 18,75 m ja 40 t piirang.

Samuti tasub uuringust välja tuua [tabel 8](#), kus on näidatud eri veokite konfiguratsioonide mõju teekattele ja sildadele.

Tabel 8. Eri tüüpi veokite mõju taristule [\[12\]](#)

			Bridges	
			Extreme loads	Fatigue
Code	Shape	Pavement		
A44		2.30		
A48		<2.30		
B40		1.22		
B44		1.02		
B48		<1.02		
C40		1.02		
C44		1.42		
C48		1.05		
D46		1.04		
E50		0.95		
F50		0.53		
G50		0.42		
E60		2.05		
F60		2.07		
G60		1.46		

Raport sisaldab endas võrdlust direktiivi 96/53/EC kohase liikluse mõju ja selle direktiivi modifitseeringu vahel. Hindamaks liikluse arengut/muutumist konkreetsel sillal, tuleb eelkõige arvestada järgnevaga:

- 1) silla kandevõime maksimaalse liikluskoormuse all;
- 2) vastupidavus korduvale koormamisele eluea jooksul (väsimus);
- 3) suurenenud liiklusega kaasnev hoolduskulude kasv ja vajadusel silla tugevdamine.

Veoki poolt tekitud paindemoment sõltub nii kogumassist kui ka selle paigutusest. Võrdse massi ja telgede arvu korral võib telgede asetuse erinevusest tingitud paindemomendi väärtus varieeruda kolmandiku ulatuses. Olenemata täismassist ei tohi lubatud maksimaalne teljekoormus ületada 11,5 t piiri. Olukorras, kus veoki pikkus ületab lihttalasillal tugevate vahelist kaugust, ei ole asjakohane seostada täismassi sildes tekkiva suurima paindemomendiga, vaid määravaks saab sillale ulatuvate telgede poolt ülekantav koormus ja paiknemine. Kokkuvõtlikult võib öelda, et üheavalised sillad pikkusega kuni 12 m ei ole arvestatavalt mõjutatud 5- ja 6-teljelistel 44- ja 48-tonniste veokite koormustest, kui lubatud maksimaalset teljekoormust ei ületata. Sama pikkusega, ent suurenenud täismassiga veok mõjub koormusena järgmiselt:

- 1) 44 t täismass on 10% suuremat paindemomenti tekitav kui 40 t täismassiga veok;
- 2) 48 t täismass on 20% suuremat paindemomenti tekitav kui 40 t täismassiga veok.

Lühikeste sildade puhul täheldati, et sillale mõjuvad koormused on võrdväärsed 44 t täismassi (ülekoormatud 40 t) pikkusega 16,5 m ja 60 t täismassi ja pikkusega 25,25 m korral, mis kinnitab, et kandevõime määramisel on oluline telje/telgede koormus.

Lisaks anti lühiülevaade eri tugevdusmeetoditest, toodi välja tasuvusarvutuse valem süsinikkiududega tugevdatud polümeeri ribade mõjust kandevõimele. Kokkuvõttena toodi välja, et laiendamist vajab 144 silda, millest 60 olid käsitletud tüüpikataloogide sillad. Paindekandevõime määramisel annab 99%

tala kandevõimest armatuurterase voolupiir, hulk ja paigutus ning tala ristlõike geomeetria. Betooni enda 50% survetugevuse kasv mõjutab üldist tala paindekandevõimet vaid 1% ulatuses.

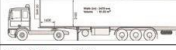
Metsaveokite koormustele (nii 44 t, 50 t, 54 t kui ka 60 t täismassiga poolhaagis- ja haagisveokite puhul) on tüüpikataloogi nr 56 ja nr 56 lisa alusel projekteeritud sillad nii paindekandevõime kui ka põikjõukandevõime poolest vastupidavad. Sellisele tulemusele jõudmine annab kinnitust ka varasemate antud teema käsitlustes tehtud järeldustele, et projekteerimisaegset kandevõimet säilitanud sillad on võimelised kandma juba praegu lubatust raskemaid veokeid. Kahjuks ei ole Eesti sillavõrgu seisukord aastatel 1959 – 1970 ehitatud sildadel nõnda hea, et tüüpikataloogi taladele võiks omistada projektikohast kandevõimet ja seega tuleb iga silda käsitleda eraldi ning kandevõime määramisel uurida esinevaid kahjustusi ja nende mõjusid põhjalikumalt. Samuti tuleb eraldi kontrolli teostada sillapõhiselt laienduse olukorras, kus äärmisel talal suureneb koormus 20...30% ning olenevalt laienduse ulatusest ei pruugi kandevõime olla tagatud.

Töö kõige suurem väärtus seisneb suurimate arvutuslike sisejõudude leidmises ning andmete selges võrdluses vanemate projektkoormustega ([tabelid 9 ja 10](#)).

Tabel 9. Tüüpikataloogi 56 raudbetoonialade alusel modelleeritud sildade suurimad sisejõud raskeveokite korral [12]

Raskeveoki mudel	Paindemoment kNm		Põikjõud kN		Ava, m	NG-60		NK-80	
	G-6	Laiendus	G-6	Laiendus		M _{sd}	V _{sd}	M _{sd}	V _{sd}
 44 t; 16,5 m; 2+3	333	411	170	238	7,5	410	629	460	696
	498	636	208	306	10	644	670	757	742
	699	907	244	360	12,5	810	544	1087	766
	984	1287	285	483	15	1180	591	1378	833
	1690	2236	354	504	20	1942	673	2197	735
 50 t; 16,5 m; 3+3	333	411	170	238	7,5	410	629	460	696
	498	636	212	311	10	644	670	757	742
	702	910	255	373	12,5	810	544	1087	766
	994	1298	298	498	15	1180	591	1378	833
	1770	2323	373	526	20	1942	673	2197	735
 54 t; 18,75 m; 3+3	289	362	169	237	7,5	410	629	460	696
	478	614	198	295	10	644	670	757	742
	684	891	242	357	12,5	810	544	1087	766
	952	1252	284	481	15	1180	591	1378	833
	1702	2249	367	520	20	1942	673	2197	735
 60 t; 18,75 m; 3+4	329	406	185	255	7,5	410	629	460	696
	525	666	221	322	10	644	670	757	742
	761	976	267	387	12,5	810	544	1087	766
	1088	1402	312	514	15	1180	591	1378	833
	1862	2424	397	554	20	1942	673	2197	735
 60 t; 18,75 m; 4+3	331	408	171	240	7,5	410	629	460	696
	506	645	209	308	10	644	670	757	742
	744	956	244	360	12,5	810	544	1087	766
	1046	1356	300	500	15	1180	591	1378	833
	1874	2438	393	550	20	1942	673	2197	735

Tabel 10. Tüüpikataloogi 56 Lisa raudbetoonialade alusel modelleeritud sildade suurimad sisejõud raskeveokite korral [12]

Raskeveoki mudel	Paindemoment kNm		Põikjõud kN		Ava, m	NG-60		NK-80	
	G-7	Laiendus	G-7	Laiendus		M _{sd}	V _{sd}	M _{sd}	V _{sd}
 44 t; 16,5 m; 2+3	403	467	208	302	7,5	648	673	771	740
	622	727	249	375	10	1030	712	1166	783
	892	1044	300	449	12,5	1377	951	1818	1025
	1235	1489	350	518	15	1908	1015	2294	1093
 50 t; 16,5 m; 3+3	403	467	208	302	7,5	648	673	771	740
	622	727	249	379	10	1030	712	1166	783
	896	1045	308	462	12,5	1377	951	1818	1025
	1257	1510	362	537	15	1908	1015	2294	1093
 54 t; 18,75 m; 3+3	362	421	195	300	7,5	648	673	771	740
	603	700	245	363	10	1030	712	1166	783
	874	1023	297	444	12,5	1377	951	1818	1025
	1204	1454	347	518	15	1908	1015	2294	1093
 60 t; 18,75 m; 3+4	399	463	223	323	7,5	648	673	771	740
	652	757	266	392	10	1030	712	1166	783
	945	1104	320	480	12,5	1377	951	1818	1025
	1344	1606	374	555	15	1908	1015	2294	1093
 60 t; 18,75 m; 4+3	400	464	210	303	7,5	648	673	771	740
	622	730	256	379	10	1030	712	1166	783
	924	1090	293	470	12,5	1377	951	1818	1025
	1305	1556	368	547	15	1908	1015	2294	1093

1.1.10. Levinuimad nõukogudeaegsed sillatüübid Eestis ja nende sobivus tänapäevastele koormusmodelitele

Aasta: 2018
Autor: M. Juul

Magistritöö [16] eesmärgiks oli korrastada, koondada ja ajakohastada infot, mis antud teema kohta on avaldatud. Eesmärgiks on saada esiteks ülevaade nõukogudeaegsete sildade hetkeseisust ning teiseks analüüsida vajadust ja võimalusi nende kaasajastamiseks. Töö teoreetilises pooles selgitatakse Eestis kehtivate ja kehtinud ehitusnormide peamisi iseärasusi ning võrreldakse neid omavahel. Samuti antakse ülevaade suurematest Eesti uuringutest transpordi ja sildade vallas. Töö teises pooles võrreldakse Teeregistri ja Pontise sildade andmebaase. Samuti käsitletakse Eestis leiduvate nõukogudeaegsete sildade ehitust ja enamlevinud tüüpprojekte. Lõpuks tehakse Eesti transpordisektori olukorrast järeldus ja pakutakse välja soovitusel edasiseks toimimiseks.

Töö esimeses osas on antud lühiülevaade СНП ja eurokoodeksi võrdlusest. Eurokoodeksi ja СНП põhimõtted on sarnased, sest nad põhinevad piirseisundite vältimisel ning mõlemal puhul kasutatakse piirseisundite vältimiseks varutegureid. Eurokoodeksi ei piira üldjuhul erinevate arvutusmeetodite ja valemite kasutamist, kuid reguleerib arvutusmudeleid. Oluline erinevus on see, et kui СНП piirab spetsialisti otsuseid ja määrab kohustuslikud arvutusmeetodid, siis eurokoodeksi arvestab ka kohalike olude eripäraga, sisaldades rahvuslikku lisa. Põhimõtteliselt saab välja tuua, et eurokoodeksi järgi arvutades on erinevad koormused reeglina suuremad kui СНП-i järgi arvutatult. Samas seismilise tegevuse varutegur on suurem just СНП-is, sest seal arvestatakse NSVL territoriaalset suurust ja sellest tulenevaid seismiliselt aktiivseid piirkondi.

Lõputöös on antud ülevaatlik kokkuvõte ka varasemalt teostatud uuringutest, mis on seotud raskeveokite mõjuga teedele ning sildadele. Magistritöös koostatud kirjeldust on osaliselt ka antud uurimistöös refereeritud ning seetõttu siinkohal täpsemat ülevaadet ei tehta.

Eraldi on võrreldud teeregistri ja Pontise andmebaasides kajastatud sildu. On tõdetud, et Pontise info on juba küllaltki vananenud ja eelistama peaks pigem uuemat teeregistri materjali, kuigi tuvastati mitmeid vastuolusid sisestatud andmete vahel, mida tuleb täiendavalt kontrollida. Edasi on vaadeldud nõukogude perioodil ehitatud sildade olemist ning seejuures on koostatud ka hea ülevaade sel perioodil kasutatud enamlevinud tüüpkataloogidest (tabel 11).

Tabel 11. Kataloogide koondtabel [16]

Kataloog	Aasta	Koormusmodelid					Pikkused, m						Laiused, m					
		N-13	N-18	N-30	NG-60	NK-80	7,5	10,0	12,5	15,0	20,0	30,0	40,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,5
56	1958	x	x		x	x	x	x	x	x	x			x	x	x		
56 lisa	1962	x	x		x	x	x	x	x					x	x	x		
100	1958	x	x		x	x				x	x	x		x	x	x		
122-62/122-63	1962			x		x		x	x	x	x				x	x	x	x
149-62	1962			x		x						x			x	x	x	x
123	1959	x	x		x	x					x	x	x	x	x	x		
123 lisa	1962	x	x		x	x			x	x				x	x	x		

Töö viimases osas on kaalutud erinevaid valikuvõimalusi sillavõrgu uuendamisel. Seejuures on välja pakutud kolm erinevat strateegiat:

- 1) asendada kõik vanad sillad uutega;
- 2) kaasajastada vanad sillad;
- 3) vastavalt vajadusele kombineeritud.

Asendades kõik vanad sillad uutega, saab garanteerida kõigi sildade vastavuse kaasaegsetele nõuetele. See variant pole aga kuigi reaalne, sest vajab liiga suuri investeeringuid. Vanade sildade kaasajastamist saab vaadelda hädaabinõuna, mis lükkab probleemi edasi. Ümberehitamised on üsna kallid ning need ei anna kandevõime osas alati soovitud tulemust. Kuna aktiivselt liigutakse edasi aina raskemate veokite lubamise suunas, ei tundu see variant kuigi perspektiivikas, eriti enamkoormatud teedel. Kombineerides kahte esimest varianti, on võimalik luua optimaalseim lahendus, mis arvestab iga individuaalse juhtumiga.

Sildu käsitlevatesse rahvuslikesse normidesse tuleks autori hinnangul teha ettepanek kasutada suuremaid varutegureid, kui uusehitisi projekteeritakse mõnda kriitilisemasse liikluse sõlmpunkti. Võrreldes praeguse olukorraga võimaldaks see kunagi tulevikus palju lihtsamalt sildu laiendada, kartmata koormuste suurenemist. Mõningane üledimensioneerimine kriitilisemates kohtades hoiaks tulevikus palju aega ja raha kokku, sest kunagi olid ka nõukogudeaegsed sillad uhiuued ning hetkel oleme nende ressursi maksimaalse kasutamisega hädas.

Veidi huvitavam idee oleks luua kindel teedevõrgustik eriti rasketele veokitele. Võrgustik peaks suutma kanda ja mahutada igasuguseid eriveoseid, pakkudes liikumisvõimalust riigi põhisuundades. Eriti raskete veoste teekonnad mõnevõrra pikeneksid, kuid see lahendaks mitu pakilist probleemi. Esiteks saaks lubada Eesti teedele ka eriti raskeid veokeid, mis elavdaks Eesti majandust. Teiseks võimaldaks see kasutada ka väiksema kandevõimega laiendatud sildu, mis teenindaks veokite asemel aina suurenevat kergemat autoliiklust. Sellise idee elluviimiseks peab muutma ka seadusandlust ning tagama, et raskeveokid ei satuks neid mittekandvatele sildadele.

Kuna liigume järjekindlalt raskeveokite koormuste suurendamise teel, peaks kõik üleminekud sooritama teatud varuga. See tähendab seda, et kõigepealt peaks valmis tegema vajaliku võrgustiku ning alles siis võiks lubada raskemate masinate kasutuselevõttu.

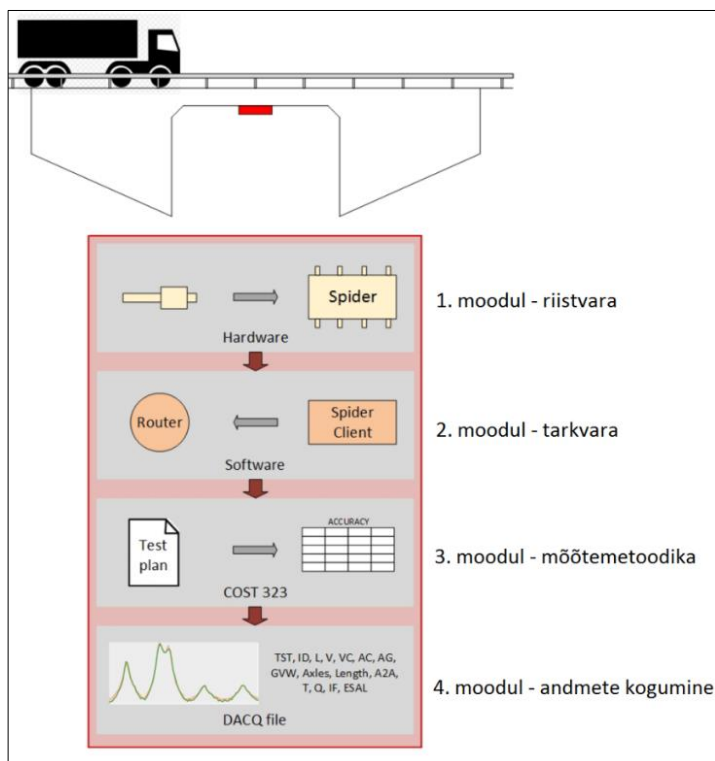
Absoluutselt kõik sillad tuleks koondada ühisesse registrisse. Pole vahet, kas silda haldab Maanteeamet või kohalik omavalitsus, andmed peaks ühtviisi kättesaadavad olema. Senine eristamine toimuks ainult hoolduse rahastamise jaoks, aga riiklike arengukavade planeerimise tarbeks on tarvis korrektseid koondandmeid.

1.1.11. Sõidukite masside ja teljekoormuste seire

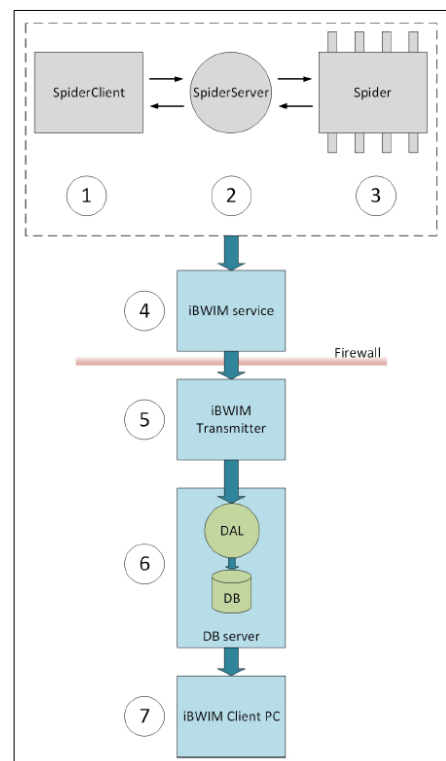
Aasta: 2018
Teostaja: AS Viacon Eesti, Tallinna Tehnikakõrgkool, Skepast&Puhkim OÜ
Autorid: M. Tali, M. Kiisa, K. Lellep, U. Konsap, A. Kendra
Tellija: Maanteeamet

Käesoleva uurimistöö [99] peamiseks eesmärgiks oli koguda riigimaanteedelt informatsiooni sõidukite tegelike masside ja teljekoormuste kohta, kasutades selleks teistsaldatavaid, sildadele ja viaduktidele paigaldatavaid mõõteseadmeid. Kahe aasta jooksul teostati kokku 31 mõõtmist (2017. aastal 1 proovimõõtmine ning 2017. ja 2018. aastal 15 mõõtmist aastas). Mõõtmisi teostati valitud sildadel kahel järjestikusel aastal, et saada ülevaade tegelikest koormustest ja muutustest aastate lõikes. Ühe mõõtmise kestvus igas mõõtmispunktis oli vähemalt 7 ööpäeva.

Antud töös kasutati sildade monitoorimiseks iBWIM-süsteemi (joonis 13) koos vastava tarkvaraga (joonis 14). See on oma olemuselt erinevate (mõõte)seadmete võrgustik, mis kogub ja töötleb andmeid reaajas ning mida Eestis varem kasutatud ei ole. Süsteem koosneb siirdeanduritest, laseritest ja temperatuurisensoritest, mis ühendatakse kesksesse spider-moodulisse. Süsteemi juhitakse spetsiaalses kapis paiknevast arvutist, kuhu ühenduvad lisaks spider-itele veel kaamerad ning pidevaks internetiühenduseks vajalik antenn. Laserid ja kaamerad paiknevad sillateki peal, teised andurid sillateki all.



Joonis 13. iBWIM-süsteemi põhimõtteline ülesehitus [99]



Joonis 14. iBWIM tarkvara skemaatiline ülesehitus [99]

Aruande esimestes peatükkides on kirjeldatud Euroopa Liidu seisukohti massipiirangute ja raskeveokite osas ning antud ülevaade Euroopas enim kasutatavatest massipiirangute nõuetest. Seejärel on antud detailsem kirjeldus Soomes, Rootsis ja Norras kehtivatest massipiirangutest ning tehtud kokkuvõtte parimatest lahendustest.

Tuginedes Skandinaavia kogemustele, on võimalik rakendada suuremaid täismasse lisatingimustel:

- 1) paarisrataste kasutus mittepööravatel ja mittetõstetavatel telgedel (Soome kogemus);
- 2) nõuda üle 50 tonnise täismassi lubamiseks sõiduki esimese ja viimase telje vahelist suuremat kaugust (nn sillareegel), mis eeldab suurema kogupikkuse lubamist;
- 3) nõuda sõltuvalt täismassist suuremat veduki võimsust (võimsuse seos on nii Lätis kui Soomes), et tagada raskeveokitele liiklusohutuseks vajalik võimsusvaru;
- 4) nõuda OBW (*on-board-weighing*) seire ja CTI (reguleeritava rehvirõhu süsteemi) kasutust, mis on ühendatud GPS-*trackeriga* ja võimaldab reaalajas jälgida sõiduki asukohta ning samas tagab tee lagunemise korral ülevaate, kellele esitada tee taastamise arved.

Järeldused kaalumistest:

- 1) Kaaluti 443613 telge, millest ülekaalulised olid 51118 telge (teise telje lubatud massiks arvestasime 11,5 tonni ja kõigil ülejäänud telgedel 10 tonni) – seega on ülekaalulised 11,5% kaalutud raskesõidukite telgedest. Vähemalt 18,3% kaalutud autodest on vähemalt ühe ülekaalulise teljega.
- 2) 17% kaalutud sõidukitest ületasid lubatud täismassi piirangut, viie- ja enamateljelistest 26% on lubatust suurema täismassiga, moodustades 64% ülekaalulistest.
- 3) Kaalumistulemuste järgi 112868 sõidukit ja kokku 334676 normtelge tähendab keskmist üle 4-tonnise sõiduki siirdetegurit 2,97 (see ei võta arvesse rehvirõhu, rehvi mõõdu ja rehvi liigi mõju).
- 4) Asendades ülekaalulised (täismassi piir ületatud) sama telgede arvuga maksimaalse lubatud massiga sõidukitega, vajame 19620 ülekaalulise sõiduki asemel 23288 maksimaalse lubatud kaaluga sõidukit (tegelik lisavajadus on väiksem ja sõltub sõiduki kasuliku koorma suhtest täismassi) ning sel juhul moodustuks kogu normtelgede arv sama kogumassi piires 176182 telge ja keskmine siirdetegur kujuneks 1,56. Siit omakorda võib järeldada, et tegeliku ülekoormamise tagajärjel koormatakse meie teid kaks korda suurema normtelgede arvuga, kui oleks vajalik sama kaubakoguse vedamiseks, kuid see eeldab 17% ülekaaluliste sõidukite asendamist 21% maksimaalse lubatud täismassiga sõidukitega (lisanduks kokku 3668 sõidukit ehk 3,25%).

Hinnangud suuremate masside mõjust teedele tuginevad samas ka teatud eeldustele lubatud reglemendist kinnipidamise kohta. Nii võib selgelt tõestada, et 52-, 60- ja 70-tonnised koormused on meie peateedele võimalikud juhul, kui telgede arvu tõstetakse, lubatud täismassi- ja teljekoormustest kinni peetakse ja sel eeldusel sama veosemahu (kasuliku koormuse) juures summaarne mõju katendile võib olla leebem, kui tänase koormusrežiimi korral. Paljuteljelise koormuse mõju nõrgematele katenditele võib aga need eelised tühistada – kõrvalmaanteede konstruktsioon suure tõenäosusega ei taastu koormusprotsessis ja deformatsioonid kumuleeruvad.

1.1.12. Sildade toimivuse hindamine ja arenguvõimalused Eestis

Aasta: 2019
Autor: M. Matteus

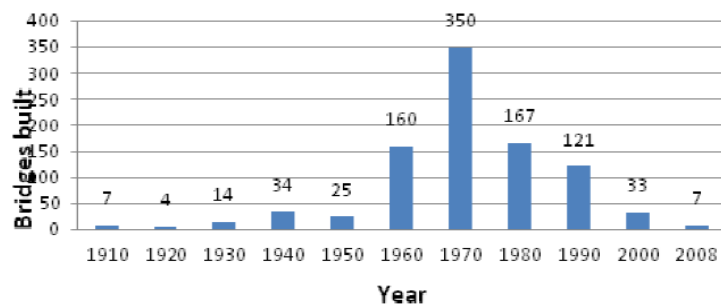
Magistritöös [\[100\]](#) on analüüsitud Eesti sildade ja viaduktide toimivuse hindamist ja selle arenguvõimalusi. Ülevaate andmiseks on kirjeldatud üksikasjalikult sildade hoolduse ja ülevaatusega seonduvat, erinevaid seadmeid silla kontrollimiseks, mõõtevahendeid, meetodikaid, projekteerimist. Muuhulgas on kirjeldatud ka nõudeid sildade ülevaatajatele ja juhiseid ülevaatuse läbiviimiseks. Samuti on toodud näide nii välismaa kui ka Eesti viaduktist ning analüüsitud COST TU1406 arenguvõimalust Eestis, mida arendatakse välja enamikes teistes Euroopa riikides.

Kuna praegune Eesti sillahaldussüsteem ei kuva täielikku ülevaadet reaalsest olukorrast, võib see kaasa tuua erinevaid probleeme. Erinevate probleemide halvim tagajärg oleks silla või viadukti kokkuvarisemine, nagu see toimus näiteks Morandi viaduktiga Itaalias. COST koostööprogrammi tegevuskava TU1406 peamine eesmärk on luua kindla struktuuriga kvaliteedikontroll, mille eesmärgiks on saavutada sildade ja viaduktide haldusel sarnane lähenemisviis, millest saaksid kõik selles grupis (COST TU1406) olevad riigid kasu. COST TU1406 eesmärk on koondada erinevate riikide hindamissüsteemi nõuded/standardid, et parandada sildade ja viaduktide haldamise strateegiat.

1.2. Lähiriikide uuringud

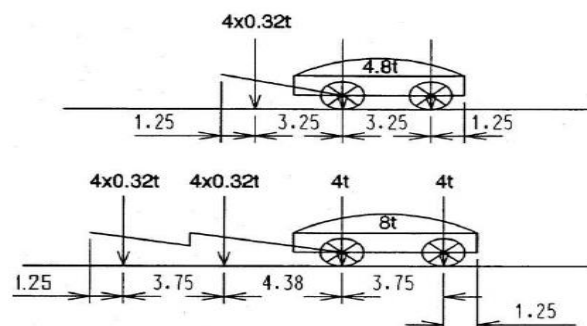
1.2.1. Läti

Esimene vaadeldav uurimistöö [17] valmis 2010. aastal ning selle töö raames pakuti välja lihtsustatud arvutusmeetod hindamiseks olemasolevate sildade, mis sarnaselt Eestile on projekteeritud eri aegadel ja eri standardite järgi, kandevõimet lähtuvalt tegelikust liikluskoormusest ja projekteeritud koormusest.



Joonis 15. Läti sildade jaotus ehitusaastate järgi [17]

2009. aastal oli Läti riigiteedel 971 silda, millest 907 oli raudbetoonist, 14 kivimüüritisest, 43 terasest ja 7 puidust. Sarnaselt Eestile on enamik neist ehitatud pärast teist maailmasõda, mis tähendab, et üle 65% sildadest on praeguseks vanemad kui 40 aastat (joonis 15). Vastavalt Läti sillahaldussüsteemis LatBrutus olevatele silla seisukorra andmetele on umbes 60% neist erineval määral kahjustatud, mis suuremal või vähemal määral mõjutab kandevõimet. Lisaks kahjustuste arengule on vaja arvesse võtta erinevaid koormusmudeleid, mis varieeruvad alates hobustest (joonis 16) kuni tankideni ning nõukogude ajal kasutatud autokolonnideni.



Joonis 16. Lätis aastatel 1900 kuni 1915 kasutusel olnud koormusmudel [17]

Asja teeb veel keeruliseks teadmine, et rasked veokid ületavad lubatud piiranguid, mis omakorda vähendavad rajatiste ohutust. Sellest tulenevalt oli vaja leida lihtne ja arusaadav meetoodika, et hinnata eri sildade kandevõimet samadel alustel ning mis oleks kõigile arusaadav. Enimlevinud meetoodika on AASHTO poolt 2000. aastal välja töötatud meetoodika, mille tulemusena arvutatakse kandevõime hinnangu faktor RF^6 järgmiselt:

⁶RF – Rating Factor.

$$RF = \frac{M_u - \delta M_{dl}}{\delta M_{II}},$$

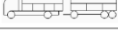
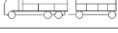
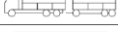
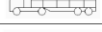
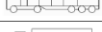
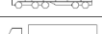
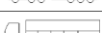
kus M_u on maksimaalne paindekandevõime, M_{dl} omakaalust tulenev paindemoment ja M_{II} muutuvast koormusest tulenev paindemoment. Sarnaseid meetodikaid, kus hinnatakse töökindlust või kandevõimet, on viimase 20 aasta jooksul välja töötatud üksjagu. Eraldi toodi välja Norra Maanteeameti poolt välja töötatud koormusmodelite klassifikatsioon.

Tol hetkel oli Lätis prioriteediks, et sillad suudaksid vastu võtta tavalisest tulenevaid koormuseid, mida võib jagada kolme gruppi:

- 1) tavaline liiklus, mis sisaldab sõiduaautosid ja veokeid kuni 44 t, mis liikleavad sildadel igapäevaselt ja ei vaja erilube ([tabel 12](#));
- 2) raskeliiklus, mis hõlmab veokeid massiga 45 t kuni 80 t ehk veosed, mis vajavad küll eriluba, kuid millega ei kaasne rajatise kandevõime hinnangu tegemise kohustust (selliste veoste sageduseks loetakse paar korda nädalas);
- 3) eriveosed, mis ületavad 80 t (sellise massiga veoseid esineb ainult paar korda aastas).

Sellest tulenevalt on kõik sillad klassifitseeritud samuti vastavalt sellistele põhimõtetele, et teatud grupid saaksid sildu ilma lisapiiranguteta kasutada.

Tabel 12. Esimese grupi veokid, kus on välja toodud eri klassid, mis annavad võimaluse piirata koormuseid peaaegu kõikidel veoki tüüpidel [\[17\]](#)

N.	Vehicle type	Characteristic of mass (t)	Loads classes according to the loading percentage of the characteristic of mass		
			100%	75%	50%
1.		18	SK 10/18	-	-
2.		25	SK 10/25	SK 10/18	SK 10/18
3.		36	SK 10/36	SK 10/25	SK 10/18
4.		40	SK 10/40	SK 10/25	SK 10/18
5.		40	SK 10/40	SK 10/25	SK 10/18
6.		40	SK 10/40	SK 10/25	SK 10/18
7.		36	SK 10/36	SK 10/25	SK 10/18
8.		40	SK 10/40	SK 10/36	SK 10/18
9.		40	SK 10/40	SK 10/25	SK 10/18
10.		40	SK 10/40	SK 10/25	SK 10/18
11.		44	SK 10/44	SK 10/36	SK 10/18

Sarnaselt Eestis teostatud uuringutele on ka Lätis jõutud järeldusele, et vanad sillad võivad kanda tänapäevaseid nn „tavapäraseid“ liikluskoormuseid vaatamata liikluseduse muutustele. Eri tüüpi rajatiste hindamisel kasutati piirväärtustel põhinevaid arvutusmudeleid. Rajatised jaotati gruppidesse vastavalt ehitusmaterjalile, arvutusskeemile ja ava pikkustele ([tabelid 13 ja 14](#)). Rekonstrueerimise või tugevdamise käigus hinnatakse tavaliselt silla kandevõimet uuesti ja kontrollitakse seda vastavalt eurokoodeksi LVS-EN 1991-2 KM1 abiteguri α abil.

Tabelites toodud koormusklassid on arvutatud eeldusel, et konstruktsioonid on heas tehnilises seisukorras. Kui rajatisel on ilmnenud kahjustustunnused, siis tuleks teostada uus hinnang ning sellest tulenevalt koormusklassi vähendada.

Tabel 13. Tavalikkusele välja töötatud koormusgrupid, mis on viidud vastavusse eri sillatüüpidega [17]

Nr.	Type of the Bridge Span Structure	Characteristic Load Systems					
		N-10 NG-40	N-13 NG-60	N-18 NK-80	N-30 NK-80	AK NK-80	EC-1 SM1 $\alpha = 0.8 - 1$
1.	Reinforced concrete diaphragm simple beams (type 56): Spans: 8.66 – 11.36 m Spans: 14.06 – 22.06 m	- -	SK 10/25 SK 10/36	SK 10/36 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	- -	- -
2.	Reinforced concrete simple beams without diaphragm (type 56): Spans: 8.66 – 11.36 m Spans: 14.06 – 16.76 m	- -	- -	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	- -	- -
3.	Pre-stressed wire beams: Spans: 11.36 m Spans: 14.06 – 16.76 m	- -	- -	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	- -	- -
4.	Pre-stressed double T beams: Spans: 16.76 m Spans: 18 – 33 m	- -	SK 10/36 -	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44
5.	Simple slab with holes Spans: 18 m	-	-	SK 10/44	SK 10/44	-	-
6.	Simple slabs Spans: ≤ 4.5 m Spans: ≥ 4.5 m Precast reinforced concrete. Cast in place reinforced concrete	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/40	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44
7.	Precast reinforced concrete ribbed slabs	SK 10/25	SK 10/40	SK 10/44	SK 10/44	-	-
8.	Simple cast in place reinforced concrete beams with two cantilevers Central span: 14 – 17 m Central span: 21 – 27 m	SK 10/40 SK 10/40	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	- -	- -
9.	Continuous reinforced concrete beams (Zuravlov type) Longest span: 15 – 18 m Longest span: 21 – 24 m	- -	- -	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	- -	- -
10.	Continuous reinforced concrete slabs with holes Spans: 12 – 15 m Spans: 18 – 24 m	- -	- -	SK 10/44 SK 10/44	SK 10/44 SK 10/44	- -	- -
11.	Continuous reinforced concrete T beams Spans: 12 – 18 m	-	-	SK 10/44	SK 10/44	-	-
12.	Reinforced concrete frame bridges with inclined piers	-	-	SK 10/44	SK 10/44	-	-
13.	Continuous reinforced concrete box girder – frame system bridges	-	-	-	SK 10/44	SK 10/44	-
14.	Individual designed bridges: Built till 1940 Built in period 1941 – 1960.g. Built in period 1960 – 1990.g. Built after 1990.g.	SK 10/18 SK 10/36 - -	SK 10/36 SK 10/40 SK 10/40 -	- SK 10/44 SK 10/44 -	- SK 10/44 SK 10/44 -	- SK 10/44 SK 10/44 -	- SK 10/44 SK 10/44 -
15.	Composite steel-concrete continuous girders	-	SK 10/44	SK 10/44	SK 10/44	SK 10/44	SK 10/44
16.	Steel truss bridges	-	-	SK 10/40	SK 10/44	-	-

Tabel 14. Raskeliiklusele välja töötatud koormusgrupid, mis on viidud vastavusse eri sillatüüpidega [17]

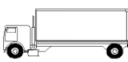
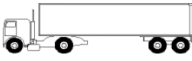
Nr.	Type of the Bridge Span Structure	Load Characteristic Systems					
		N-10 NG-40	N-13 NG-60	N-18 NK-80	N-30 NK-80	AK NK-80	EC-1 LM1 $\alpha = 0.8 - 1$
1.	Reinforced concrete diaphragm simple beams (type 56): Spans: 8.66 – 11.36 m Spans: 14.06 – 22.06 m	- -	SK 10/50 SK 10/50	SK 10/60 SK 10/60	SK 10/60 SK 10/60	- -	- -
2.	Reinforced concrete simple beams without diaphragm (type 56): Spans: 8.66 – 11.36 m Spans: 14.06 – 16.76 m	- -	- -	SK 10/60 SK 10/60	SK 10/60 SK 10/60	- -	- -
3.	Pre-stressed wire beams: Spans: 11.36 m Spans: 14.06 – 16.76 m	- -	- -	SK 10/50 SK 10/50	SK 10/60 SK 10/60	- -	- -
4.	Pre-stressed double T beams: Spans: 16.76 m Spans: 18 – 33 m	- -	- -	SK 10/50 SK 10/60	SK 10/60 SK 10/80	SK 10/60 SK 10/80	SK 10/80 SK 10/80
5.	Simple slab with holes Spans: 18 m	-	-	SK 10/80	SK 10/80	-	-
6.	Simple slabs Spans: ≤ 4.5 m Spans: ≥ 4.5 m Precast reinforced concrete. Cast in place reinforced concrete	- -	SK 10/50 SK 10/50	SK 10/60 SK 10/60	SK 10/60 SK 10/60	SK 10/80 SK 10/80	SK 10/80 SK 10/80
7.	Precast reinforced concrete ribbed slabs	-	-	SK 10/60	SK 10/60	-	-
8.	Simple cast in place reinforced concrete beams with two cantilevers Central span: 14 – 17 m Central span: 21 – 27 m	- -	SK 10/50 SK 10/50	SK 10/60 SK 10/60	SK 10/80 SK 10/80	- -	- -
9.	Continuous reinforced concrete beams (Zuravlov type) Longest span: 15 – 18 m Longest span: 21 – 24 m	- -	- -	SK 10/50 SK 10/44	SK 10/60 SK 10/60	- -	- -
10.	Continuous reinforced concrete slabs with holes Spans: 12 – 15 m Spans: 18 – 24 m	- -	- -	SK 10/60 SK 10/50	SK 10/60 SK 10/50	- -	- -
11.	Continuous reinforced concrete T beams Spans: 12 – 18 m	-	-	-	SK 10/50	-	-
12.	Reinforced concrete frame bridges with inclined piers	-	-	SK 10/60	SK 10/80	-	-
13.	Continuous reinforced concrete box girder – frame system bridges	-	-	-	SK 10/80	SK 10/80	-
14.	Individual designed bridges: Built till 1940 Built in period 1941 – 1960.g. Built in period 1960 – 1990.g. Built after 1990.g.	- - - -	- - SK 10/50 -	- SK 10/50 SK 10/60 -	- SK 10/60 SK 10/80 -	- SK 10/80 SK 10/80 -	- SK 10/80 SK 10/80 -
15.	Composite steel-concrete continuous girders	-	SK 10/60	SK 10/80	SK 10/80	SK 10/80	SK 10/80
16.	Steel truss bridges	-	-	SK 10/60	SK 10/80	-	-

Läti Maanteeamet soovis täienduseks eelnevatele lihtsustatud mudelitele välja töötada oma koormusmudeli LM3, mille abil saaks hinnata rajatiste vastupanu tegelikele koormustele. Põhjenduseks toodi uute sildade projekteerimisel kasutatud LVS-EN 1991-2 koormused, mis on palju suuremad kui nõukogude ajal kasutatud.

Kuni tolle hetkeni oli olemasolevate sildade kandevõime hindamiseks kasutatud erinevaid arvutusmeetodeid, mis põhinesid suurimal tegelikul liikluskoormustel vastavalt MK-571 "Maanteeliikluse eeskirjad"⁷ ja MK-343 "Suuremahulised ja rasked veokid"⁸. Eurokoodeksi lähenemisviisi kasutatakse harva, sest see on ette nähtud uute rajatiste arvutamiseks ja seetõttu pole olemasolevate sildade kandevõimet selle järgi otstarbekas hinnata.

2017. aastal ilmus ka vastav juhend [18], mis baseerus suuresti kahel varasemal uurimistööl – 2012. a valminud doktoritöö [132], kus analüüsiti põhjalikult WIM⁹ mõõtmiste tulemusi ja võrreldi Läti rahvuslikke koormuseid eurokoodeksi koormusmudeliga LM1 ning 2016. a analüüs [133], kus käsitleti koormusmudelit LM3. Juhendi tähelepanu keskmeks oli tegeliku liikluskoormuse määramine, kuna vastavate väärtuste leidmine on keeruline ning meetodikast tuleneva määramatuse arvestamine mõjutab kandevõime hindamist olulisel määral. Selle raames toodi välja, et liikluskoormuse suurus sõltub juhuslikest muutujatest nagu näiteks sõiduki mass, teljekoormus, koormuse jaotus telgede vahel, telgede vahekaugus, liikumiskiirus ja sõidutee tasasus. Eesmärgiks võeti leida Läti maanteedel kõige tüüpilisem veok, mis mõjutab enim kuni 30 meetri pikkuseid sildasid. Koormused saadi WIM mõõtmiste põhjal ja selle tulemusena leiti, et 2-teljelistele sõidukitele (osakaal 79,82%) järgnesid 5-teljelised sõidukid (osakaal 12,48%) nagu näidatud tabelis 15.

Tabel 15. EN 1991-2 tabelis 4.6 toodud veokite grupid [18]

1 LORRY SILHOUETTE	2 Axle spacing (m)	3 Frequent axle loads (kN)	4 Wheel type (see Table 4.8)
	4,5	90 190	A B
	4,20 1,30	80 140 140	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	90 180 120 120 120	A B C C C
	3,40 6,00 1,80	90 190 140 140	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	90 180 120 110 110	A B C C C

⁷ Läti keeles: *Ceļu satiksmes noteikumi*.

⁸ Läti keeles: *Noteikumi par lielpabariņa un smagsvara pārvadājumiem*.

⁹ WIM – *Weight In Motion*.

Sõltuvalt tee liigist, liiklussagedusest ja sõidukite koosseisust leiti, et teedel võib kasutada olemasolevate sildade kandevõime hindamiseks 52 t või 44 t massiga veokeid, mille koormused olid telgede kaupa jaotatud järgmiselt:

- 1) 52 t – P1 = 7 t; P2 = 13,5 t; P3 = 10,5 t; P4 = 10,5 t; P5 = 10,5 t;
- 2) 44 t – P1 = 5,9 t; P2 = 11,4 t; P3 = 8,9 t; P4 = 8,9 t; P5 = 8,9 t.

Vastavushindamisel eeldatakse, et sillal võivad sõidukid samal ajal liigelda mõlemas suunas, võttes omavaheliseks vaheks 1,0 m ja silla servast 0,5 m. Kahe sõidukiga arvestatakse sõltumata kogu silla laiusest ja radade arvust. Lisaks on võimalus, et sõidukid paiknevad tihedalt teineteise taga, kuid kuni 30 meetristel rajatisel sellega ei arvestata.

Lisaks selgitati uuringu käigus dünaamilise mõju arvestamist. Eri katsete põhjal leiti, et olemasolevatel rajatistel tuleb dünaamikateguriks võtta $\varphi = 1,10$. Veoki massi 52 tonni tuleb võtta kui normkoormust, sest vastavalt WIM mõõtmistele liiklevad teedel paljud masinad ülekoormusega ja selle tõenäosusega arvestamiseks tuleks kasutada osavarutegurit 1,35, mille sisse on juba arvestatud dünaamikategur 1,10 ning võimalike liiklusummikuid arvesse võttev tegur 1,25.

Sildade kandevõime hindamisel vastavalt koormusmodelile LM3 tuleks arvesse võtta järgmistes punktides toodud selgitusi:

- 1) eriolukordade puudumisel peavad riigi põhi- ja tugimaanteed sillad kandma 52- ja 44-tonniseid raskeveokeid;
- 2) liiklusega ristisuunas paigutatakse veokid üksteisest 1,0 m kaugusele ja sõiduki ning silla serva vaheline kaugus peab olema 0,5 m;
- 3) tüüpsete projektlahenduste puhul lisatakse konstruktsioonile 10 cm paksune kiht tasandusbetooni ja 10 cm paksune kiht asfaltbetooni;
- 4) sõiduki koormuse osavarutegur on 1,35;
- 5) omakaalule (betoonkonstruktsioonid, sillakatend ja piirded) rakendatakse osavarutegurit 1,10;
- 6) sõidukid asetatakse nõuetekohaselt kõige ebasoodsamatesse asukohtadesse;
- 7) koormusmodeliga LM3 ei mõju koos teised muutuvad koormused (jalakäijate koormused jms);
- 8) arvutused teostatakse ainult kandepiiriseundi kohta.

Kokkuvõtlikult võib öelda, et Lätis on väga palju tähelepanu pööratud sildade grupeerimisele ja tänapäevaste koormuste arvutuslikule imiteerimisele. Kuid kuna sildade proovikoormamine on uute sildade vastuvõtmisel suhteliselt tavapärane protseduur, siis on läbi viidud ka märkimisväärt arv reaalseid proovikoormamisi, mis põhinevad peamiselt dünaamilisel koormamisel. Viimase 30 aasta jooksul on läbi viidud üle poolesaja vastava testi, mis on andnud väärtuslikku informatsiooni eelkõige dünaamikateguri määramise/täpsustamise kohta. Tulemusi ei ole küll teadaolevalt vormistatud mahukate uurimistöödena, kuid avaldatud on mitmeid nii ülevaatlikke kui ka juhtumipõhiseid teadusartikleid, nt [\[113\]](#), [\[114\]](#), [\[115\]](#).

1.2.2. Leedu

Ka Leedus on läbi viidud suhteliselt palju proovikoormamisi, kuid tulemusi on väga vähe terviklike uuringutena publitseeritud. Avaldatud on küll teadusartikleid sildade katsetamisest (nt [116], [117], [118], [119]), kuid põhjalikke uuringuid pole koostatud ja mitte ühtegi terviklikku kokkuvõtet ei olnud võimalik Vilniuse Gediminase Tehnikaülikoolist ning Leedu Teede- ja Transpordiuuringute instituudist saada. Sildadealase kokkuvõtte puudumine on seotud Leedu sillahaldussüsteemiga, mille kõige põhjalikum ülevaatus vorm sisaldab ka kandevõimele hinnangu andmist. Kuna praeguseks hetkeks ei ole suudetud kõikidel sildadel nii põhjalikku ülevaatus teostada, siis pole ka kokkuvõtteid tehtud. Leedus on eraldiseisvalt uuritud raskete veoste mõju asfaldi kasutuseale, meetodikaid taristu kvaliteedi hindamiseks ning masside piiranguid.

Ministri määrus nr 3-66 „Maksimalūs leidžiami transporto priemonių matmenys, leidžiamos ašies (ašių) apkrovos, leidžiamos bendrosios masės“¹⁰ [19] on koostatud vastavalt direktiivile 96/53/EC ja heaks kiidetud 03.03.2002. Maksimaalne haagisveoki pikkus on 18,75 m, kõrgus 4,00 m ja laius 2,55 m. Maksimaalne lubatav koormus on 5-, 6- ja 7-teljelistel sadulveokitel 40 t. ISO konteineri veoks kasutatud 5- või 6-teljeliste veokite lubatud mass on 44 t. Maksimaalne teljekoormus mittevedaval üksikul teljel on 10 t, mis võib topelttelgedele puhul olla piiratud kuni 11 tonnini, kui telgede vahe on alla 1,0 m. Vedava telje puhul on lubatud koormus 11,5 t. Viimase 24.04.2017 tehtud muudatusega (määrus 3-185) [20] on lubatud mõõtmed suurendatud sõidukite veoks kohaldatud veokitel kuni 20,75 m ning bussidel 25 m. Teljekoormus on piiratud 9,5 t peale, kuid maksimaalne koormus on jätkuvalt 40 t. Erand on tehtud Klaipeda sadama alast 50 km raadiuses, kus on 5-teljelistele veokitele lubatud 44 t.

2011. aastal teostati Klaipeda Sadama poolt tellitud ja 16 asutusega läbiviidud uuring „A Guide to Oversize and Heavy Transport through Klaipeda Port“ [21], mis oli ka aluseks ministri määruse muudatusele. Uuringus on juhitud tähelepanu Leedu tööstuse suurele huvi vedada teedel suuri ja raskeid veoseid, mis on enamjaolt seotud naftatööstustehasega „Mazeiku Nafta“, keemiatööstustega ning tuuma- ja elektrijaamadega. Kõige raskem koorem, mis on transporditud läbi Klaipeda sadama, on 530-tonnine Mažekiai Naftatööstuse reaktor. Samas uuringus tehti kokkuvõtte lubatud massipiiranguid ületavate sõidukite kohta (tabel 16).

Tabel 16. Raskete ja suuremate mõõtmetega veoste kokkuvõtte [21]

Parameeter	Lubatud piire vähesel määral ületavad veosed		Lubatud piire suuremal määral ületavad veosed	
	Väärtus	Osahulk	Väärtus	Osahulk
Mass	kuni 50 tonni	93%	üle 50 tonni	7%
Pikkus	kuni 24 m	89%	Üle 24 m	11%
Laius	kuni 3,5 m	65%	üle 3,5 m	35%
Kõrgus	kuni 4,5 m	80%	üle 4,5 m	20%

Tabelist on näha, et enamus veoseid ei vajaks erilubasid, sest lubatud piiride ületamine on väike ja trasside valimine ei ole väga keeruline, kuid sellegipoolest koostati suuremate masside jaoks trassid, mida tuleks kasutada (Klaipedast Lätti, Poola ja Valgevenesse). Ülejäänud uurimustöö keskendub veose maksustamisele ja vajalikele protseduuridele, sest vaatamata väikesele lubatud mõõtmete ja masside ületamisele on need veosed maksustatud.

¹⁰ Eesti keeles: Maanteedel liikuvate sõidukite suurimad lubatavad mõõtmed, teljekoormused ja massid.

Leedu spetsialistid on ühe mahuka uuringu teostanud ka Eestiga seondult ja kuigi see on suhteliselt vana uuring, on seda siiski põhjust siinkohal vaadelda. 2005. aastal viis Kaunase Transpordi ja Teede Uuringute Instituut läbi Narva Sõpruse silla ülevaatuse ja proovikoormamise. Uuring „The Narva Bridge inspection and assessment of the bridge carrying capacity“ [120] valmis Maanteeameti tellimusel.

2005. aastaks olid Narva silla kahjustused ülekoormuste tõttu arenenud niivõrd ulatuslikeks, et oli põhjust kahelda vajalikus kandevõimes. Kuna tegu on olulise transpordisõlmega, siis telliti sillale põhjalik seisukorra audit.

Erinevate ajastute liikluskoormuste mõju võrdlus näitas, et:

- 1) sisejõud, mis tekkisid koormuse A-11 mõjul (СНП 2.05.03-84*), on praktiliselt samad, mis tekkisid eurokoodeksi koormustest;
- 2) koormuse H-18 (H 106-53) toimel tekkinud sisejõud olid märgatavalt väiksemad (kuni 2 korda) võrreldes eurokoodeksi liikluskoormustest tekkivate sisejõududega.

18-tonniste veokitega läbi viidud staatilise koormuse katsed ([foto 4](#)) näitasid, et tegelikud läbipained jäid umbes kolmandiku võrra väiksemateks võrreldes arvutuslikega. Paraku ületasid mõnede koormuskombinatsioonide korral sarruse pingemuudud lubatud väärtusi. Kvaasistaatiline ja dünaamiline katsetus tõestasid, et sild on väga tundlik dünaamilistele koormustele, mistõttu mitmed tähtsad kriteeriumid ei olnud täidetud. Kiirus, mille korral dünaamilise koormuse probleem on minimaalne, oli 5 km/h. Lõpptulemusena fikseeriti, et silla maksimaalne normatiivne kandevõime on 75 t, kuid dünaamika- ja koormuse osavarutegureid arvesse võttes on sillale lubatava veoki maksimaalseks kogumassiks 41 t.



Foto 4. Narva Sõpruse silla proovikoormamine 2005. aastal

1.2.3. Venemaa

Venemaal on pikka aega kasutatud sildade projekteerimisel liikluskoormusi, mis on suhteliselt erinevad võrreldes Euroopa Liidus kasutatavatega. Kuigi viimastesse normidesse on lisatud ka selliseid liikluskoormusi, mis sarnanevad eurokoodeksi raskeveokitega, siis erinevused tervikuna on ikkagi märgatavad ja tehakse tööd erinevate normatiivdokumentide süsteemide harmoniseerimisega. Seda eelkõige põhjusel, et mitte seada ohtu rahvusvahelist kaubatransporti Venemaa ja teiste riikide vahel.

Seejuures on eurokoodeks EN 1991-2:2003 [122] tõlgitud ka Vene keelde ning omab tähist HCP EH 1991-2-2011 [123]. Tasub märkida, et selle rahvuslikus lisas on antud eraldi juhised üleminekuks erinevatele Venemaa standarditele ja normatiivdokumentidele. Asjast huvitatutel tasuks kindlasti lugeda ka selle standardi seletuskirja [124].

Liikluskoormuste teaduslik edasiarendamine leiab kajastamist paljudes (teadus)artiklites (nt [125], [126], [127] jne), kuid üks märkimisväärsmaid liikluskoormuste võrdlemise ja ühtlustamisega seotud uurimistöid „Гармонизация расчетных моделей автомобильных нагрузок России и Евросоюза на мосты массового применения“ [22] valmis 2014. aastal. Töö põhifookuseks oli võrrelda koormusmodelite AK (tuginedes standardile СП 35.13330.2011 [70]) ja LM1 (EN 1991-2:2003 [122]) mõju sildade projekteerimisele. Töö baseerus tuhandetel lõplike elementide meetodil teostatud arvutuste omavahelisel võrdlusel. Eesmärgiks oli arendada sildade liikluskoormustega seotud juhendmaterjale ning töö tulemusi kasutati standardi ГОСТ 33390-2015 [60] väljatöötamisel.

Töös vaadeldi põhiliselt raudbetoonist, terasest ja komposiitlahendusega talasildu. Arvutustulemused näitasid, et LM1 mõju koormustulemitele oli võrreldes A-14-ga suurem. Vastavad suhtarvud jäid vahemikku 0,43...0,61 ning on sõltuvalt sildepikkusest ja silla laiusest kajastatud tabelis 17. Tõdeti, et Venemaa liikluskoormustele projekteeritud sillad ei ole võimelised kandma eurokoodeksi koormust LM1, kui kasutatakse tegurit $\alpha = 1,0$. Kui $\alpha = 0,8$, siis kandevõime oli tagatud 17% sildadest, kusjuures 48% sildadest oli kandevõime puudujääk alla 15%. Tabelis 18 on esitatud mõju koormustulemitele, kui lisaks liikluskoormustele võetakse arvesse ka kõiki teisi standardites ette nähtud koormusi.

Tabel 17. Koormuste A-14 ja LM1 koormustulemite suhtarvud erinevate silla laiuste ning sildepikkuste korral [22]

Silla gabariit [m]	Sildeava pikkus [m]					
	12	15	18	21	24	33
Г-11,5+2×1,5	0,600	0,573	0,562	0,547	0,542	0,526
Г-11,5+2×1,0	0,600	0,586	0,578	0,562	0,557	0,542
Г-11,5+2×0,75	0,602	0,591	0,585	0,570	0,564	0,550
Г-10,0+2×1,5	0,602	0,586	0,580	0,555	0,542	0,526
Г-10,0+2×1,0	0,585	0,584	0,575	0,569	0,564	0,550
Г-10,0+2×0,75	0,598	0,590	0,583	0,577	0,572	0,558
Г-8,0+2×1,5	0,607	0,594	0,587	0,564	0,542	0,526
Г-8,0+2×1,0	0,605	0,599	0,593	0,581	0,558	0,544
Г-8,0+2×0,75	0,609	0,602	0,596	0,589	0,566	0,553

Tabel 18. Standardite СП 35.13330.2011 ja EN 1991-2:2003 koormustulemite suhtarvud erinevate silla laiuste ning sildepikkuste korral, võttes arvesse kõiki koormuseid ja mõjureid [22]

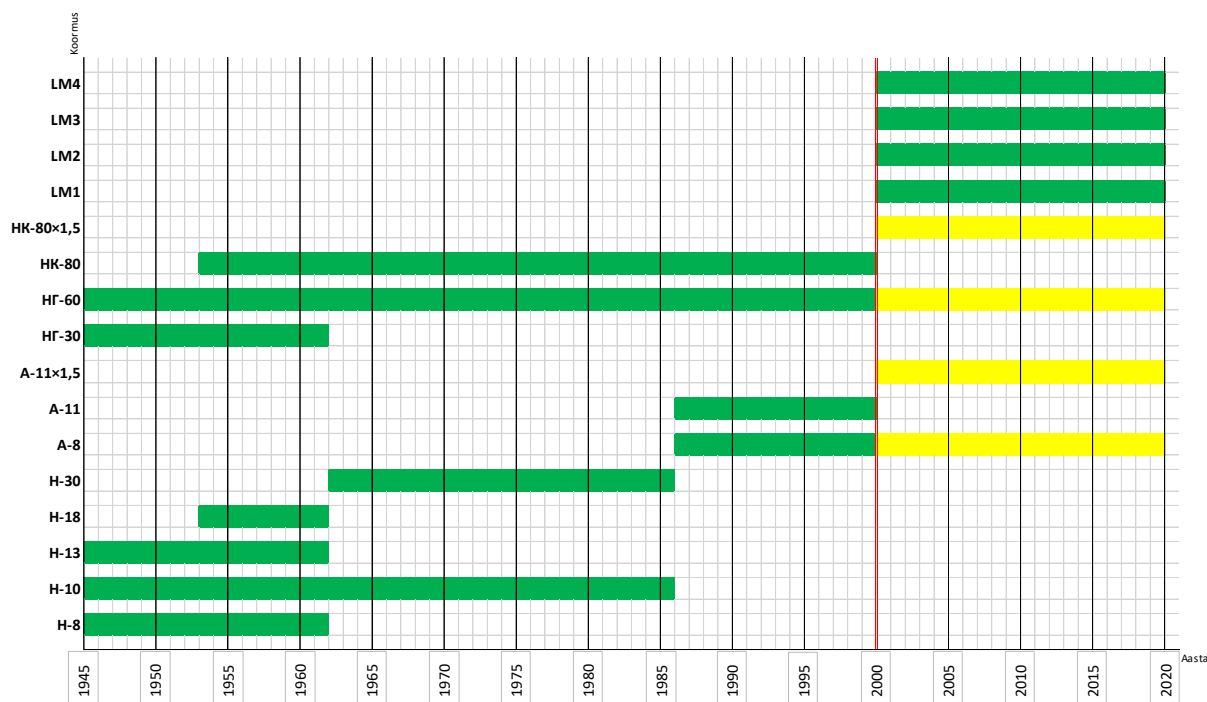
Silla gabariit [m]	Sildeava pikkus [m]					
	12	15	18	21	24	33
Г-11,5+2×1,5	0,675	0,682	0,694	0,700	0,706	0,722
Г-11,5+2×1,0	0,675	0,682	0,694	0,700	0,706	0,721
Г-11,5+2×0,75	0,675	0,682	0,694	0,700	0,706	0,721
Г-10,0+2×1,5	0,674	0,683	0,695	0,701	0,707	0,724
Г-10,0+2×1,0	0,688	0,697	0,707	0,711	0,715	0,728
Г-10,0+2×0,75	0,689	0,697	0,707	0,711	0,715	0,728
Г-8,0+2×1,5	0,683	0,692	0,703	0,708	0,711	0,723
Г-8,0+2×1,0	0,684	0,693	0,703	0,709	0,713	0,726
Г-8,0+2×0,75	0,683	0,693	0,704	0,710	0,715	0,728

Ka Venemaal on probleemiks vanade sildade kandevõime mittevastavus kaasaegsetele suurenenud liikluskoormustele. Väga arvukalt on ilmunud uurimistöid, kus käsitletakse raudbetoonist peakandjatega sildade kandevõime suurendamist erinevate komposiitmaterjalidega tugevdamise abil. Seejuures on eriti tähelepanuväärne fakt, et suur osa nendest töödest läheneb probleemile ainult teoreetiliselt ning kohati on nende tööde põhjal tugevdamise teel saavutatud kandevõime suurenemiseks isegi kuni 10 korda. Sellised väited on ilmselge liialdus, sest põhjalikumad uuringud, mille raames on läbi viidud ka pikaajalised kontrollkatsed, annavad vastavaks numbriks kuni paarkümmend protsenti (nt [128], [129], [130]). Eriti kriitiliselt suhtutakse nendesse töödesse, mille lihtsakoelise lähenemise juures ei ole arvesse võetud materjalide omaduste muutumist ajas.

Ebapiisavas mahus tehtavate hooldetööde tõttu on Venemaal kasvavaks probleemiks sildade kasutusea vähenemine. 70-100 aastaks projekteeritud sildade kasutusiga jääb tegelikkuses sageli alla 50 aasta. Töös „Прогнозирование срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов“ [131] analüüsitakse põhjalikult vastavaid prognoosmudeleid ning pakutakse välja meetodeid sildade kasutusea tõstmiseks.

2. SILDADE LIKLUSKOORMUSED EESTIS AJAVAHEMIKUS 1945 KUNI TÄNAPÄEV

Riigiteedel asub tänapäeval orienteeruvalt 1000 silda¹¹ (tabel 19), millest 93% on ehitatud peale teist maailmasõda (58% vahemikus 1945-1990 ja 35% vahemikus 1991-2017). On oluline märkida, et selle perioodi jooksul on kasutatud erinevaid liikluskoormuseid (joonis 17) ja seda nii koormuse iseloomu, paigutuse kui ka koormusmudeli rakendamise reeglite osas.



Joonis 17. Liikluskoormused sõidukitest alates aastast 1945 (kollase taustaga on näidatud erandina lubatavad koormused)

Käesolevas peatükis on tehtud kokkuvõtlik ülevaade sildade projekteerimisel kasutatud liikluskoormustest ja nende rakendamisest. Keskendutakse nendele liikluskoormustele, mida on kasutatud peale teist maailmasõda, sest

- 1) valdav enamus (93%) tänaseks säilinud maantesildadest on ehitatud just sellel perioodil ja
- 2) kõikidele enne seda perioodi ehitatud sildadele on hiljem määratud kaasaegsemad liikluskoormused, mida kasutatakse silla kandevõime määratlemisel.

Ülevaade sildade liikluskoormustest on koostatud kehtinud nõuete kronoloogilises järjekorras (tabel 20). Kuna sildade renoveerimisel tuleb nende algupäraste projektkoormustega sageli kokku puutuda, siis on võimalusel lisatud ka link originaaldokumendile.

Ülevaates ei käsitleta erinevaid avariikoormusi ega väsimuskoormusmudeleid, samuti rööbasteedega seotud liikluskoormusi.

¹¹ Terminoloogilise lihtsuse huvides käsitletakse siinkohal sillana ka viadukte, kuna liikluskoormuse seisukohalt neid ei eristata.

Tabel 19. Riigiteedel asuvate sildade ehitusaeg
(allikas: [Riiklik Teeregister](#) seisuga 23.07.2019)

Ehitusaeg	Sildade arv ¹⁾
Enne 1900	6
1900-1909	8
1910-1919	4
1920-1929	5
1930-1939	45
1940-1949	27
1950-1959	110
1960-1969	213
1970-1979	132
1980-1989	96
1990-1999	52
2000-2009	107
2010-2019	206
Kokku	1011
Märkused:	
1) Tabelisse on kantud ainult tänaseni säilinud sillad.	

Tabel 20. Sildade liikluskoormused Eesti territooriumil peale teist maailmasõda

Dokument	Vastu võetud või kinnitatud	Kehtima hakanud	Asendas	Link kirjeldusele
ГОСТ 2775-44 Нагрузки временные вертикальные для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах [55]	30.12.1944	15.04.1945		Jaotis 2.1.1
Н 106-53 Нормы подвижных вертикальных нагрузок для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах [62]	19.12.1952	01.04.1953	ГОСТ 2775-44	Jaotis 2.1.2
СН 200-62 Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб [64]	30.12.1961	01.04.1962	Н 106-53 Н 112-53 ТУПМ-56 ТУПИМ-св-55	Jaotis 2.1.3
СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы [67]	30.11.1984	01.01.1986	СНиП II-Д.7-62* СН 200-62	Jaotis 2.1.4
СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы ¹⁾ [68]	26.11.1991		СН 365-67	Jaotis 2.1.5
EPN-ENV 1.3A Projekteerimise alused. Koormused. Osa 3 Sildade liikluskoormused. Üldeskirjad, maantee- ja jalgteesildade liikluskoormused [51]	Märts 1998	01.01.2000 ²⁾	СНиП 2.05.03-84	Jaotis 2.2.1
EVS-EN 1991-2:2004+NA:2007 Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 2: Sildade liikluskoormused ³⁾ [41]	28.11.2007	Detsember 2007	EPN-ENV 1.3A	Jaotis 2.2.2
Märkused:				
1) Tegemist on СНиП 2.05.03-84 täiendatud versiooniga aastast 1991, mida juriidiliselt Eestis ei ole kunagi kasutada lubatud (vastavad selgitused on toodud järgnevas jaotises).				
2) Allpool on selgitatud, miks on tinglikult loetud kehtima hakkamiseks just see kuupäev.				
3) Perioodil 28.11.2007-26.06.2009 kandis standard tähist EVS-EN 1991-2:2007, kuid muudeti seejärel eurokoodeksi tähist ühtlustamise käigus ümber (standardi sisu seejuures ei muutunud).				

2.1. Liikluskoormused ajavahemikus 1945 kuni 2000

Esimese grupina käsitletakse liikluskoormuseid ajavahemikust 1945 kuni 2000, kuna oma põhimõttelt on need väga sarnased. Sellel perioodil uuendati vastavaid norme suuremal määral neli korda ning oma olemuselt olid nad kohustuslikud kogu Nõukogude Liidu territooriumil. Selle perioodi erinevate liikluskoormuste täpsemad rakendusjuhised on kokkuvõtlikult kirjeldatud alljärgnevas jaotistes.

Antud perioodil kasutati kolme tüüpi liikluskoormusi:

1) autokolonnid ([tabelid 21...22](#) ja [joonised 18...24](#)):

- H-8, H-10, H-13, H-18 ja H-30 – kolonn koosneb järjestikustest normaalausotodest (koormuse tähises olev number näitab normaalauto kaalu tonnides), mille keskel on üks raske auto (välja arvatud H-30, kus kõik autod on sama kaaluga),
- A-8 ja A-11 – kolonn koosneb kahest pikisuunalisest joonkoormusest, mille hulgas on üks 2-teljeline auto (vanker), kusjuures koormuse tähises olev number näitab vankri ühe telje kaalu tonnides;

2) eriveokid ehk nn jõuvankrid ([tabel 23](#) ja [joonised 25...27](#)):

- HГ-30¹² ja HГ-60¹³ – roomikkoormus, kus koormuse tähises olev number näitab jõuvankri kaalu tonnides,
- HK-80 – rataskoormus, kus tähises olev number näitab jõuvankri kaalu tonnides;

3) jalakäijad.

Andmaks üldist ülevaadet erinevate koormuste mõjust silla peakandjatele, on [joonistel 28 ja 29](#) näidatud autokolonnidest ja jõuvankritest tekkivad normatiivsed paindemomendid, mis on määratud peakandjate samaaegselt esinevate suurimate paindemomentide summana (ehk koormuse jagunemist erinevate peakandjate vahel ei ole arvesse võetud). Graafikute koostamisel on eeldatud, et korraga paikneb sillal ainult üks autorong või üks jõuvanker, mis on silla pikisuunas paigutatud paindemomendi suhtes kõige ebasoodsamasse asukohta. Nende graafikute kasutamisel peab arvestama, et eri ajastute normides kasutati erinevaid osavaru-, dünaamika- ja vähendustegureid, millega siis normatiivseid väärtusi korrutada tuleb.

¹² Kuni 1953. aastani kasutati selle asemel tähist H-30.

¹³ Kuni 1953. aastani kasutati selle asemel tähist H-60.

Tabel 21. Autokolonnide H-8, H-10, H-13, H-18 ja H-30 tähtsamad parameetrid [55], [62], [64], [67], [68]

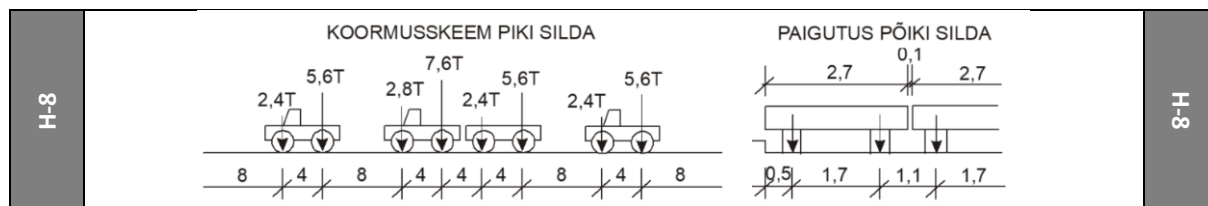
Parameeter	Ühik	Autokolonn								
		H-8		H-10		H-13		H-18		H-30
		N/A ¹⁾	R/A ²⁾	N/A	R/A	N/A	R/A	N/A	R/A	
Auto kaal	t	8,0	10,4	10,0	13,0	13,0	16,9	18	30	30
Koormus esimesel teljel	t	2,4	2,8	3,0	3,5	3,9	4,55	6	6	6
Koormus tagumisel teljel	t	5,6	7,6	7,0	9,5	9,1	12,35	12	2×12	2×12
Esiratta puutelaius	m	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30	0,30
Tagaratta puutelaius	m	0,30	0,30	0,30	0,40	0,40	0,60	0,70	0,70	0,60
Ratta puutepikkus	m	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Auto baas	m	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	6,0	6,8	6,0+1,6
Veokasti laius	m	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,9	2,9	2,9
Telje pikkus	m	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,9	1,9	1,9
Kolonni vahekaugus	m	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Märkused: 1) N/A – normaalauto. 2) R/A – raske auto.										

Tabel 22. Autokolonnide A-8 ja A-11 tähtsamad parameetrid [55], [62], [64], [67], [68]

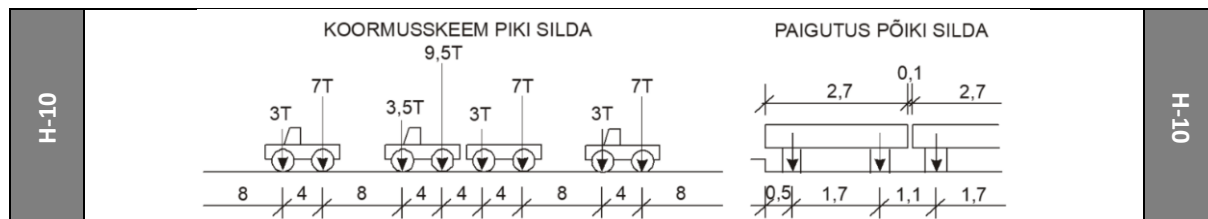
Parameeter	Ühik	Autokolonn	
		A-8	A-11
Auto kaal	t	16	22
Koormus esimesel teljel	t	8	11
Koormus tagumisel teljel	t	8	11
Esiratta puutelaus	m	0,6	0,6
Tagaratta puutelaus	m	0,6	0,6
Ratta puutepikkus	m	0,2	0,2
Auto baas	m	1,5	1,5
Telje pikkus	m	1,9	1,9
Ühtlaselt jaotatud koormus (jaguneb võrdselt kummalegi „rattajäljele“)	t/m	0,8	1,1

Tabel 23. Jõuvankrite HГ-30, HГ-60 ja HK-80 tähtsamad parameetrid [55], [62], [64], [67], [68]

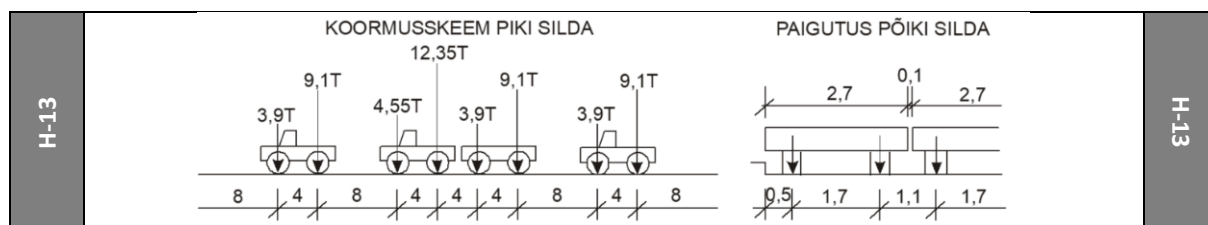
Parameeter	Ühik	Jõuvanker		
		HГ-30	HГ-60	HK-80
Jõuvankri kaal	t	30	60	80
Koormus teljele	t	-	-	20
Koormus roomiku pikkusühikule	t/m	3,75	6	-
Roomiku puutepikkus	m	4	5	-
Ratta või roomiku puutelaus	m	0,5	0,7	0,8
Ratta ja teekatte puutepikkus	m	-	-	0,2
Telgede vahekaugus	m	-	-	1,2
Telje pikkus	m	2,5	2,6	2,7



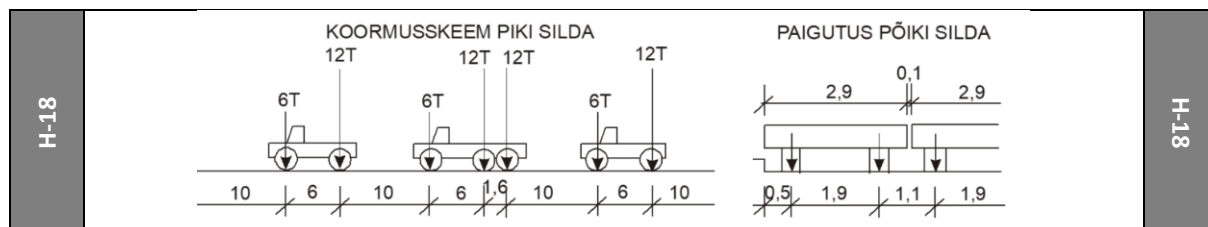
Joonis 18. Autokolonn H-8 [23]



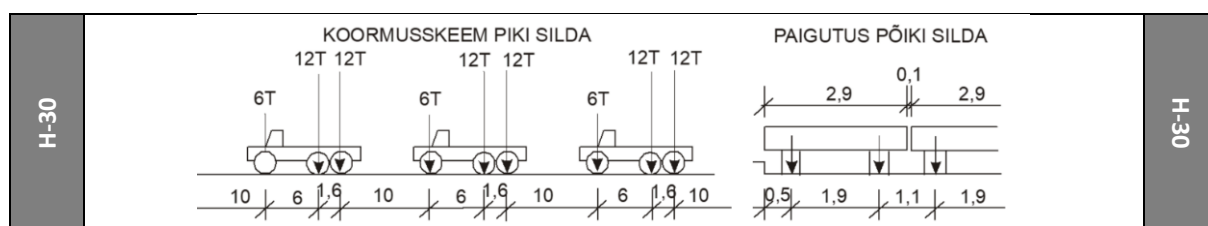
Joonis 19. Autokolonn H-10 [23]



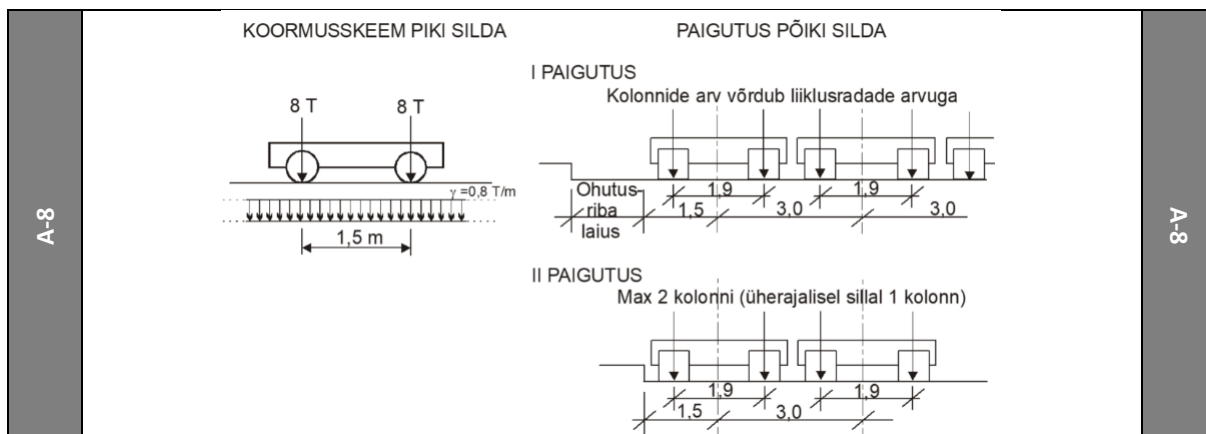
Joonis 20. Autokolonn H-13 [23]



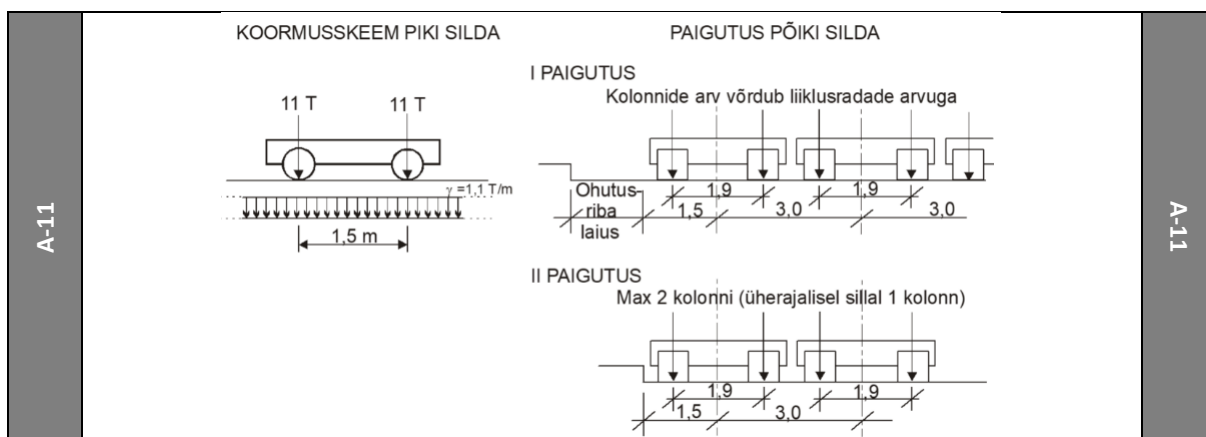
Joonis 21. Autokolonn H-18 [23]



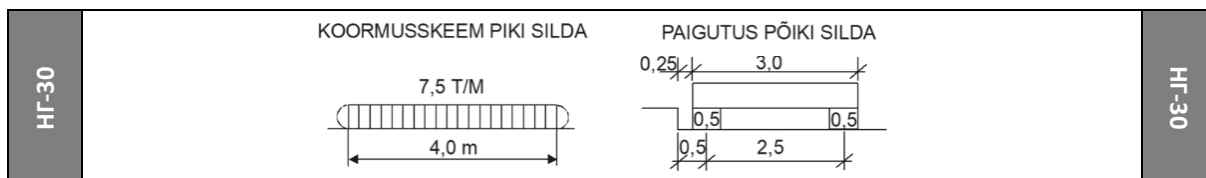
Joonis 22. Autokolonn H-30 [23]



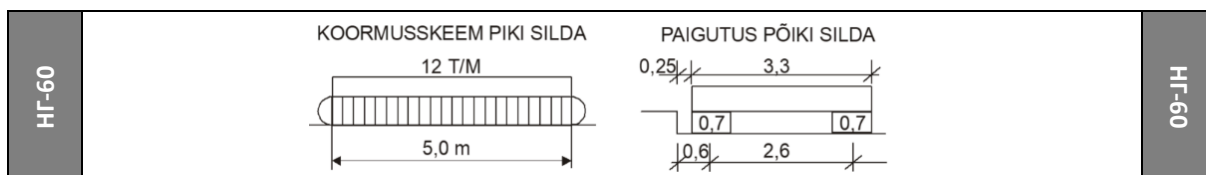
Joonis 23. Autokolonn A-8 [23]



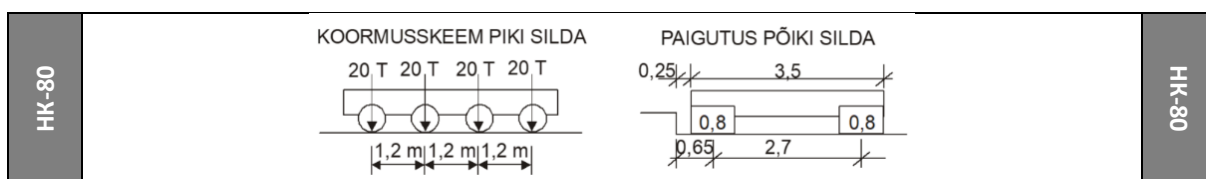
Joonis 24. Autokolonn A-11 [23]



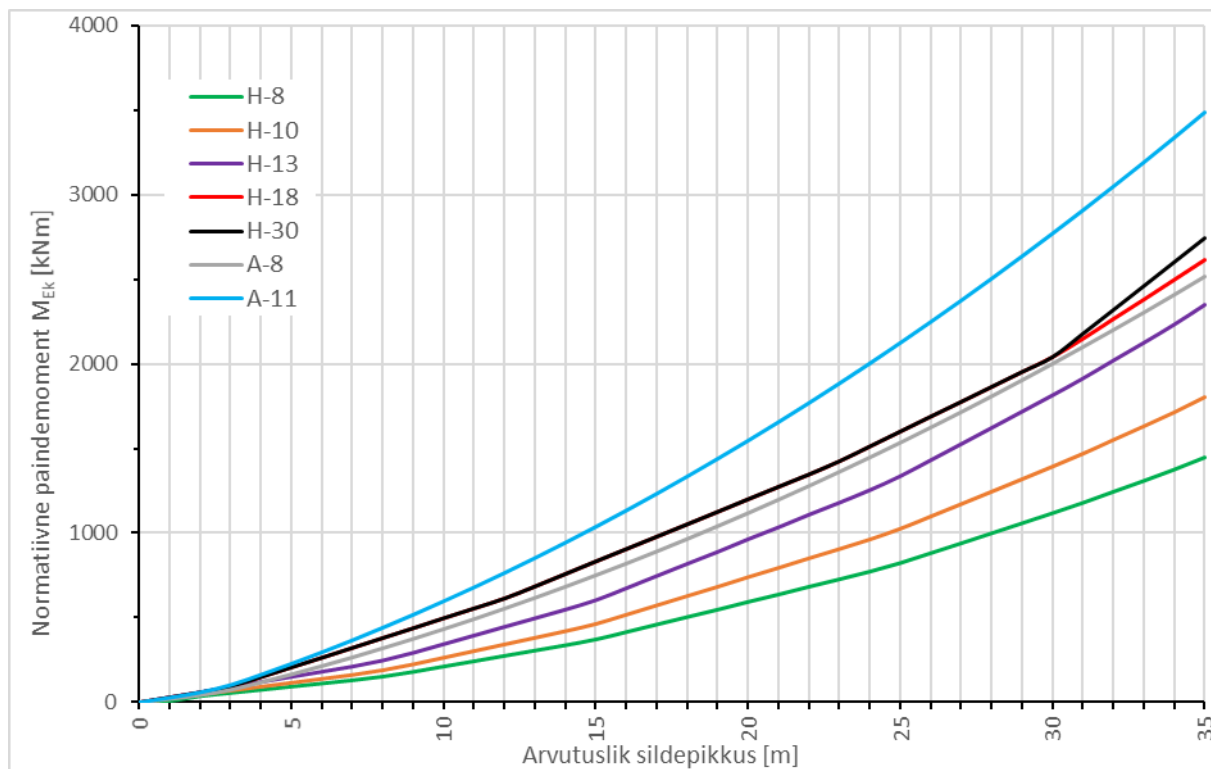
Joonis 25. Jõuvanker HF-30 [23]



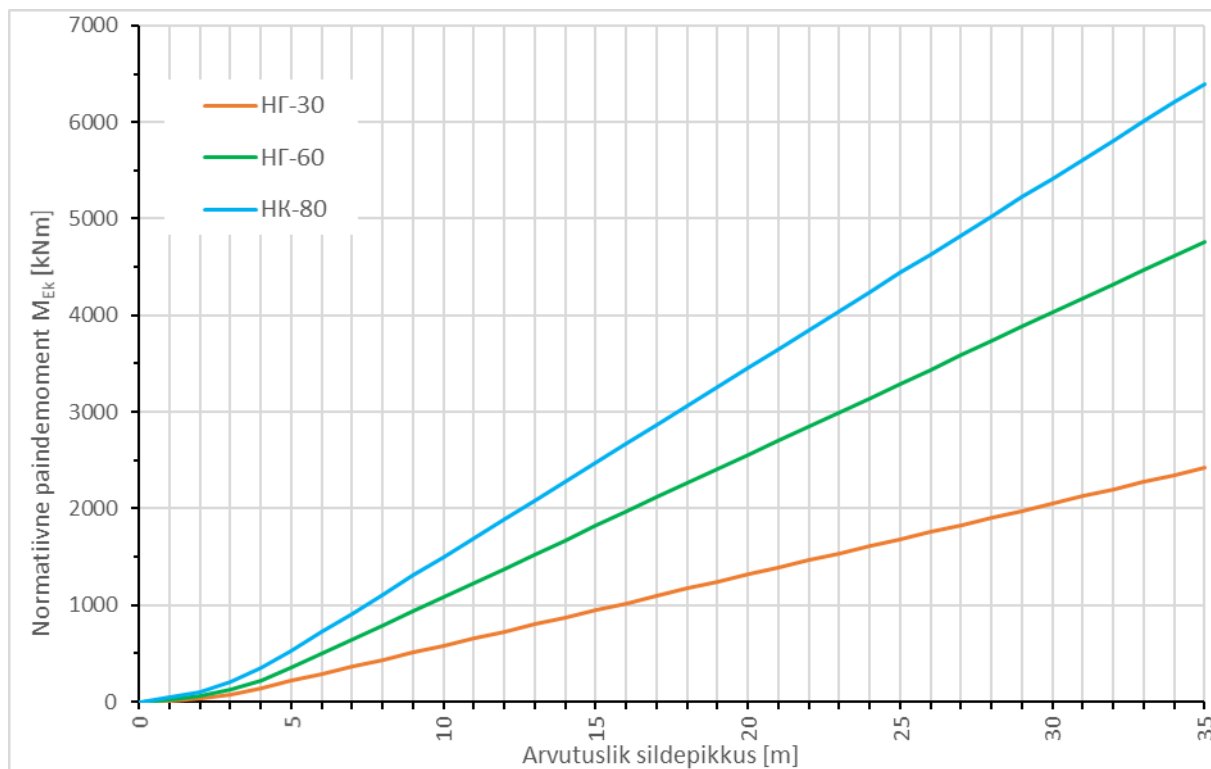
Joonis 26. Jõuvanker HF-60 [23]



Joonis 27. Jõuvanker HK-80 [23]



Joonis 28. Ühest autokolonnist tekkivad normatiivsed paindemomendid lihttala erinevate sildepikkuste korral



Joonis 29. Ühest jõuvankrist tekkivad normatiivsed paindemomendid lihttala erinevate sildepikkuste korral

2.1.1. ГОСТ 2775-44

„ГОСТ 2775-44 Нагрузки временные вертикальные для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах“ [55] hakkas kehtima 15.04.1945. Koormusi kajastati ka normis „Правила и указания по проектированию железобетонных, металлических, бетонных и каменных искусственных сооружений на автомобильных дорогах“ (Гушосдор МВД СССР, 1948) [61].

ГОСТ 2775-44 alusel jaotati liikluskoormused kolme gruppi:

- autokolonnid H-8, H-10 ja H-13;
- jõuvankrid H-30¹⁴ ja H-60;
- jalakäijad.

Autokolonnid H-8 (joonis 18), H-10 (joonis 19) ja H-13 (joonis 20):

- kolonn võib paikneda sõiduteel meelevaldses asukohas (st kõige ebasoodsamas), kuid autode gabariidid ei tohi ulatuda väljapoole sõiduteed;
- kolonni pikitelg peab olema paralleelne silla pikiteljega;
- kolonni pikkust ei piirata;
- piki silda võib kolonnidel olla meelevaldne hulk katkestusi;
- kõik kolonnid peavad olema sama liikumissuunaga;
- kõrvutiolevate kolonnide arvu ei piirata, kuid väikseim kolonnide külgsuunaline vahekaugus tohib olla 1,1 m (mõõdetuna rattarea pikiteljest), mis teeb kastide vahekauguseks 0,1 m;
- alates kolmest kõrvutiasetsevast kolonnist kasutatakse koormustulemite¹⁵ arvutamisel kolonnide arvust sõltuvat vähendustegurit (välja arvatud kõige kõrgema kategooriaga teedel):
 - kolm kolonni: 0,85,
 - neli ja enam kolonni: 0,75;
- koormuse osavarutegur: $\gamma = 1,00$;
- koormuse dünaamikategur¹⁶:
 - metallist tala- ja kaarsillad: $1+\mu = 1+15/(37,5+\lambda)$,
 - metallist ripp- ja vantsillad: $1+\mu = 1+50/(70+\lambda)$,
 - raudbetoonist tala- ja raamsillad ning kaarsildade võrelised kaarepealsed:
 $1+\mu = 1+0,0075/(45-\lambda)$, kusjuures $1,00 \leq 1+\mu \leq 1,30$,
 - raudbetoonist kaarsildade kaared ja võlvid võrelise kaarepealse korral:
 $1+\mu = 1+0,004/(70-\lambda)$, kusjuures $1,00 \leq 1+\mu \leq 1,20$,
 - puit-, kivi- ja betoonsillad: $1+\mu = 1,00$.

Jõuvankrid H-30 (joonis 25) ja H-60 (joonis 26):

- sillale rakendatakse korraga ainult ühte jõuvankrit;
- jõuvanker võib paikneda sõiduteel meelevaldses asukohas, kuid mitte lähemal kui 25 cm servaprussile või piirdele;

¹⁴ Siinkohal tuleb tähelepanu pöörata asjaolule, et antud koormuse tähist on hilisemates normatiivdokumentides samuti kasutatud, kuid koormuse iseloom on oluliselt erinev.

¹⁵ Koormustulem – koormuste toime konstruktsioonelemendile (nt sisejõud, moment, pinge, suhteline deformatsioon) või kogu konstruktsioonile (nt läbipaine, pööre).

¹⁶ Peakandurite arvutamisel on λ silde pikkus, milles asub vaadeldav lõige, või kõigi koormatud osade pikkuste summa (sõltuvalt sellest, kumb annab väiksema tulemuse). Muude elementide puhul on λ kooskõlas arvesse mineva sisejõu mõjujoone koormatud osa pikkusega.

- jõuvankri pikitelg peab olema paralleelne silla pikiteljega;
- koormuse osavarutegur: $\gamma = 1,00$;
- koormuse dünaamikategur: $1+\mu = 1,00$.

Jalakäijad:

- koormus jalakäijatest on lauskoormus 300 kg/m^2 ning seda rakendatakse ainult kõnniteele;
- lisaks ühtlaselt jaotatud koormusele tuleb teostada katendi kontroll punktkoormusele 130 kg ;
- koormuse asetus võib olla meelevaldne, kuid peab tagama kõige ebasoodsamad koormustulemid;
- ilma kõnniteeta sildadele jalakäijate koormust ei rakendata.

Liikluskoormuste kombineerimine:

- autokolonn(de)ga samaaegselt rakendatakse ka koormust jalakäijatest;
- jõuvankriga samaaegselt ühtegi teist liikluskoormust (ka jalakäijatest) ei rakendata;
- autokolonn ja jõuvankri tüüp ei sõltu tee kategooriast ning tuleb alati määratleda projekteerimise lähteülesandes, kuid üldjuhul kasutatakse järgmisi samaaegseid kombinatsioone:
 - H-13 ja H-60,
 - H-10 ja H-60,
 - H-13 ja H-30,
 - H-10 ja H-30,
 - H-8 ja H-30 (puitsillad).

2.1.2. H 106-53

„H 106-53 Нормы подвижных вертикальных нагрузок для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах“ [\[62\]](#) hakkas kehtima 01.04.1953. Liikluskoormused trükiti ära ka normides „НиТУ 128-55 Нормы и технические условия проектирования автомобильных дорог“ [\[63\]](#) ja „СНиП II-Д.8-54 Мосты и трубы“ [\[65\]](#).

Suuremad muudatused võrreldes eelneva normiga:

- lisandusid autokolonn H-18 ja neljateljeline ratastega jõuvanker HK-80;
- varasemad roomikutega jõuvankrid H-30 ja H-60 said uued tähised vastavalt HF-30 ja HF-60;
- liikluskoormused seoti ära tee kategooriaga.

H 106-53 alusel jaotati liikluskoormused kolme gruppi:

- autokolonnid H-8, H-10, H-13 ja H-18;
- jõuvankrid HF-30, HF-60 ja HK-80;
- jalakäijad.

Autokolonnid H-8 ([joonis 18](#)), H-10 ([joonis 19](#)), H-13 ([joonis 20](#)) ja H-18 ([joonis 21](#)):

- kolonn võib paikneda sõiduteel meelevaldses asukohas (st kõige ebasoodsamas), kuid autode gabariidid ei tohi ulatuda väljapoole sõiduteed;
- kolonni pikitelg peab olema paralleelne silla pikiteljega;
- kolonni pikkust ei piirata;
- piki silda võib kolonnidel olla meelevaldne hulk katkestusi;
- kõik kolonnid peavad olema sama liikumissuunaga;

- kõrvutiolevate kolonnide arvu ei piirata, kuid väikseim kolonnide külgsuunaline puhas vahekaugus tohib olla 0,1 m (möödetuna kolonnide välisgabariidist);
- alates kolmest kõrvutiasetsevast kolonnist kasutatakse koormustulemite arvutamisel kolonnide arvust sõltuvat vähendustegurit (sõltumata tee kategooriast):
 - kolm kolonni: 0,85,
 - neli ja enam kolonni: 0,75;
- koormuse osavarutegur: $\gamma = 1,00$;
- koormuse dünaamikategur:
 - metallist tala- ja kaarsillad: $1+\mu = 1+15/(37,5+\lambda)$,
 - metallist ripp- ja vantsillad: $1+\mu = 1+50/(70+\lambda)$,
 - raudbetoonist tala- ja raamsillad ning kaarsildade võrelised kaarepealsed: $1+\mu = 1+0,0075/(45-\lambda)$, kusjuures $1,00 \leq 1+\mu \leq 1,30$,
 - raudbetoonist kaarsildade kaared ja võlvid võrelise kaarepealse korral: $1+\mu = 1+0,004/(70-\lambda)$, kusjuures $1,00 \leq 1+\mu \leq 1,20$,
 - puit-, kivi- ja betoonsillad: $1+\mu = 1,00$.

Jõuvankrid HG-30 (joonis 25), HG-60 (joonis 26) ja HK-80 (joonis 27):

- sillale rakendatakse korraga ainult ühte jõuvankrit;
- jõuvanker võib paikneda sõiduteel meelevaldses asukohas, kuid mitte lähemal kui 25 cm servaprussile või piirdele;
- jõuvankri pikitelg peab olema paralleelne silla pikiteljega;
- koormuse osavarutegur: $\gamma = 1,00$;
- koormuse dünaamikategur: $1+\mu = 1,00$.

Jalakäijad:

- teesildade koormus jalakäijatest on 300 kg/m^2 ning seda rakendatakse ainult kõnniteele;
- jalgteesildade lauskoormuseks võetakse 400 kg/m^2 ;
- lisaks ühtlaselt jaotatud koormusele tuleb teostada katendi kontroll punktikoormusele 130 kg;
- koormuse asetus võib olla meelevaldne, kuid peab tagama kõige ebasoodsamad koormustulemid;
- ilma kõnniteeta sildadele jalakäijate koormust ei rakendata.

Liikluskoormuste kombineerimine:

- autokolonn(de)ga samaaegselt rakendatakse ka koormust jalakäijatest;
- jõuvankriga samaaegselt ühtegi teist liikluskoormust (ka jalakäijatest) ei rakendata;
- autokolonn ja jõuvankri omavaheline kombineerimine sõltub tee kategooriast ja on esitatud tabelis 24.

Tabel 24. Koormuste rakendamine sõltuvalt tee kategooriast [62]

Tee kategooria	Metall-, raudbetoon- ja kivisillad		Puitsillad	
	Autokolonn	Jõuvanker	Autokolonn	Jõuvanker
I – II	H-18	HK-80	-	-
III	H-13	HG-60	H-10	HG-60
IV	H-13	HG-30 või HG-60	H-10	HG-30 või HG-60
			H-8	HG-30
V	H-10	HG-30 või HG-60	H-10	HG-30 või HG-60
			H-8	HG-30

2.1.3. CH 200-62

„CH 200-62 Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб“ [64] hakkas kehtima 01.04.1962. Liikluskoormused trükiti ära ka normis „СНП II-Д.7-62 Мосты и трубы“ [66].

Suuremad muudatused võrreldes eelneva normiga:

- lisandus autokolonn H-30;
- ära kadusid autokolonnid H-8, H-13, H-18 ja roomikutega jõuvanker HF-30;
- liikluskoormustele hakati rakendama ülekoormustegureid (osavarutegureid);
- teesildade jalakäijate hajutatud koormus suurenes 300 kg/m²-lt 400 kg/m²-ni;
- kõnniteede punktkoormus suurenes 130 kg-lt 180 kg-le;
- hakati rakendama parapettide koormust.

CH 200-62 alusel jaotati liikluskoormused kolme gruppi:

- autokolonnid H-10 ja H-30;
- jõuvankrid HF-60 ja HK-80;
- jalakäijad.

Autokolonnid H-10 (joonis 19) ja H-30 (joonis 22):

- kolonn võib paikneda sõiduteel meelevaldses asukohas (st kõige ebasoodsamas), kuid autode gabariidid ei tohi ulatuda väljapoole sõiduteed;
- kolonni pikitelg peab olema paralleelne silla pikiteljega;
- kolonni pikkust ei piirata;
- piki silda võib kolonnidel olla meelevaldne hulk katkestusi;
- kõik kolonnid peavad olema sama liikumissuunaga;
- kõrvutiolevate kolonnide arvu ei piirata, kuid väikseim kolonnide külgsuunaline puhas vahekaugus tohib olla 0,1 m (möödetuna kolonnide välisgabariidist);
- alates kahest kõrvutiasetsevast kolonnist kasutatakse üle 25 m pikkuste peakanduritega sildade koormustulemite arvutamisel kolonnide arvust sõltuvat vähendustegurit (sõltumata tee kategooriast):
 - kaks kolonni: 0,90,
 - kolm kolonni: 0,80,
 - neli ja enam kolonni: 0,70;
- koormuse osavarutegur:
 - põhikombinatsioonis¹⁷: $\gamma = 1,40$,
 - lisakombinatsioonis¹⁸: $\gamma = 1,12$,
 - erikombinatsioonis¹⁹: $\gamma = 0,98$;

¹⁷ Koormuste põhikombinatsioon koosneb ainult põhikoormustest – püsivad koormused (omakaal, pingestusjõud, mullasurve jne), liikuvad koormused ja need muutuvad koormused, mis on antud elemendile põhilised (nt tuulesidemetele tuul, jäämurdjatele jäälöögid jne).

¹⁸ Koormuste lisakombinatsioon koosneb põhikoormustest (va ratas- ja roomikkoormused) ning muudest koormustest (va seismilised ja ehituslikud koormused).

¹⁹ Koormuste erikombinatsiooni korral arvestatakse ka ühte erikoormustest (seismilised ja ehituslikud koormused).

- koormuse dünaamikategur:
 - metallist tala- ja kaarsillad: $1+\mu = 1+15/(37,5+\lambda)$,
 - metallist ripp- ja vantsillad: $1+\mu = 1+50/(70+\lambda)$,
 - raudbetoonist tala- ja raamsillad ning kaarsildade võrelised kaarepealsed:
 $1+\mu = 1+0,0075/(45-\lambda)$, kusjuures $1,00 \leq 1+\mu \leq 1,30$,
 - raudbetoonist kaarsildade kaared ja võlvid võrelise kaarepealse korral:
 $1+\mu = 1+0,004/(70-\lambda)$, kusjuures $1,00 \leq 1+\mu \leq 1,20$,
 - puit-, kivi- ja betoonsillad: $1+\mu = 1,00$.

Jõuvankrid HF-60 (joonis 26) ja HK-80 (joonis 27):

- sillale rakendatakse korraga ainult ühte jõuvankrit;
- jõuvanker võib paikneda sõiduteel meelevaldses asukohas, kuid mitte lähemal kui 25 cm servaprussile või piirdele;
- jõuvankri pikitelg peab olema paralleelne silla pikiteljega;
- koormuse osavarutegur:
 - põhikombinatsioonis: $\gamma = 1,10$,
 - lisakombinatsioonis: $\gamma = 0,88$,
 - erikombinatsioonis: $\gamma = 0,77$;
- koormuse dünaamikategur: $1+\mu = 1,00$.

Jalakäijad:

- teesildade koormus jalakäijatest on 400 kg/m^2 ning seda rakendatakse ainult kõnniteele;
- jalgteesildade lauskoormuseks võetakse 400 kg/m^2 ;
- lisaks ühtlaselt jaotatud koormusele tuleb teostada katendi kontroll punktkoormusele 180 kg;
- parapettidele tuleb rakendada vertikaalset ja horisontaalset punktkoormust 130 kg;
- koormuse peab tagama kõige ebasoodsamad koormustulemid;
- ilma kõnniteeta sildadele jalakäijate koormust ei rakendata;
- koormuse osavarutegur:
 - põhikombinatsioonis: $\gamma = 1,40$,
 - lisakombinatsioonis: $\gamma = 1,12$,
 - erikombinatsioonis: $\gamma = 0,98$;
- koormuse dünaamikategur: $1+\mu = 1,00$.

Liikluskoormuste kombineerimine:

- autokolonni(de)ga samaaegselt rakendatakse ka koormust jalakäijatest;
- jõuvankriga samaaegselt ühtegi teist liikluskoormust (ka jalakäijatest) ei rakendata;
- kõikidele sildadele, välja arvatud puitsillad, rakendatakse koormuseid H-30 ja HK-80 (kui kõik asjaspepuutuvad institutsioonid on sellega nõus, siis on lubatud IV ja V kategooria teedel kasutada koormuse HK-80 asemel HF-60);
- puitsildade korral kasutatakse koormuseid H-10 ja HF-60.

2.1.4. СНиП 2.05.03-84

„СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы“ [67] hakkas kehtima 01.01.1986.

Suuremad muudatused võrreldes eelneva normiga:

- ära kadusid autokolonnid H-10 ja H-30;
- võeti kasutusele autokolonnid A-8 ja A-11 (ühiselt tähistatuna AK);
- võeti kasutusele tänapäevases mõistes kombinatsioonitegurite süsteem;
- jõuvankritel loobuti koormuse osavarutegurist, kuid hakati rakendama dünaamikategurit;
- muutusid koormuse osavarutegurid;
- muutusid kõnniteedele mõjuvad koormused.

СНиП 2.05.03-84 alusel jaotati liikluskoormused kolme gruppi:

- autokolonnid A-8 ja A-11²⁰;
- jõuvankrid НГ-60 ja НК-80;
- jalakäijad.

Autokolonnid A-8 (joonis 23) ja A-11 (joonis 24):

- kolonni pikkust ei piirata;
- kolonni pikitelg peab olema paralleelne silla pikiteljega;
- kolonnide asukoht peab tagama arvutatavate elementide kõige ebasoodsamad koormustulemid;
- kõrvutiolevate kolonnide min. vahekaugus ei tohi olla alla 3 m (mõõdetuna rataste pikitelgedest);
- kolonnide arv ei tohi ületada sõiduradade arvu;
- kolonnid paigutatakse sillatekile kahte moodi:
 - ohutusribale autokolonni ei rakendata (siis võrdub kolonnide maks. arv sõiduradade arvuga),
 - kui kolonn paigutatakse pörkepiirde lähedale, siis rakendatakse korraga kuni kahte kolonni;
- kui kolonne on rohkem kui üks, siis alates teisest kolonnist rakendatakse joonkoormusele vähendustegurit 0,6 (välja arvatud vanker);
- koormuse osavarutegur kandepiiriseisundis:
 - vankril, kui arvutatakse sillatekki: $\gamma = 1,50$,
 - vankril, kui arvutatakse muid sillakonstruktsioone: $\gamma = 1,50$, kui $\lambda = 0$ m ja $\gamma = 1,20$, kui $\lambda \geq 30$ m (vahepealsed väärtused interpoleeritakse),
 - joonkoormusel ja üheteljelisel koormusel: $\gamma = 1,20$;
- koormuse osavarutegur kasutuspiiriseisundis: $\gamma = 1,00$;
- koormuse dünaamikategur (rakendatakse ainult kandepiiriseisundis):
 - metallist tala- ja kaarsillad: $1+\mu = 1+15/(37,5+\lambda)$,
 - metallist ripp- ja vantsillad: $1+\mu = 1+50/(70+\lambda)$,
 - raudbetoonist tala- ja raamsillad ning kaarsildade võrelised kaarepealsed:
 $1+\mu = 1+0,0075/(45-\lambda)$, kusjuures $1+\mu \geq 1,00$,
 - raudbetoonist kaarsildade kaared ja võlvid võrelise kaarepealse korral:
 $1+\mu = 1+0,004/(70-\lambda)$, kusjuures $1+\mu \geq 1,00$,
 - puit-, kivi- ja betoonsillad: $1+\mu = 1,00$,
 - väsimusarvutustes kasutatakse vähendatud dünaamikategurit $1+2\mu/3$;

²⁰ Normis on kohati kasutatud ka tähiseid A8 ja A11.

- kombinatsioonitegur:
 - kui vertikaalne liikluskoormus on ainuke samaaegselt vaadeldav ajutine koormus, siis $\eta = 1,00$,
 - teistel juhtudel sõltub kombinatsioonitegur sellest, milliseid koormusi samaaegselt ühes koormuskombinatsioonis vaadeldakse, jäädes vahemikku $\eta = 0,25 \dots 1,00$.

Jõuvankrid HF-60 (joonis 26) ja HK-80 (joonis 27):

- sillale rakendatakse korraga ainult ühte jõuvankrit;
- jõuvanker võib paikneda sõiduteel meelevaldses asukohas, välja arvatud ohutusriba;
- jõuvankri pikitelg peab olema paralleelne silla pikiteljega;
- koormuse osavarutegur: $\gamma = 1,00$;
- koormuse dünaamikategur:
 - HF-60: $1+\mu = 1,10$,
 - HK-80: $1+\mu = 1,30$, kui $\lambda \leq 1,0$ m ja $1+\mu = 1,10$, kui $\lambda \geq 5,0$ m (vahepeal interpolateeritakse),
 - väsimusarvutustes kasutatakse vähendatud dünaamikategurit $1+2\mu/3$;
- kombinatsioonitegur:
 - kui liikluskoormus on ainuke samaaegselt vaadeldav ajutine koormus, siis $\eta = 1,00$,
 - teistel juhtudel sõltub kombinatsioonitegur sellest, milliseid koormusi samaaegselt ühes koormuskombinatsioonis vaadeldakse, jäädes vahemikku $\eta = 0,25 \dots 1,00$.

Jalakäijad:

- teesildade koormus jalakäijatest on lauskoormus $400-2\lambda$ kg/m² (kuid mitte alla 200 kg/m²) ning seda rakendatakse ainult kõnniteele;
- jalgteesildade lauskoormuseks võetakse 400 kg/m²;
- lisaks ühtlaselt jaotatud koormusele tuleb teostada katendi kontroll punktkoormusele 350 kg (linnasildadel 2000 kg);
- parapettidele tuleb rakendada vertikaalset ja horisontaalset:
 - joonkoormust 100 kg/m,
 - punktkoormust 130 kg;
- koormuse asetus peab tagama kõige ebasoodsamad koormustulemid;
- ilma kõnniteeta sildadele jalakäijate koormust ei rakendata;
- koormuse osavarutegur:
 - jalgteesildadel ja teesildade kõnniteedel (kui teisi liikluskoormusi samaaegselt ei rakendata): $\gamma = 1,40$,
 - teesildade kõnniteedel, kui samaaegselt rakendatakse ka muid liikluskoormusi: $\gamma = 1,20$,
 - parapetid: linnasildadel $\gamma = 1,40$ ja teistel $\gamma = 1,00$,
 - katendi punktkoormus: $\gamma = 1,00$;
- koormuse dünaamikategur: $1+\mu = 1,00$;
- kombinatsioonitegur:
 - kui vertikaalne liikluskoormus on ainuke samaaegselt vaadeldav ajutine koormus, siis $\eta = 1,00$,
 - teistel juhtudel sõltub kombinatsioonitegur sellest, milliseid koormusi samaaegselt ühes koormuskombinatsioonis vaadeldakse, jäädes vahemikku $\eta = 0,25 \dots 1,00$.

Liikluskoormuste kombineerimine:

- autokolonn(de)ga samaaegselt rakendatakse ka koormust jalakäijatest;
- jõuvankriga samaaegselt ühtegi teist liikluskoormust (ka jalakäijatest) ei rakendata;
- autokoloni ja jõuvankri omavaheline kombineerimine sõltub tee kategooriast ja on esitatud tabelis 25.

Tabel 25. Koormuste rakendamine sõltuvalt tee kategooriast [67]

Tee kategooria	Silla eripära	Autokolonn	Jõuvanker
I – III	Kõik	A-11	HK-80
IV-V	Pikad sillad (v.a puitsillad) ¹⁾	A-11	HK-80
	Ülejäänud	A-8	HГ-60
Märkused: 1) Põhjendatud juhtudel on lubatud ka pikad sillad projekteerida koormustele A-8 ja HГ-60.			

2.1.5. СНП 2.05.03-84*

„СНП 2.05.03-84* Мосты и трубы“ [68] kinnitati 26.11.1991 ja oli oma olemuselt eelmise väljaande korrigeeritud versioon. Kuigi muudatusi oli selles suhteliselt palju, siis liikluskoormuste osas oli neid üksikuid. Seetõttu siinkohal pikemat tervikülevaadet ei tehta, vaid tuuakse välja ainult tähtsamad muudatused ja põhiosa on võetav eelmisest jaotisest.

Suuremad muudatused võrreldes eelneva normiga:

- linnasildade kõnniteedele rakendatavat punktikoormust vähendati 2000 kg-lt 1000 kg-le;
- korrigeeriti autokoloni ja jõuvankri rakendamist erinevate tee kategooriate korral (tabel 26).

Tabel 26. Koormuste rakendamine sõltuvalt tee kategooriast [68]

Tee kategooria	Silla eripära	Autokolonn	Jõuvanker
I – IV	Kõik	A-11	HK-80
V	Kõik sillad (v.a puitsillad) ¹⁾	A-11	HK-80
	Puitsillad	A-8	HГ-60
Märkused: 1) Põhjendatud juhtudel on lubatud ka pikad sillad projekteerida koormustele A-8 ja HГ-60.			

Juriidiliselt ei ole seda normi kunagi Eestis kasutada lubatud. 01.01.1992 kehtima hakanud Ehitusministeeriumi määrus nr 1 „Normatiivdokumentide rakendamine ehitiste projekteerimisel“ [29] ütles selgelt, et kui vastavas valdkonnas puuduvad endise Eesti NSV projekteerimise normdokumendid või Eesti Vabariigi Ehitusministeeriumi poolt kehtestatud normdokumendid, siis tuleb rakendada kuni Eesti Vabariigi omade vastavate dokumentide kehtestamiseni NSVL-s 01.01.1991 seisuga kehtinud normdokumente. СНП 2.05.03-84* kinnitati aga 26.11.1991 ehk peaaegu aasta aega hiljem. Samuti viitas 01.01.2000 jõustunud teede- ja sideministri määrus nr 55 „Tee projekteerimise normid ja nõuded“ [30] just normile СНП 2.05.03-84, mis hakkas kehtima 01.01.1986. СНП 2.05.03-84* on lisatud siia loetellu seepärast, et ei saa välistada selle kasutamist perioodil 1992-2000.

2.2. Liikluskoormused ajavahemikus 2000 kuni tänapäev

Eesti taasiseseisvumisel tuli üle minna uutele normatiivdokumentidele ning neid muudatusi on käesolevas punktis täiendavalt selgitatud.

1991. aasta lõpul võeti vastu „Eesti Vabariigi maanteeeadus“ [26], kus detailseid nõudeid sildade liikluskoormuste suhtes ei esitatud. Seaduse § 19 (projekti- ja tehnoloogia nõuded) viitas, et maanteetarindite parameetrid, nõutavad omadused ja teetööde tehnoloogia kehtestatakse Eesti normidega ning teiste normatiivaktidega.

11.11.1991 andis Ehitusministeerium välja määruse nr 1 „Normatiivdokumentide rakendamine ehitiste projekteerimisel“ [29], mis hakkas kehtima järgmise aasta alguses. See sätestas, et

- 1) valdkondades, kus on olemas endise Eesti NSV projekteerimise normdokumendid või Eesti Vabariigi Ehitusministeeriumi poolt kehtestatud normdokumendid, rakendada projekteerimisel Eesti Vabariigi territooriumile neid dokumente;
- 2) valdkondades, kus p. 1 all nimetatud normdokumente pole, rakendada kuni Eesti Vabariigi omade vastavate dokumentide kehtestamiseni NSVL-s 01. jaanuarini 1991.a. seisuga kehtinud normdokumente ("Ehitusnorme ja -reegleid" (SNIP), "ehitusnorme" (SN), "instruktsioone", "juhendeid", "ehitusreegleid", "standardeid", "nõudeid" jne).

Seega tuli Eestis jätkata „СНП 2.05.03-84 Мосты и трубы“ [67] kasutamist, mis hakkas kehtima 01.01.1986. Eesti projekteerimisnormide (esialgu EPN-ENV ja seejärel EPN) väljatöötamist alustati 1992. aasta suvel ning vastav sildade liikluskoormustega seotud juhendmaterjal sai valmis 1998. aastal. Läks veel mõni aasta aega, enne kui 01.01.2000 jõustunud „Teeseaduse“ [27] alusel rakendus määrus „Tee projekteerimise normid ja nõuded“ [30] (vastu võetud 28.09.1999 teede- ja sideministri määrusega nr 55 ja jõustuma hakanud 01.01.2000). Selle määruse koosseisu kuulusid ka „Maantee projekteerimisnormid“²¹, kus oli juba selge viide Eesti projekteerimisnormide kasutamiseks (ja hilisemates redaktsioonides ka ülevõetud standardite EVS-EN kasutamiseks). Aastate jooksul omas see määrus mitmeid redaktsioone (tabel 27), kuni 01.07.2015 jõustus uus „Ehitusseadustik“ [28] ning kehtestati tänaseni kehtiv määrus „Tee projekteerimise normid“ [31] (vastu võetud 05.08.2015 majandus- ja taristuministri määrusega nr 106 ja jõustuma hakanud 10.08.2015).

Sildade liikluskoormuste osa võib alates 2000. aastast kokkuvõtlikult kirjeldada järgmiselt:

- 1) Määrus „Tee projekteerimise normid ja nõuded“ sisaldas viidet kasutada Eesti projekteerimisnorme EPN-ENV 1.3A [51] alates 01.01.2000 kuni redaktsioonini, mille kehtivuse lõpp oli 14.08.2014. Samas ilmus juba 29.05.2004 kehtima hakanud redaktsiooni selgitav punkt, et Maanteeamet ja teised tee omanikud võivad Maanteeameti nõusolekul kehtestada normides sätestatud nõuetest erinevaid nõudeid. Kuna sildade liikluskoormusi sisaldav ülevõetud standard EVS-EN 1991-2:2004+NA:2007 [41] selleks ajaks veel Eesti keelde tõlgitud ei olnud (samuti ei olnud standardil veel rahvuslikku lisa), siis oli ainuke võimalik alternatiiv ikkagi veel Eesti projekteerimisnormid.
- 2) Eestikeelne ülevõetud standard EVS-EN 1991-2:2004+NA:2007 jõustus sellekohase teate avaldamisel EVS Teataja 2007. aasta detsembrikuu numbris. Seega oli see daatum ka esimene tõsiseltvõetav võimalus vastavat standardit kasutama hakata.

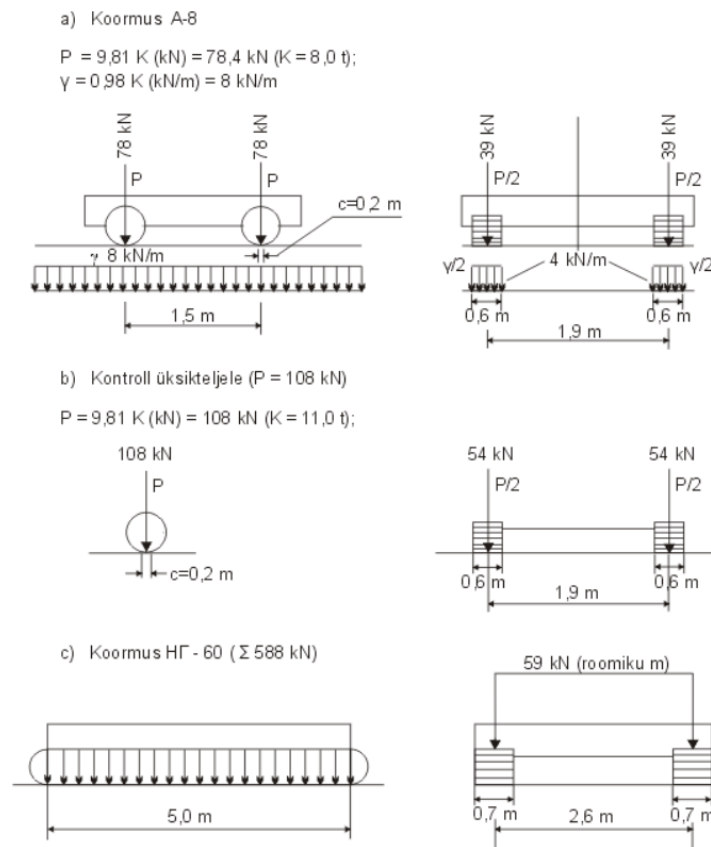
²¹ NB! Mitte segi ajada Eesti projekteerimisnormidega!

- 3) Maanteeamet on kahel korral peadirektori käskkirjaga täpsustanud riigiteedel asuvate sildade liikluskoormusi:
- 29.02.2008 käskkiri nr 55 „Riigimaanteedel asuvate sildade, viaduktide, truupide ja tunnelite projekteerimisnõuete täpsustamine“ [33],
 - 18.01.2018 käskkiri nr 1-2/18/018 „Riigiteedel asuvate sildade, viaduktide, truupide, tunnelite ja ökoduktide konstruktsioonidele mõjuvate liikluskoormuste täpsustamise juhised“ [34];
- 4) Tuleb eraldi mainida, et ka praegu on erandina lubatud olemasolevate sildade ja viaduktide remondi projektide koostamisel arvutada rajatise „vanadele“ koormustele A-11×1,5 ja HK-80×1,5 (põhimaanteedel) ning A-8 ja HΓ-60 (joonised 30...31). Antud koormusi on kirjeldatud juba varasemates jaotistes.

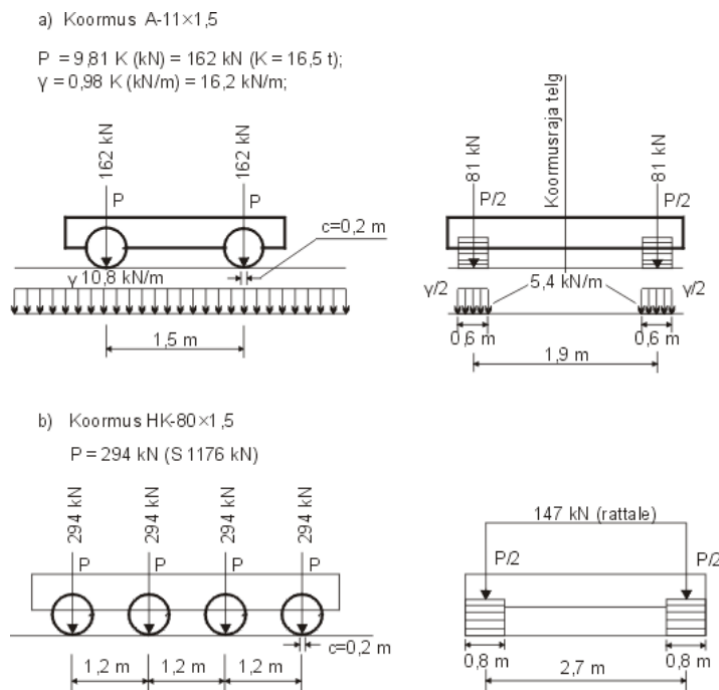
Tabel 27. Määruse „Tee projekteerimise normid ja nõuded“ kronoloogiline ajalugu

Määruse pealkiri	Määruse nr ja vastuvõtmise aeg	Avaldamismärge Riigi Teatajas	Redaktsiooni kehtivus
Tee projekteerimise normid ja nõuded	TSM ²⁾ määrus nr 55 (28.09.1999)	RTL 2000, 23, 303	01.01.2000-31.05.2002
Tee projekteerimise normid ja nõuded	TSM määrus nr 55 (28.09.1999)		01.06.2002-28.05.2004
Tee projekteerimise normid ja nõuded	TSM määrus nr 55 (28.09.1999)		29.05.2004-10.07.2011
Tee projekteerimise normid ja nõuded	TSM määrus nr 55 (28.09.1999)	RT I, 08.07.2011, 33	11.07.2011-14.06.2012
Tee projekteerimise normid ¹⁾	TSM määrus nr 55 (28.09.1999)	RT I, 08.06.2012, 4	15.06.2012-14.08.2014
Tee projekteerimise normid	TSM määrus nr 55 (28.09.1999)	RT I, 23.07.2014, 5	15.08.2014-30.06.2015
Tee projekteerimise normid	MTM ³⁾ määrus nr 106 (05.08.2015)	RT I, 07.08.2015, 14	10.08.2015-...
Märkused: 1) 2012. aastal muudeti määruse pealkirja, kuid number jäi samaks. 2) TSM – teede- ja sideminister. 3) MTM – majandus- ja taristuminister.			

Seega võib aastat 2000 lugeda tinglikult hetkeks, millal hakati kasutama nn uut alustel baseeruvaid sildade (liiklus)koormuseid. Perioodi sealt alates kuni tänapäevani iseloomustab Eesti projekteerimisnormide (EPN või EPN-ENV) ja Eesti standarditeks ülevõetud Euroopa standardite (EVS-EN) kasutamine. Nende kahe vahele jäi ka üks lühike periood, kus anti välja Eesti algupäraseid kandekonstruktsioonide projekteerimisega seotud standardeid (tähistega EVS), kuid sildade liikluskoormusi see ei puuduta. Rohkem infot viimase veerandsaja aasta juhendmaterjalide kujunemisest on võimalik lugeda allikatest [24] ja [25].



Joonis 30. Erandina lubatud vertikaalsete koormuste skeemid [\[31\]](#)



Joonis 31. Erandina lubatud vertikaalsete koormuste skeemid põhimaanteedel [\[31\]](#)

Eesti projekteerimisnormide (edaspidi: EPN) koostamist tervikuna alustati 1992. aasta suvel ning neid anti välja aastatel 1994 kuni 2004 ([tabel 28](#)). Kokku valmis 80 EPN-i. Oli plaanitud nii, et kuni EPN-ide valmimiseni jäävad kasutusele N.Liidu ehitusnormid ja neid võib paralleelselt EPN-idega kasutada 3 aasta jooksul pärast vastava EPN-i kehtestamist normi eelnõuna. Seejärel pidid ainukehtivaks jääma EPN-id. Selle protsessiga aga päris lõpule ei jõutud ja need vähesed EPN-id, mis said määrusega kehtestatud eelnormiks ja/või projekteerimisnormiks, on ministri määrustega hiljem ka kehtetuks tunnistatud. Kandekonstruktsioonide projekteerimisega seotud EPN-id on enamasti koostatud vastava eurokoodeksi (või selle eelnõu – siis on tähtsaks EPN-ENV) alusel.

Tänapäeval kasutatakse Eestis kandekonstruktsioonide projekteerimisel ülevõetud Euroopa standardeid EVS-EN, mida nimetatakse ka eurokoodeksiteks²². Selle standardiseeria üldtähis on EVS-EN 1990...1999 ([tabel 29](#)). Eurokoodeksite²³ eesmärk on ühtlustada Euroopa Liidu piires ehitiste projekteerimisele esitatavaid nõudeid. Selle tegevusprogrammi raames võeti eesmärgiks rajada ehitiste kandekonstruktsioonide projekteerimiseks ühtlustatud tehniliste reeglite süsteem, mis esialgu oleks alternatiiviks liikmesriikide rahvuslikele reeglitele, hiljem aga asendaks need. Ühtsete nõuete väljatöötamisega alustati juba möödunud sajandi 70.ndatel aastatel. 80.ndate lõpus valmis esimene komplekt eurokoodekseid – need avaldati Euroopa eelnormi eelnõudena (prENV). Aastatel 1992...1998 jõuti kokku 62 eelstandardi (ENV) väljaandmiseni (mille põhjal töötati välja varem kirjeldatud EPN-id). Alates 1998. aastast on toimunud üleminek eelstandarditelt standarditele (EN). Valdav osa eurokoodekseid on nüüdseks juba ka Eesti keelde tõlgitud (välja on töötatud ka rahvuslikud lisad) ja võetud kasutusele Eesti standarditena (EVS-EN).

²² Inglise keeles: *Eurocode*.

²³ Eurokoodeksite kohta võib saada lisainfot näiteks järgmiselt veebilehelt: <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/>.

Tabel 28. Eesti projekteerimisnormide täielik koosseis

Üld-tähis	Sisu ja alajaotused
EPN-1	Projekteerimise alused. Koormused ja mõjud 1.1 Projekteerimise alused. 1.1.2 Nõuete täidetuse tõendamine. 1.2.1 Ehituskonstruksioonide koormused. Sissehutus. 1.2.3 Omakaalukoormused. 1.2.4 Kasuskoormused. 1.2.5 Lumekoormused. 1.2.6 Tuulekoormused. 1.2.7 Tulekahjukoormused. 1.3 Sildade liikluskoormused. 1.4 Puiste- ja vedelikumahutite koormused. 1.5 Kraanade ja muude mehhanismide põhjustatud koormused.
EPN-2	Raudbetoonkonstruktsioonide projekteerimine 2.1.1 Üldeeskirjad ja hoonekonstruktsioonide projekteerimiseeskirjad. 2.1.2 Tulepüüvisus. 2.1.3 Monteeritavate raudbetoonelementide ja -konstruktsioonide projekteerimise üldeeskirjad. 2.1.6 (Armeerimata) betoonkonstruktsioonide projekteerimise üldeeskirjad. 2.3 Raudbetoonvundamendid.
EPN-3	Teraskonstruksioonide projekteerimine 3.1.1 Hoonete teraskonstruksioonide projekteerimiseeskirjad. 3.1.2 Tulepüüvisus. 3.1.3 Külmpainutatud profiilid ja profiilplekk. 3.1.4 Roostevabast terasest konstruktsioonide projekteerimine. 3.1.5 Lisanõuded põiksuunas koormamata tasapinnaliste plaatkonstruktsioonide projekteerimiseks. 3.3.1 Tornid ja mastid. 3.4.1 Puistemahutid. 3.4.2 Vedelikumahutid. 3.6 Kraanade kandekonstruktsioonid. 3T.1 Üldreeglid ja reeglid hoonekonstruktsioonidele. 3T.2 Lisanõuded külmpainutatud profiilidele ja profiilplekile. 3T.3 Lisanõuded kõrgtugevast terasest konstruktsioonidele. 3T.4 Lisanõuded toruprofiilidest konstruktsioonidele.
EPN-4	Terasest ja betoonist komposiitkonstruktsioonide projekteerimine 4.1.1 Hoonete komposiitkonstruktsioonide projekteerimise üldeeskirjad. 4.1.2 Tulepüüvisus.
EPN-5	Puitkonstruktsioonide projekteerimine 5.1.1 Üldised juhendid ja hoonete juhendid. 5.1.2 Tulepüüvisus. 5.2 Puitsillad.
EPN-6	Kivikonstruktsioonid projekteerimine 6.1.1 Üldeeskirjad ja hoonekonstruktsioonide projekteerimise eeskirjad. 6.3 Kivikonstruktsioonide lihtsustatud arvutused.
EPN-7	Geotehniline projekteerimine 7.1 Üldeeskirjad. 7.2 Geotehnilise projekteerimise laboriteimid. 7.3 Geotehnilise projekteerimise välikatsed.
EPN-10	Ehitise tuleohutus /.../ kokku 14 alajaotust
EPN-11	Piirdetarindid /.../ kokku 2 alajaotust
EPN-12	Ehitusfüüsikaline projekteerimine /.../ kokku 3 alajaotust
EPN-13	Nõuded puuetega inimeste liikumise tagamiseks /.../ kokku 1 alajaotust
EPN-14	Ruumidele ja nende osadele esitatavad üldnõuded /.../ kokku 1 alajaotust
EPN-15	Ehitiste tööiga 15.1 Ehitiste tööiga.
EPN-16	Ehitiste heliisolatsiooninõuded /.../ kokku 1 alajaotust
EPN-17	Linnatänavate projekteerimine 17.1 Linnaliiklus. 17.2 Liikluse planeerimine. 17.3 Lähtealused tänavate projekteerimiseks. 17.4 Linnatänavad ja -teed. 17.5 Ristmike projekteerimine. 17.6 Jalgteed. Rahustatud liiklus. Haljastus. 17.7 Väljakud. Parklad. Terminaalid. 17.8 Tehnovõrgud ja -rajatised.
EPN-18	Hoone kütte, veevärgi, kanalisatsiooni ja ventilatsiooni projekteerimine /.../ kokku 10 alajaotust

Tabel 29. Eurokoodeksite täielik koosseis

Üld-tähis	Sisu ja alajaotused
EVS-EN 1990	Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused
EVS-EN 1991	Ehituskonstruksioonide koormused 1991-1-1 Üldkoormused. Mahukaalud, omakaalud, hoonete kasuskoormused. 1991-1-2 Üldkoormused. Tulekahjukoormused. 1991-1-3 Üldkoormused. Lumekoormused. 1991-1-4 Üldkoormused. Tuulekoormused. 1991-1-5 Üldkoormused. Temperatuurikoormused. 1991-1-6 Üldkoormused. Ehitusaegsed koormused. 1991-1-7 Üldkoormused. Erakorralised koormused. 1991-2 Sildade liikluskoormused. 1991-3 Kraana- ja masinakoormused. 1991-4 Puiste ja vedelikumahutite koormused.
EVS-EN 1992	Betoonkonstruktsioonide projekteerimine 1992-1-1 Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. 1992-1-2 Üldeeskirjad. Tulepüüvisus. 1992-2 Betoonsillad. Arvutus- ja detailiseerimisreeglid. 1992-3 Tammid ja mahutid.
EVS-EN 1993	Teraskonstruksioonide projekteerimine 1993-1-1 Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. 1993-1-2 Üldeeskirjad. Tulepüüvisusarvutus. 1993-1-3 Üldreeglid. Täiendavad reeglid külmtalutavate osade ja teraspleki jaoks. 1993-1-4 Üldreeglid. Täiendavad reeglid roostevaba terase jaoks. 1993-1-5 Lamedad konstruktsioonilelemendid. 1993-1-6 Koorikkonstruktsioonide tugevus ja stabiilsus. 1993-1-7 Põikkoormusega plaatkonstruktsioonide projekteerimine. 1993-1-8 Liidete projekteerimine. 1993-1-9 Väsimus. 1993-1-10 Materjali sitkus ja paksusesuunalised omadused. 1993-1-11 Tõmbele töötavate elementidega konstruktsioonide projekteerimine. 1993-1-12 Täiendavad reeglid standardi EN 1993 laiendamiseks kuni teraseni S 700. 1993-2 Terasillad. 1993-3-1 Tornid, mastid ja korstnad. Tornid ja mastid. 1993-3-2 Tornid, mastid ja korstnad. Korstnad. 1993-4-1 Puistemahutid. 1993-4-2 Vedelikumahutid. 1993-4-3 Torujuhtmed. 1993-5 Toestamine. 1993-6 Kraanade tugikonstruktsioonid.
EVS-EN 1994	Terasest ja betoonist komposiitkonstruktsioonide projekteerimine 1994-1-1 Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. 1994-1-2 Üldeeskirjad. Tulepüüvisusarvutus. 1994-2 Üldreeglid ja reeglid sildade projekteerimiseks.
EVS-EN 1995	Puitkonstruktsioonide projekteerimine 1995-1-1 Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. 1995-1-2 Üldist. Tulepüüvisusarvutus. 1995-2 Sillad.
EVS-EN 1996	Kivikonstruktsioonide projekteerimine 1996-1-1 Üldreeglid sarrustatud ja sarrustamata kivikonstruktsioonide projekteerimiseks. 1996-1-2 Üldreeglid. Tulepüüvisusarvutus. 1996-2 Projekteerimiskaalutused, materjalide valimine ja müüritööde teostamine. 1996-3 Lihtsustatud arvutusmeetodid sarrustamata kivikonstruktsioonide projekteerimiseks.
EVS-EN 1997	Geotehniline projekteerimine 1997-1 Üldeeskirjad. 1997-2 Laboriteimidel põhinev projekteerimine.
EVS-EN 1998	Ehitiste projekteerimine maavärinat taluvaks 1998-1 Üldreeglid, maavärinakoormused ja reeglid hoonete projekteerimiseks. 1998-2 Sillad. 1998-3 Hoonete olukorra hindamine ja taastamistööd. 1998-4 Puistemahutid, vedelikumahutid ja torujuhtmed. 1998-5 Vundamendid, tammid ja geotehnilised aspektid. 1998-6 Tornid, mastid ja korstnad.
EVS-EN 1999	Alumiiniumkonstruktsioonide projekteerimine 1999-1-1 Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. 1999-1-2 Tulepüüvisusarvutus. 1999-1-3 Väsimustundlikud konstruktsioonid. 1999-1-4 Külmaalsitused lehtmaterjal. 1999-1-5 Koorikkonstruktsioonid.

2.2.1. EPN-ENV 1.3A

„EPN-ENV 1.3A Projekteerimise alused. Koormused. Osa 3 Sildade liikluskoormused. Üldeeskirjad, maantee- ja jalgteesildade liikluskoormused“ [51] anti välja märtsis 1998 ning oli koostatud Euroopa eelnormi ENV 1991-3:1995 [121] alusel. EPN-ENV 1.3A tuli vaadelda koos Maanteeameti peadirektori 29.02.2008 käskkirjaga nr 55 „Riigimaanteedel asuvate sildade, viaduktide, truupide ja tunnelite projekteerimisnõuete täpsustamine“ [33].

EPN-ENV 1.3A liikluskoormused on praktiliselt samad, mis hetkel kehtivas standardis EVS-EN 1991-2:2004+NA:2007 (vt järgmist jaotist) ja seetõttu neid siinkohal eraldi kirjeldatud ei ole. Tähtsaim erinevus puudutab 3. koormusmodeli eriveokeid, mille puhul eeldati, et need liiguvad väikese kiirusega (alla 5 km/h) ja seepärast dünaamikategurit ei rakendatud.

2.2.2. EVS-EN 1991-2:2004+NA:2007

„EVS-EN 1991-2:2004+NA:2007 Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 2: Sildade liikluskoormused“ [41] ilmus eesti keeles (koos rahvusliku lisaga) 2007. aasta lõpus ning on Euroopa standardi EN 1991-2:2003 [122] ingliskeelse teksti identne tõlge eesti keelde. Perioodil 28.11.2007-26.06.2009 kandis antud standard tähist EVS-EN 1991-2:2007, kuid muudeti seejärel eurokoodeksite tähistite ühtlustamise käigus ümber (standardi sisu seejuures ei muutunud). 2011. aastal ilmus standardile ka parandus EVS-EN 1991-2:2004/AC:2010 [42]. Praegusel hetkel tuleb seda eurokoodeksit rakendada koos Maanteeameti peadirektori 18.01.2018 käskkirjaga nr 1-2/18/018 „Riigiteedel asuvate sildade, viaduktide, truupide, tunnelite ja ökoduktide konstruktsioonidele mõjuvate liikluskoormuste täpsustamise juhise“ [34].

Standardiga EVS-EN 1991-2:2004+NA:2007 tuleb samaaegselt vaadelda järgmiseid standardeid:

- EVS-EN 1990:2002+NA:2002 Eurokoodeks: Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused [36];
- EVS-EN 1990:2002/A1:2006+NA:2009 Eurokoodeks: Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused. Muudatus A1. Lisa A2: Rakendamine sildade puhul [37].

EVS-EN 1991-2:2004+NA:2007 alusel jaotatakse liikluskoormused järgmiselt²⁴:

- 1. koormusmodel (LM1): koondatud ja ühtlaselt jaotatud koormused, mis kirjeldavad veo- ja sõiduautode liiklusest tekkivate mõjude enamikku (see mudel on mõeldud nii üldisteks kui ka kohalikeks kontrollarvutusteks);
- 2. koormusmodel (LM2): rattarehvide kontaktpinnale rakendatud üheteljeline koormus, mis imiteerib normaalliikluse dünaamilist mõju lühikestele konstruktsioonelementidele (see mudel on mõeldud ainult kohalikeks kontrollarvutusteks);
- 3. koormusmodel (LM3): eriveokitele vastav teljekoormuste kogum (see mudel on mõeldud kasutamiseks ainult tellija nõudel nii üldiseks kui ka kohalikuks kontrolliks);
- 4. koormusmodel (LM4): tunglemskoormus rahvahulgast (seda mudelit kasutatakse ainult tellija nõudel üldisteks kontrollarvutusteks);
- jalakäijad.

²⁴ Lisaks on standardis kirjeldatud väsimuskoormusmodelid, mida siinkohal detailsemalt ei vaadelda.

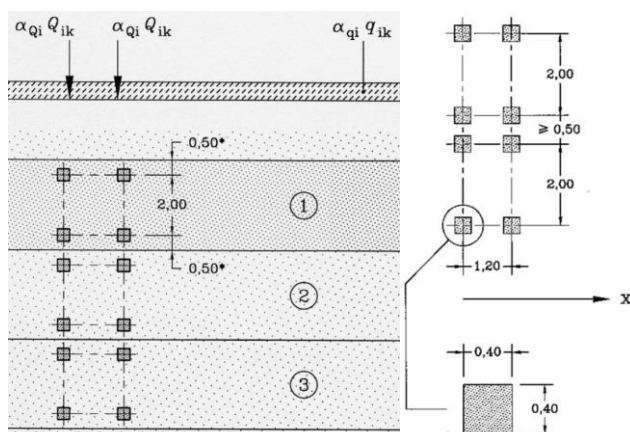
Kasutatakse lepperadade süsteemi, kus silla sõidutee gabariit w on jagatud arvutuslikeks radadeks laiussega w_i (tabel 30). Lepperadade arv ja asetus peab tagama koormusmodeli kõige ebasoodsama mõju kontrollitavale konstruktsioonielemendile ning radade numeratsioon oleneb ebasoodsa mõju suurusest. Lepperadadest üle jäävat ala nimetatakse jääkalaks.

Tabel 30. Lepperadade arv ja laius [41]

Sõidutee laius [m]	Lepperadade arv [tk]	Lepperaja laius [m]	Jääkala laius [m]
$w < 5,4$	$n_l = 1$	3	$w-3$
$5,4 \leq w < 6,0$	$n_l = 2$	$w/2$	0
$6,0 \leq w$	$n_l = \text{int}(w/3)$	3	$w-3n_l$

1. koormusmodel (LM1):

- LM1 koosneb kahest alamsüsteemist, milleks on kaheteljeline koondatud koormus ja ühtlaselt jaotatud koormus (joonis 32 ja tabel 31);
- kaheteljelisel koondatud koormusel (tandem – TS²⁵) on ühe telje koormuseks väärtus $\alpha_Q Q_k$;
- ühele lepperajale tuleks asetada ainult üks tandem ja see peaks paiknema kõige ebasoodsamas asukohas;
- iga tandemi ratta kontaktpind on ruut küljega 0,40 m;
- kui rakendatakse mitut kõrvutipaiknevat tandemit, siis vahemaa rattatelgedel vahel on $\geq 0,5$ m;
- üldisel kontrollarvutusel võib eeldada, et tandemid liiguvad piki lepperadade telgjoont;
- ühtlaselt jaotatud koormuse (hajukoormus – UDL²⁶) intensiivsus ruutmeetri kohta on $\alpha_q q_k$;
- hajukoormust tuleks rakendada ainult mõjupiirkonna ebasoodsamatel aladel;
- LM1 rakendatakse igale lepperajale ja jääkaladele, kusjuures i -nda lepperaja koormuse suurus on $\alpha_{Qi} Q_{ik}$ ja $\alpha_{qi} q_{ik}$ ning jääkaladel $\alpha_{qr} q_{rk}$;
- koormuse dünaamiline mõju (dünaamikategur) on suurustes Q_{ik} ja q_{ik} arvesse võetud;
- kasutada tuleb järgmisi täpsustavate tegurite väärtusi:
 - põhimaanteedel $\alpha_{Qi} = \alpha_{qi} = \alpha_{qri} = 1,0$,
 - tugimaanteedel $\alpha_{Q1} = 0,8$, $\alpha_{Q2} = \alpha_{Q3} = \alpha_{qi} = \alpha_{qri} = 1,0$,
 - kõrvalmaanteedel $\alpha_{Q1} = 0,8$, $\alpha_{q1} = 0,8$ ja $\alpha_{Qi} = \alpha_{qi} = \alpha_{qri} = 1,0$ kui $i \geq 2$.



Joonis 32. LM1 paigutus [41]

Tabel 31. LM1 arvvaartused [41]

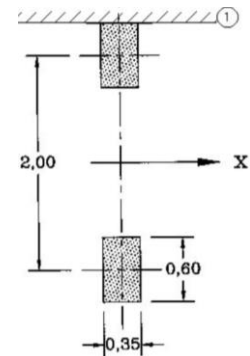
Asukoht	Tandemi teljekoormus Q_{ik} [kN]	Hajukoormus q_{ik} (või q_{rk}) [kN/m ²]
Esimene rada	300	9,0
Teine rada	200	2,5
Kolmas rada	100	2,5
Teised rajad	0	2,5
Jääkala	0	2,5

²⁵ TS – Tandem System.

²⁶ UDL – Uniformly Distributed Load.

2. koormusmodel (LM2):

- LM2 ([joonis 33](#)) koosneb üheteljelisest koormusest $\beta_Q Q_{ak}$ (ajutises arvutusolukorras $0,8\beta_Q Q_{ak}$, kus Q_{ak} on võrdne 400 kN (koos dünaamikateguriiga);
- mudel võib asetseda suvalises kohas sõiduteel;
- vajaduse korral võib arvestada ka ainult ühe ratta koormusega $200\beta_Q$ (kN);
- kui teisiti pole määratud, siis $\beta_Q = \alpha_{Q1}$;
- iga ratta kontaktpind on ristkülik $0,35 \times 0,60$ m.



Joonis 33. LM2 [\[41\]](#)

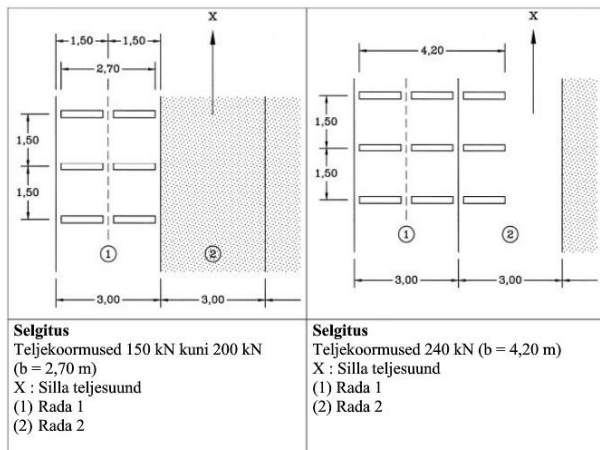
3. koormusmodel (LM3):

- kui tellija nõuab ühe või enama standarderveoki LM3 koormuse arvestamist, siis tuleks koormuste suurused ja mõõtmed valida [tabelist 32](#);
- iga standardmodel, mis koosneb teljekoormustest kuni 200 kN (kaasa arvatud), on rakendatav ainult ühele lepperajale (vaadeldakse kui rada nr 1) ja suurema teljekoormuse korral kahele kõrvuti seisvale rajale (vaadeldakse kui rada nr 1 ja nr 2), kusjuures rajad asetatakse sõiduteele nii ebasoodsalt kui võimalik, kuid sõidutee laiusesse ei haarata peatusrada ja ohutus- ning märkeriba ([joonis 34](#));
- olenevalt käsitletavatest mudelitest võib eeldada, et eriveokid liiguvad aeglaselt (mitte üle 5 km/h) või normaalkiirusel (70 km/h):
 - kui eriveokid liiguvad aeglaselt, siis dünaamikategurit ei rakendata,
 - kui veokid liiguvad normaalkiirusel, siis tuleb kasutada ka dünaamikategurit $\varphi = 1,40 - L/500$, kusjuures $\varphi \geq 1,00$;
- riigiteedel tuleb eriveokite liikumiskiirused valida järgmiselt:
 - erisõiduk kogumassiga ≤ 1200 kN liigub sillal normaalkiirusega (arvestada dünaamikateguriiga),
 - erisõiduk kogumassiga > 1200 kN liigub sillal aeglase liikumiskiirusega (dünaamikategurit arvutustes ei arvestata);
- kui eriveok liigub aeglaselt, siis tuleks igale lepperajale ja jääkalale rakendada tavaväärtustega koormusmodel 1 ([joonis 35](#))²⁷;
- eriveoki laius on 3,00 m (kui teljekoormus on 150 kN või 200 kN) või 4,50 m (kui teljekoormus on 240 kN);
- elementide kohalikeks kontrollarvutusteks jaguneb teljekoormus kas kahele ristkülikule mõõtudega $1,20 \times 0,15$ m (kui teljekoormus on 150 kN või 200 kN) või kolmele ristkülikule $1,20 \times 0,15$ m (kui teljekoormus on 240 kN);
- riigiteedel rakendatakse eriveoki kasutamisel järgmisi nõudeid (alates 18.01.2018):
 - põhimaanteedel – kogumass 3600 kN, teljekoormuseks 200 kN ja 240 kN,
 - tugimaanteedel – kogumass 2400 kN, teljekoormuseks 200 kN ja 240 kN,
 - kõrvalmaanteedel – kogumass 1200 kN, teljekoormuseks 150 kN ja 200 kN;
- ajavahemikus 29.02.2008 kuni 17.01.2018 olid riigiteedele rakendatavad eriveokid järgmised:
 - põhimaanteedel – kogumass 3600 kN,
 - tugimaanteedel – kogumass 2400 kN,
 - kõrvalmaanteedel – kogumass 1200 kN.

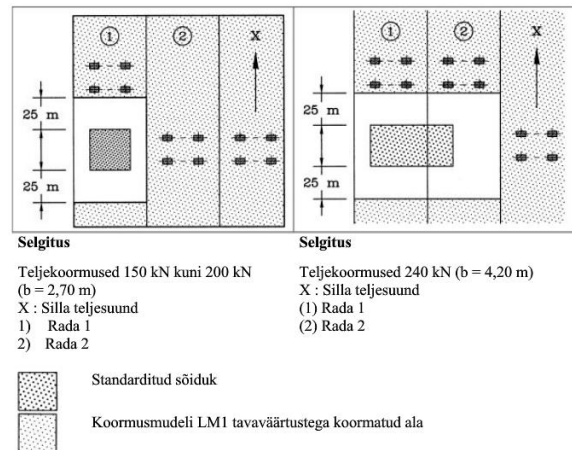
²⁷ NB! Maanteeameti juhend [\[34\]](#) annab selle nõude osas vastupidise tingimuse, olles standardiga vastuolus!

Tabel 32. Eriveokite klassid [41]

Kogu- mass [kN]	Koosseis	Tähistus	Eriveokite kirjeldus	
			Teljekoormused [kN]	Telgede vahekaugused [m]
600	4 telge á 150 kN	600/150	4×150	3×1,5
900	6 telge á 150 kN	900/150	6×150	5×1,5
1200	8 telge á 150 kN	1200/150	8×150	7×1,5
	6 telge á 200 kN	1200/200	6×200	5×1,5
1500	10 telge á 150 kN	1500/150	10×150	9×1,5
	7 telge á 200 kN + 1 telg á 100 kN	1500/200	1×100+7×200	7×1,5
1800	12 telge á 150 kN	1800/150	12×150	11×1,5
	9 telge á 200 kN	1800/200	9×200	8×1,5
2400	12 telge á 200 kN	2400/200	12×200	11×1,5
	10 telge á 240 kN	2400/240	10×240	9×1,5
	6 telge á 200 kN (teljevahe 12 m) + 6 telge á 200 kN	2400/200/200	6×200+6×200	5×1,5+12,0+5×1,5
3000	15 telge á 200 kN	3000/200	15×200	14×1,5
	12 telge á 240 kN + 1 telg á 120 kN	3000/240	1×120+12×240	12×1,5
	8 telge á 200 kN (teljevahe 12 m) + 7 telge á 200 kN	3000/200/200	8×200+7×200	7×1,5+12,0+6×1,5
3600	18 telge á 200 kN	3600/200	18×200	17×1,5
	15 telge á 240 kN	3600/240	15×240	14×1,5
	9 telge á 200 kN (teljevahe 12 m) + 9 telge á 200 kN	3600/200/200	9×200+9×200	8×1,5+12,0+8×1,5 ²⁸



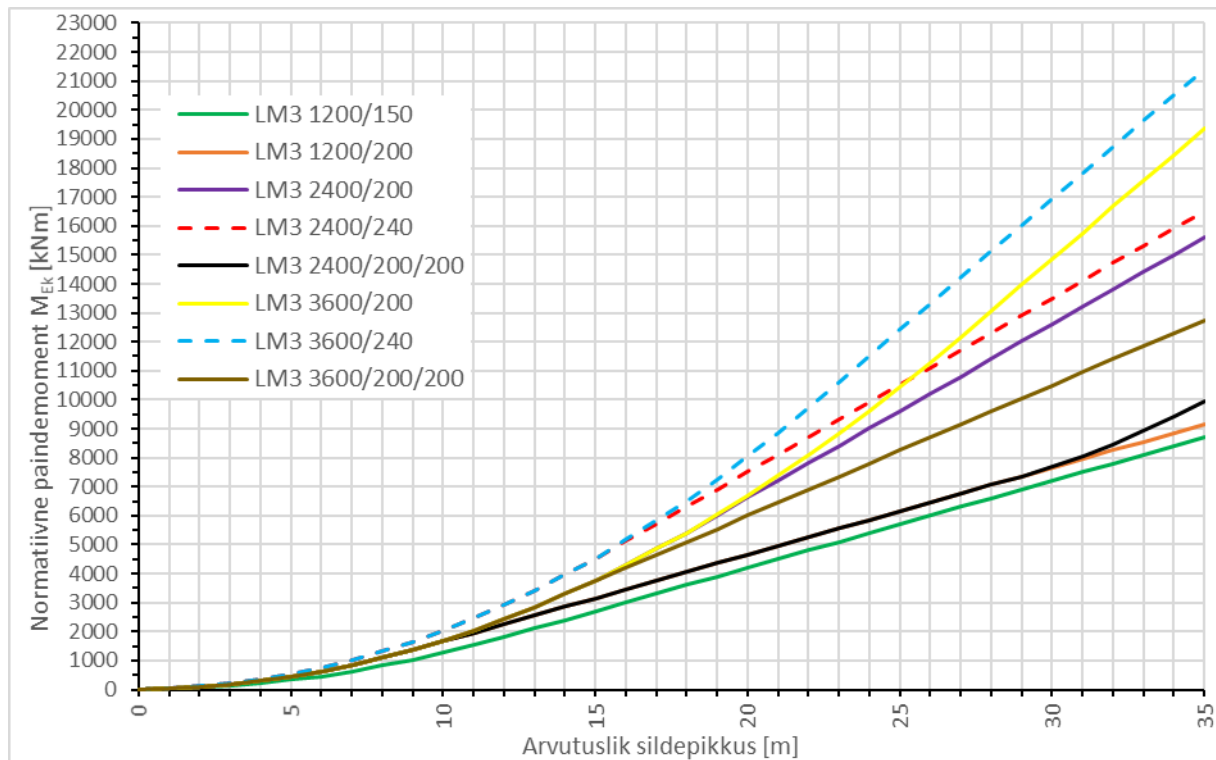
Joonis 34. LM3 rakendamine lepperadadele [41]



Joonis 35. LM1 ja LM3 üheaegne toimimine [41]

Abistamaks projekteerijat esmase valiku tegemisel, on [joonisel 36](#) näidatud LM3 eriveokitest tekkivad normatiivsed peakandjate paindemomendid, mis on määratud peakandjate samaaegselt esinevate suurimate paindemomentide summana (ehk koormuse jagunemist erinevate peakandjate vahel ei ole arvesse võetud). Graafikute koostamisel on eeldatud, et korraga paikneb sillal ainult üks eriveok, mis on silla pikisuunas paigutatud paindemomendi suhtes kõige ebasoodsamasse asukohta.

²⁸ Standardis [41] esineb tabelis A.2 viga, kuna seal on koormuse tähise 3600/200/200 juures kirjeldatud veokit konfiguratsiooniga 8×240+7×240 kN ja 7×1,5+12,0+6×1,5 m. Õige tuleb ilmselt lugeda tabelis A.1 toodud infot 9×200+9×200 kN ja 8×1,5+12,0+8×1,5 m, millest siinkohal on ka lähtutud.



Joonis 36. Ühest LM3 eriveokist tekkivad normatiivsed paindemomendid lihttala erinevate sildepikkuste korral (punktiiriga on näidatud eriveokid, mille laius on suurem)

4. koormusmudel (LM4):

- LM4 tunglemiskoormuseks võetakse ühtlane hajukoormus (koos dünaamikateguriga) 5 kN/m^2 ;
- tunglemiskoormust rakendatakse sillateki vastavates kohtades ja vajadusel ka eraldusribale;
- tunglemiskoormus on mõeldud ainult ajutises arvutusolukorras tehtavate üldiste kontrollarvutuste jaoks ning selle rakendamise üle otsustab tellija.

Jalakäijad:

- maanteeildadel:
 - LM 4 korral on jalgteed hajukoormus 5 kN/m^2 ,
 - kui jalgteekoormusi vaadeldakse koos LM1-ga, siis on hajukoormuseks 3 kN/m^2 ;
- jalgteesildadel kasutatakse kolme üksteist vastastikku välistavat mudelit:
 - hajukoormus $q_{fk} = 2,0 + 120/(L+30)$, kusjuures $2,5 \leq q_{fk} \leq 5,0 \text{ kN/m}^2$,
 - koondatud koormus 10 kN ,
 - kaheteljeline 120 kN kogumassiga teenindusveok (täpsemad parameetrid on toodud standardis EVS-EN 1991-2);
- igal üksikjuhul tuleks vertikaalkoormuse mudel rakendada koormatavale pinnale selliselt, et tekiks kõige ebasoodsam mõju;
- kui pole teisiti määratud, siis on käsipuule mõjuva joonkoormuse suurus $1,0 \text{ kN/m}$ (seda koormust käsitletakse käsipuul ülemisele servale rakendatud kas vertikaalse või horisontaalse muutuva koormusena).

Horisontaalkoormused:

- pidurdus- ja kiirendusjõud:
 - pidurdus- ja kiirendusjõudu Q_{lk} tuleb käsitleda pikisuunalise jõuna, mis mõjub sõidutee pinnal,
 - seda jõudu tuleb rakendada suvalise lepperaja telgjoonele (kui ekstsentrilisuse mõju arvestamine pole vajalik, siis võib selle jõu rakendada piki sõidutee telgjoont ning ühtlaselt jaotatuna üle koormatud pikkuse),
 - Q_{lk} arvutatakse LM1 kaudu järgmise valemiga: $Q_{lk} = 0,6\alpha_{Q1}(2Q_{1k}) + 0,1\alpha_{q1}q_{1k}w_1L$,
 - Q_{lk} peab jääma vahemikku $180\alpha_{Q1} \leq Q_{lk} \leq 900$ (kN),
 - deformatsioonivuukidele mõjuv jõud on $Q_{lk} = 0,6\alpha_{Q1}Q_{1k}$.
- tsentrifugaaljõud:
 - tsentrifugaaljõud Q_{tk} mõjub sõidutee pealispinnal plaanikõveruse raadiuse (r) suunas;
 - kui $r < 200$ m, siis $Q_{tk} = 0,2Q_v$ kus Q_v on LM1 tandemi vertikaalsete koondatud koormuste kogukaal, st $\Sigma\alpha_{Qi}(2Q_{ik})$,
 - kui $200 \leq r \leq 1500$ m, siis $Q_{tk} = 40Q_v/r$,
 - kui $r > 1500$ m, siis $Q_{tk} = 0$,
 - vajadusel tuleks koos tsentrifugaaljõuga arvestada ka külgsidurdamisjõudu Q_{trk} , mille suurus on 25% pikisuunalisest pidurdusjõust Q_{lk} .

Koormusmudeleid LM1, LM2, LM3, LM4 ja horisontaalkoormusi ning jalgteede koormusi tuleb rakendada [tabelis 33](#) esitatud koosmõjuvate gruppidega. Igat sellist vastastikku välistavat gruppi tuleks vaadelda kui defineeritud normsuurust kombinatsioonides koos mitte-liikluskooormustega.

Tabel 33. Liikluskooormuse gruppide arvestamine [\[41\]](#)

Koormus- grupid	Sõidutee						Jalgtee
	Vertikaaljõud ¹⁾				Horisontaaljõud		Ühtlaselt jaotunud koormus
	LM1	LM2	LM3	LM4	Pidurdus- ja kiirendusjõud	Tsentrifugaal- ja pikijõud	
gr1a	Norm- väärtus ²⁾						Kombin.- väärtus ³⁾
gr1b		Norm- väärtus					
gr2	Tava- väärtus				Norm- väärtus	Norm- väärtus	
gr3 ⁴⁾							Norm- väärtus ⁵⁾
gr4				Norm- väärtus			Norm- väärtus
gr5	Vt EVS-EN 1991-2 lisa A		Norm- väärtus				
Märkused: 1) Lühendid: LM1 – 1. koormusmudel; LM2 – 2. koormusmudel; LM3 – 3. koormusmudel; LM4 – 4. koormusmudel. 2) Värvide selgitus: roheline – koormuse domineeriv komponent. 3) Eestis kasutatakse väärtust 3 kN/m ² . 4) Seda gruppi ei kasutata, kui on arvestatud grupiga gr4. 5) Kui ühe jalgteed poolt avaldatav mõju on ebasoodsam kahe koormatud jalgteed mõjust, tuleks koormatuna käsitleda ainult seda jalgteed.							

Koormuse esindusväärtuseks loetakse koormuse väärtust, millega kontrollitakse piirseisundit. Esindusväärtuseks võib olla koormuse normväärtus (Q_k) või kaasväärtus (ψQ_k).

EVS-EN 1990:2002+NA:2002 jagab muutuvkoormuste kaasväärtused järgmiselt:

- kombinatsiooniväärtus: $\psi_0 Q_k$;
- tavaväärtus: $\psi_1 Q_k$;
- tõenäoline väärtus: $\psi_2 Q_k$.

Liikluskoormuste osavarutegurid (γ_Q) on enamustel juhtudel järgmised:

- kui standardis toodud liikluskoormus on ebasoodne, siis $\gamma_Q = 1,35$;
- kui standardis toodud liikluskoormus on soodne, siis $\gamma_Q = 1,00$;
- teiste liikluskoormuste jaoks $\gamma_Q = 1,50$.

Liikluskoormuste kombinatsioonitegurid (ψ) on alati ühest väiksemad ja on leitavad [tabelist 34](#).

Tabel 34. Maanteeildade liikluskoormuste kombinatsioonitegurid [37]

Koormusgrupp		Kombinatsioonitegurid		
		ψ_0	ψ_1	ψ_2
gr1a	Tandem TS	0,75	0,75	0
	Hajukoormus UDL	0,40	0,40	0
	Jalgtee koormus	0,40	0,40	0
gr1b		0	0,75	0
gr2		0	0	0
gr3		0	0,40	0
gr4		0	-	0
gr5		0	-	0

3. SILDADE KOORMAMINE RASKEVEOKITEGA

3.1. Üldosa

3.1.1. Protsessi lühikirjeldus

Kogu katsetamisega seotud protsess oli jaotatud järgmistesse etappidesse:

1) Sobivate sildade väljavalimine

Maanteeameti ja Tallinna Tehnikakõrgkooli vahel sõlmitud lepingu tehnilise kirjelduse lisas 1 on kirjeldatud seitset katsetatavate sildade gruppi, kus on ära toodud ka näidissillad. Edasi analüüsiti, kas näidissildadel esineb takistusi, mis raskendavad koormustesti läbiviimist. Kuna katsetamise ajaks tuleb sillad sulgeda, siis eelkõige vaadeldi takistustena suurt liiklussagedust (sh ühistranspordi olemasolu) ja liiga pikka ajutist ümbersõitu. Samuti ei sobi katsetamiseks need sillad, mille all on sügav veekogu (kiire vool) või kus veekogu põhil on ebastabiilne (mudane), sest need asjaolud võivad arvestatavalt segada mõõteseadmete tööd. Koostöös Maanteeametiga vaadeldi ka teisi tehnilistele tingimustele vastavaid silde ning valiti välja need, mille korral takistatakse kõige vähem igapäevast liiklust ning mõõteseadmete töö on kõige vähem häiritud. Seejärel toimus sildade kohapealne eelülevaatus sobivuse kontrollimiseks. Lõplikult välja valitud sillad ([jaotis 3.1.2](#)) kooskõlastati Maanteeametiga.

2) Sildade geodeetiline mõõdistamine

Mõõdistamine toimus laserskaneerimise teel, mille tagajärjel koostati igale sillale kolmemõõtmeline mudel.

3) Tehnilise seisukorra hindamine

Sildade tehnilise seisukorra hindamise käigus tuvastati peamised kahjustused ning kontrolliti tegeliku olukorra vastavust projektandmetele. Lisaks sildade visuaalsele ülevaatuseteostati mittepurustavate meetoditega mõõtetööd 5 mõõtepunktis, mis paiknesid reeglina katsetatavas sildeavas. Mõõtetööde tulemusena anti hinnang betooni survetugevusele, kaitsekihi paksusele, karboniseerumise sügavusele ning terasarmatuuri korrosioonitasemele ja tõmbetugevusele. Seisukorra hinnangud on esitatud eraldi lisadena.

4) Kontrollarvutuste teostamine

Arvutuste teostamisel kontrolliti silde kande- ja kasutuspiiriseisundis lähtuvalt eurokoodeksitest [\[36\]](#), [\[37\]](#), [\[38\]](#), [\[39\]](#), [\[40\]](#), [\[41\]](#), [\[42\]](#), [\[43\]](#) ja [\[44\]](#). Sisejõudude ja deformatsioonide leidmiseks koostati sildadele kolmemõõtmeline arvutusmudel tarkvaraga [Autodesk Robot Structural Analysis Professional \(2019\)](#). Seejuures teostati arvutused kahes etapis, kus esimeses lähtuti projektijärgsetest andmetest (materjalide tugevusklassid jne) ning teises tegelikult mõõdetud parameetritest, mille tulemusena võeti arvesse nii materjalide tegelikke tugevusomadusi kui ka kohapeal mõõdetud geomeetrisi parameetreid (neist tähtsaim on tegelik sildepikkus). Samuti korrigeeriti hiljem arvutusmudelites veokite parameetreid, kuna täpsed teljekoormused ja telgede vahekaugused mõõdeti vahetult enne katsetamist. Kontrollarvutused on esitatud eraldi lisadena.

5) Katsetamise programmi koostamine

Enne iga katsetamise läbiviimist koostati vastav tegevusprogramm, kus kirjeldati ajagraafikut, kasutatavaid koormuseid, oodatavaid tulemusi, mõõtemetoodikat, ajutist liikluskorraldust vajalikke protseduure ja tööohutust. Katsetamise programmid kooskõlastati Maanteeametiga ja on esitatud eraldi lisadena.

6) Katsetuse läbiviimine

Sildade katsetamine viidi läbi vastavalt programmile. Läbiviidud katsed kujutasid endast lisatava koormuse katseid, sest kasutati koormusi, mis ei ületanud tegelikke ja arvutuslikke liikluskoormusi ning seetõttu ei põhjustanud sillakonstruktsioonidele vigastusi või ehitise purunemist. Katsetamisel kasutatud veokeid on kirjeldatud [jaotises 3.1.3](#). Katsetamisel kasutati nii seisvaid kui ka liikuvaid koormuseid. Kõiki katsetusi filmiti täismahus kokku nelja kaameraga. Kokkuvõtvad katsetulemused on esitatud [jaotises 3.2](#) ning fotod katsetamisprotsessist [lisas 2](#).

7) Tulemuste analüüs

Kõige lõpuks koostati katsetulemuste analüüs, mis on kokkuvõtvalt koondatud aruande [4. peatükki](#). Selle käigus koostati igale sillale kolmemõõtmeline lõplike elementide meetodil baseeruv korrigeeritud arvutusmudel, mis kalibreeriti vastavalt tegelikele katsetulemustele. Peatükis on analüüsitud erinevatel ajaperioodidel kasutatud projektkoormuseid ning võrreldud neid 52 tonniste veokitega. Lisaks on välja töötatud kriteeriumid, mille alusel ei tohiks 52 t raskeveokeid sillale lubada ning hinnatud investeeringuvajadusi, mis vastavad sillavõrgu puudused likvideeriks.

Igal sillal viidi veokitega läbi 2 eri tüüpi katset:

1) Seisva koormusega

Selle katse eesmärgiks oli jälgida, kuidas käitub sild pikaajalises koormusolukorras. Katse käigus mõõdeti talade läbipaindeid. Vahetult peale koormuse peale asetamist jälgiti näitude muutusi orienteeruvalt poole tunni jooksul ning kui siirded enam ei kasvanud, siis koormus eemaldati. Sama protseduuri korraldi peale koormuse eemaldamist ning lõpuks fikseeriti jäävdeformatsioonid. Veok paiknes sillal katsejuhi poolt määratud asukohas ning iga ettenähtud veoki tüübiga teostati üks seisva koormuse katse. Iga sellise katse terviktsükkel kestis orienteeruvalt ühe tunni. Veokite paigutus koormamise ajal oli valitud selliselt, et peatalades tekiksid maksimaalsed läbipainded. Seisva koormuse korral oli mõõtmise etappe 5 ning neid on kirjeldatud [tabelis 35](#). Primaarseteks mõõteseadmeteks olid potentsiomeetrilised siirdeandurid, millega mõõdeti katsetatava sildeava iga tala (plaadi/paneeli) keskkoha alumise serva vertikaalset siiret (iga 10 sekundi tagant). Kontrollmõõtmised teostati nivelliiriga (juhuks, kui tehnilistel või muudel põhjustel oleks siirdeanduritega mõõtmine ebaõnnestunud). Silla tervikkonstruktsiooni võimaliku kujumuutuse fikseerimiseks teostati erinevates etappides ka laserskaneerimine. Mõõteseadmete kirjeldus on esitatud [jaotises 3.1.4](#).

2) Liikuva koormusega

Veok ületas silda kiirusel 2...5 km/h katsejuhi poolt määratud trajektooriga (veoki asukoht silla põiklõikes ühtis veoki asukohaga seisval koormusel) ning iga ettenähtud veoki tüübiga teostati kaks katset. Eesmärgiks oli uurida talastiku käitumist võimalikult erinevates koormusolukordades ehk veoki erinevate asukohtade korral. Liikuva koormusega teostatud katsed andsid lisainfot silla staatikalise arvutusskeemi kohta (nt seda, kas monteeritavad lihttalad töötavad tänu sillateki plaadile osaliselt jätkuvtaladena või mitte). Katsetamise käigus ei määratud konstruktsiooni või selle elementide omavõnkesagedusi ning vertikaal- ja horisontaalkiirendusi. Liikuva koormuse korral salvestati näidud ainult siirdeanduritega (iga 1 sekundi tagant) ning talade siirdeid mõõdeti sildeava keskkohas (analoogselt staatilise koormusega). Analüüsis on kasutatud veokite keskmist liikumiskiirust. Veoki positsioneerimiseks sillal kasutati sillale kantud markeeringute ja videopildi abi ning tulemus kanti stopperi abil aegreale (antud meetodi täpsuseks saab lugeda suurusjärku 1 sekund, mida võib siirdeandurite mõõtesagedust arvesse võttes lugeda piisavaks).

Katseandmete väga suure mahu tõttu on tulemused edastatud graafiliselt ([jaotises 3.2](#)).

Tabel 35. Mõõtmise etapid seisva koormuse korral

Etapi nr	Etapi lühikirjeldus	Etapis kasutatud mõõteseadmed
1	Algseis ehk koormamata olukord	Siirdeandur, laserskanner, nivelliir
2	Olukord vahetult peale koormuse rakendumist	Siirdeandur
3	Koormatud olukord, mis kestab niikaua, kuni 5 minuti möödudes jääb näidu muutus alla 5%	Siirdeandur (lugemid salvestatakse iga 10 sekundi möödudes), laserskanner (ainult 3. etapi lõppnäit), nivelliir (ainult 3. etapi lõppnäit)
4	Olukord vahetult peale koormuse eemaldamist	Siirdeandur
5	Lõppseis, mis kestab niikaua, kuni 5 minuti möödudes jääb näidu muutus alla 5% (maks. 15 min)	Siirdeandur, laserskanner (ainult 5. etapi lõppnäit), nivelliir (ainult 5. etapi lõppnäit)

Lisaks Tallinna Tehnikakõrgkoolile ja Maanteeametile olid protsessi kaasatud:

- [Stricto Project OÜ](#) (A. Funk ja T. Liigmann) – sildade kontrollarvutused;
- [Warren Safety OÜ](#) (S. Viin ja P. Proses) – katsetamisaegne ajutine liikluskorraldus;
- [VikingModum OÜ](#) (K. Nõmmemees, A. Orastu, V. Rabin, A. Lindne) – katsetamisel kasutatud veokid;
- [Kolmestar OÜ](#) (R. Metsalu, I. Luuk) – katsetamisel kasutatud veokid;
- [Ithal-Kraanad AS](#) (A. Themas, K. Eier) – katsetamisel kasutatud kraanad;
- [AS TREV-2 Grupp](#) (P. Toomik) – katsetamisel kasutatud liiv;
- [Tariston AS](#) (K. Kiiman) – katsetamisel kasutatud liiv;
- [Riigimetsa Majandamise Keskus](#) (R. Orgla, R. Jürgenson) – veokite logistika;
- [Autoettevõtete Liit](#) (V. Tori) – konsultatsioonid;
- [E&M Engineering Solutions OÜ](#) (E. Peekker) – konsultatsioonid;
- [Eesti Metsa- ja Puidutööstuse Liit](#) (H. Välja, L. Pall) – konsultatsioonid.

Sildade katsetustöödest võtsid osa:

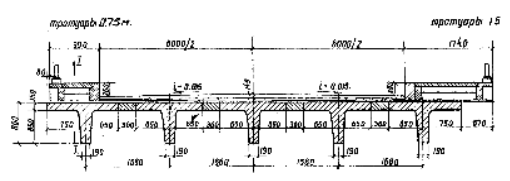
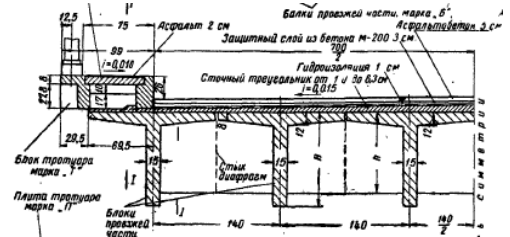
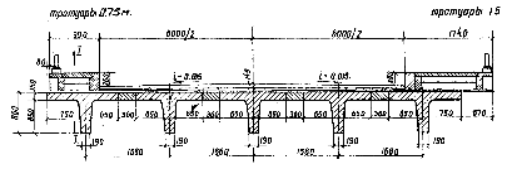
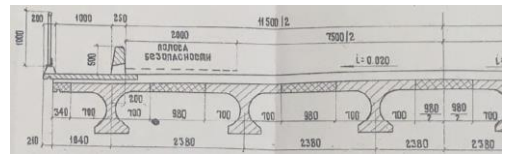
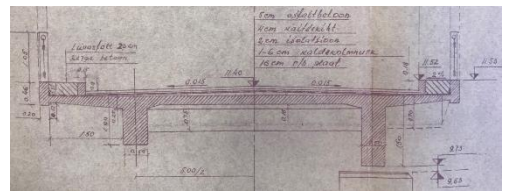
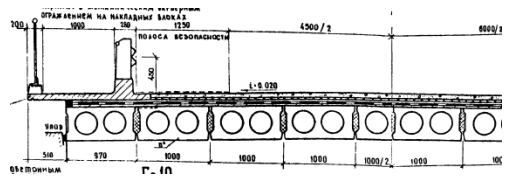
- Martti Kiisa (TTK professor);
- Karin Lellep (TTK lektor);
- Tarvo Mill (TTK professor);
- Sander Sein (TTK nooremteadur);
- Ando Pärtel (TTK laboriinsener);
- Teet Kokk (TTK üliõpilane);
- Ranno Rannamäe (TTK üliõpilane);
- Vaido Vahter (TTK üliõpilane);
- Kerdo Kütt (TTK üliõpilane);
- episoodiliselt osalesid katsetustel veel 11 TTK üliõpilast (K. Nõomaa, M. Brona, A. Taimsaare, J.-A. Lampmann, M.-E. Lille, T. Kask, K. Metsaots, J. Aasamägi, S. Jagnitš, R. Vahter, H. Keskrand).

Parema võrdlusefekti saamiseks on kõikide sildade peatükid üles ehitatud sarnaselt ja võimalusel on andmed koondatud tabelitesse või joonistele. **Kuna informatsiooni on katsetatavate sildade suure arvu tõttu väga palju, siis on aruande põhiosas esitatud need kokkuvõtlikul kujul ning detailsem ülevaade on koondatud [lisadesse](#)** (sildade kirjeldused, tehnilise seisukorra hinnangud, katsetamise programmid ja arvutused).

3.1.2. Katsetatud sillad

Vastavalt Maanteeameti lähteülesandele grupeeriti sillad [tabeli 36](#) kohaselt. Kõik vaadeldavad sillad on ehitatud nõukogude perioodil vastavate tüüpkataloogide alusel ja iseloomustavad ilmekalt suurt osa Eesti sildade olemist. Katsetatavad sillad on koondatud [tabelisse 37](#) ja illustreeritud [fotodel 5...32](#).

Tabel 36. Uuritavad sillagrupid

Grupi number	Grupi lühikirjeldus	Katsetamiseks välja valitud sillad	Selgitav joonis
Grupp 1	Diafragmadeta lihttalad (tüüpkataloog 56 lisa), koormusmudel HГ-60	Poaka sild	
Grupp 2	Diafragmadega lihttalad (tüüpkataloog 56), koormusmudel HГ-60	Piimetsa sild Türi-Alliku sild	
Grupp 3	Lihttalad (tüüpkataloog 56, 56 lisa või 167), koormusmudel HK-80	Rohe sild Vaida III sild Lungu sild	
Grupp 4	Eelpingestatud talad, koormusmudel HK-80	Jõgisoo I sild Jõgisoo II sild (keskmise ava)	
Grupp 5	Konsoolidega lihttalad, koormusmudel HГ-60	Maetsma sild Piibe sild	
Grupp 6	Õõnespaneelid/plaadid (avapikkusega üle 10 m), koormusmudel HГ-60 või HK-80	Sandra sild Jõgisoo II sild (äärmise ava)	
Grupp 7	Õõnespaneelid/plaadid (avapikkusega alla 10 m), koormusmudel HГ-60 või HK-80	Valgejõe sild Vodja sild	

Tabel 37. Katsetatud sillad

Silla nimi	Silla nr	Ehitus-aasta	Silla kogu-pikkus [m]	Avade arv [tk]	Katsetatava sildeava arv. pikkus [m]	Normatiivne kandevõime	Grupi nr	Katsetamise kuupäev (kinnitatud ¹⁾)
Poaka sild	252	1965	40,0	3	11,1	H-13/HГ-60	Grupp 1	18.09.2018 (17.09.2018)
Piiometsa sild	235	1963	17,4	2	8,4	H-13/HГ-60	Grupp 2	25.09.2018 (21.09.2018)
Rohe sild	503	1969	37,0	3	11,1	H-18/HK-80	Grupp 3	02.10.2018 (27.09.2018)
Jõgisoo I sild	14	1983	60,3	3	23,4	H-30/HK-80	Grupp 4	09.10.2018 (04.10.2018)
Maetsma sild	422	1959	32,2	3	17,9	H-10/HГ-60	Grupp 5	16.10.2018 (15.10.2018)
Sandra sild	640	1983	36,1	3	11,4	H-30/HK-80	Grupp 6	30.10.2018 (25.10.2018)
Valgejõe sild	171	1964	12,4	2	6,0	H-18/HK-80	Grupp 7	23.10.2018 (21.10.2018)
Lungu sild	306	1969	16,5	1	13,5	H-30/HK-80	Grupp 3	07.05.2019 (03.05.2019)
Türi-Alliku sild	231	1963	35,7	2	13,7	H-13/HГ-60	Grupp 2	14.05.2019 (10.05.2019)
Vaida III sild	85	1958	45,3	3	11,5	H-18/HK-80	Grupp 3	23.04.2019 (19.04.2019)
Jõgisoo II sild (keskmise ava)	19	1982	66,6	3	23,4	H-30/HK-80	Grupp 4	04.06.2019 (01.06.2019)
Piibe sild	173	1962	30,4	3	16,8	H-13/HГ-60	Grupp 5	21.05.2019 (20.05.2019)
Jõgisoo II sild (äärmine ava)	19	1982	66,6	3	17,4	H-30/HK-80	Grupp 6	16.04.2019 (15.04.2019)
Vodja sild	241	1966	10,5	1	5,7	H-18/HK-80	Grupp 7	30.04.2019 (29.04.2019)
Märkused: 1) Sulgudes on toodud kuupäevad, millal Maanteeamet kinnitas katsetamise programmid.								

Katsetatud sildade üldandmed ja tähtsamad kujujoonised on toodud [lisas 1](#). Täpsemat informatsiooni sildade kohta (armeerimisjoonised jne) võib leida käesoleva aruande lisadest, mis käsitlevad tehnilise seisukorra hinnanguid (lisad A-1, B-1, C-1 jne).



Foto 5. Poaka sild



Foto 6. Poaka sild



Foto 7. Piiometsa sild



Foto 8. Piiometsa sild



Foto 9. Rohe sild



Foto 10. Rohe sild



Foto 11. Jõgisoo I sild



Foto 12. Jõgisoo I sild



Foto 13. Maetsma sild



Foto 14. Maetsma sild



Foto 15. Sandra sild



Foto 16. Sandra sild



Foto 17. Valgejõe sild



Foto 18. Valgejõe sild



Foto 19. Lungu sild



Foto 20. Lungu sild



Foto 21. Türi-Alliku sild



Foto 22. Türi-Alliku sild



Foto 23. Vaida III sild



Foto 24. Vaida III sild



Foto 25. Jõgisoo II sild – keskmine ava



Foto 26. Jõgisoo II sild – keskmine ava



Foto 27. Piibe sild



Foto 28. Piibe sild



Foto 29. Jõgisoo II sild – äärmine ava



Foto 30. Jõgisoo II sild – äärmine ava



Foto 31. Vodja sild

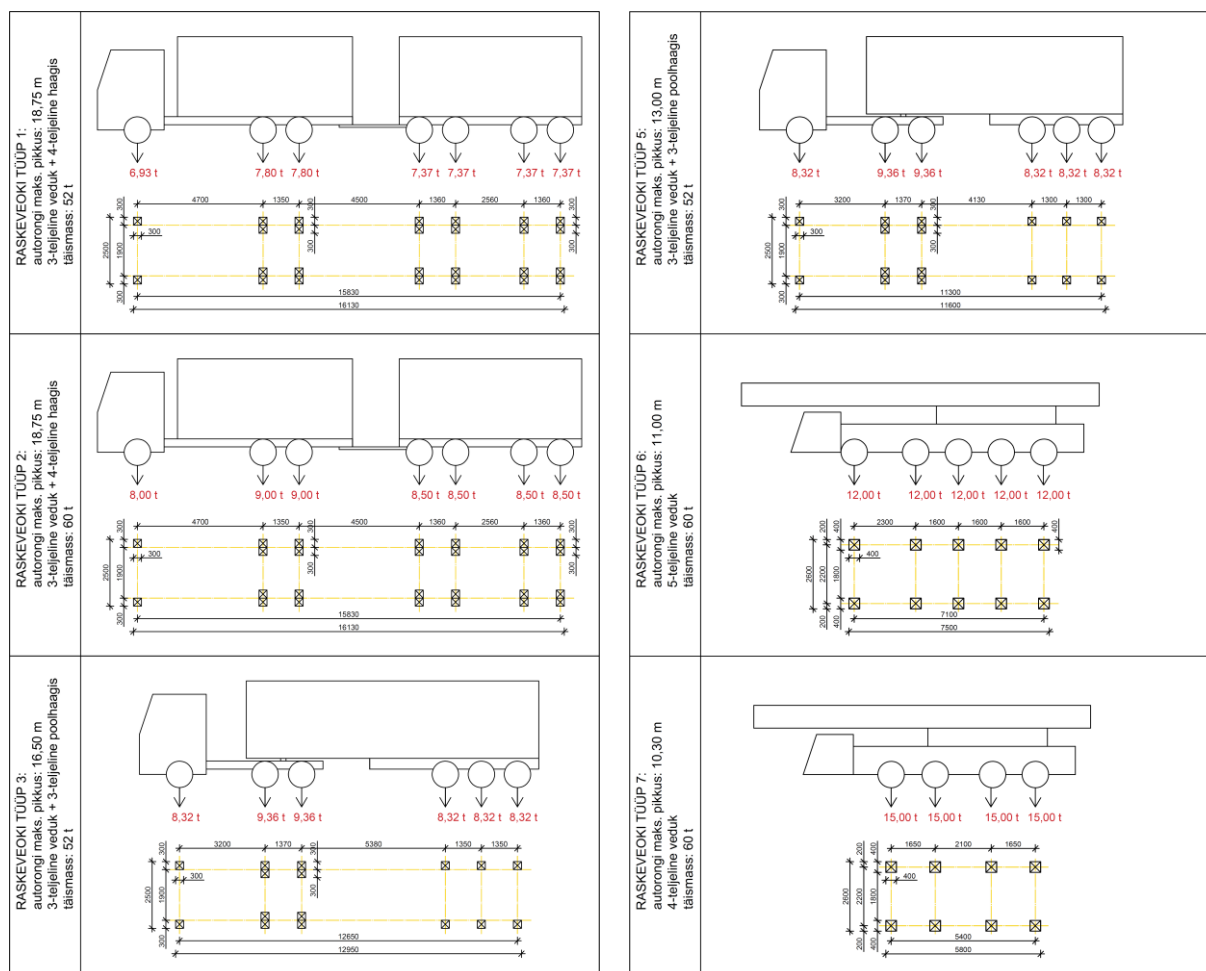


Foto 32. Vodja sild

3.1.3. Kasutatud raskeveokid

Katsetamisel kasutati kokku kuute erinevat 52- ja 60-tonnist raskeveokit. Joonisel 37 ja tabelis 38 on kujutatud veoki tüüpide orienteeruvad parameetrid, millega teostati silla proovikoormamisele eelnenud kandevõime kontrollarvutused (nn eelkontroll). Katsetamise käigus tagati veokite vajalik konfiguratsioon, telgede arv ja minimaalne nõutav täismass. Veokeid võib grupeerida järgmiselt:

- 1) **2018 sügisel** katsetati sildu metsaveokitega. Kõiki neid sildu (7 tk) katsetati 52-tonnise autorongiga, mis koosnes 3-teljelisest vedukist ja 3-teljelisest poolhaagisest (veoki tüüp 3). Kahte silda koormati täiendavalt ka pikemate autorongidega (3-teljeline veduk + 4-teljeline haagis), millest üks kaalus 52 t ja teine 60 t (vastavalt tüübid 1 ja 2). Esialgu oli planeeritud ka 44 t veoki kasutamine (tüüp 4), kuid Maanteeametiga kooskõlastatult sellest töö käigus loobuti ja asendati 52 t veokiga. Nõutava täismassi saavutamiseks kasutati ümarpalki.
- 2) **2019 kevadel** otsustati kasutada veelgi lühemaid veokeid, et suurendada valimit. Põhiliseks kasutatud veokiks kõigi 7 silla puhul oli 52-tonnine 3-teljeline veduk koos 3-teljelise poolhaagisega (veoki tüüp 5). Nõutava täismassi saavutamiseks kasutati liiva. Lisaks katsetati ühte silda 5-teljelise ja ühte 4-teljelise kraanaga (vastavalt tüüp 6 ja tüüp 7), kusjuures mõlemad kraanad kaalusid 60 t. Ajaliselt kõige viimasel katsetatud sillal (Jõgisoo II keskmine ava) rakendati koormusena lisaks üksikkoormustele ka tüüpe 5 ja 7 samaaegselt.



Joonis 37. Raskeveokite tüübid koos orienteeruvate parameetritega

Tabel 38. Uuringus kasutatud raskeveokite tüübid

Raskeveoki tüüp	Foto veokist	Veoki lühikirjeldus	Katsetatud sillad
Tüüp 1		Autorongi maks. pikkus: 18,75 m 3-teljeline veduk + 4-teljeline haagis Täismass: 52 t	Poaka sild Piiometsa sild
Tüüp 2		Autorongi maks. pikkus: 18,75 m 3-teljeline veduk + 4-teljeline haagis Täismass: 60 t	Poaka sild Piiometsa sild
Tüüp 3		Autorongi maks. pikkus: 16,50 m 3-teljeline veduk + 3-teljeline poolhaagis Täismass: 52 t	Poaka sild Piiometsa sild Rohe sild Jõgisoo I sild Maetsma sild Sandra sild Valgejõe sild
Tüüp 5		Autorongi maks. pikkus: 13,00 m 3-teljeline veduk + 3-teljeline poolhaagis Täismass: 52 t	Lungu sild Türi-Alliku sild Vaida III sild Jõgisoo II sild (keskmise ava) Piibe sild Jõgisoo II sild (äärmise ava) Vodja sild
Tüüp 6		Autorongi maks. pikkus: 11,00 m 5-teljeline veduk Täismass: 60 t	Türi-Alliku sild
Tüüp 7		Autorongi maks. pikkus: 10,30 m 4-teljeline veduk Täismass: 60 t	Jõgisoo II sild (keskmise ava)

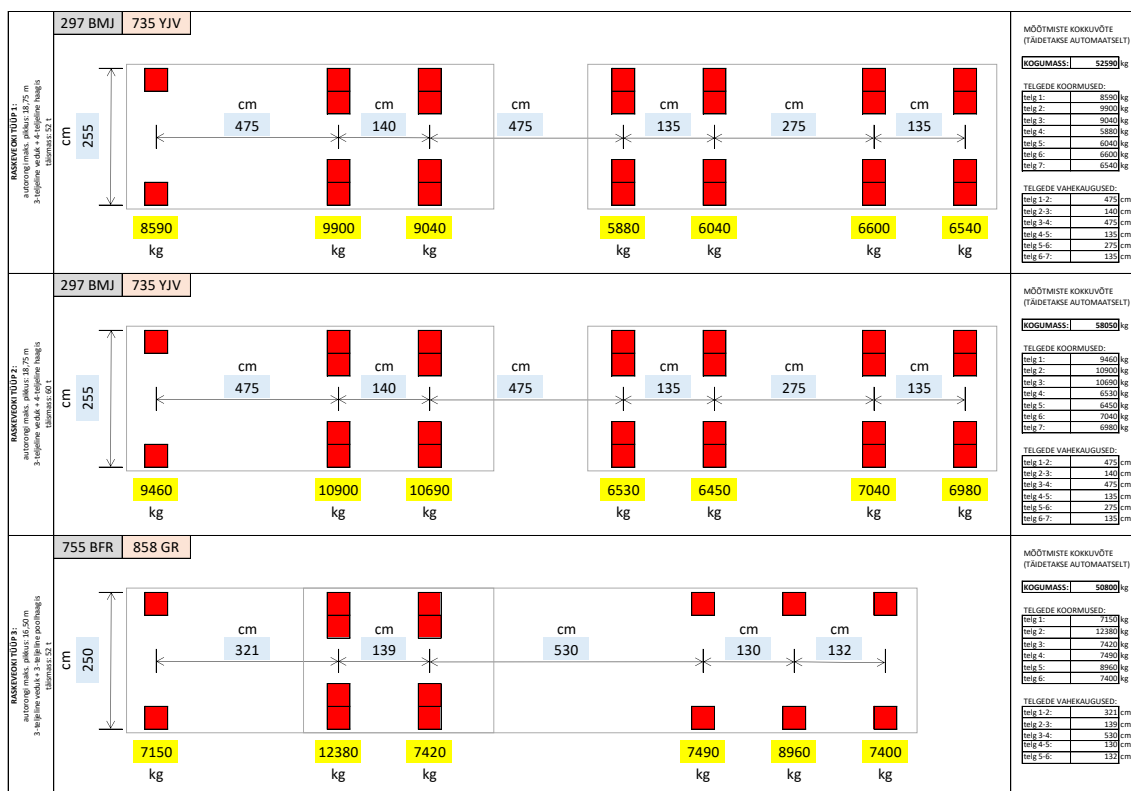
Kui silla kandevõime ja ohutus olid tagatud, siis suurendati katse käigus Maanteeametiga kooskõlastatult mõnevõrra ka veokite massi (tabel 39). Veokite täpsemad parameetrid (telgede koormused, teljevahed jt mõõdud) mõõdeti kohapeal (joonised 38...51) ning arvutusmudeleid korrigeeriti nendest lähtuvalt.

Tabel 39. Katsetamisel kasutatud veokite tegelikud massid ja teljekoormused

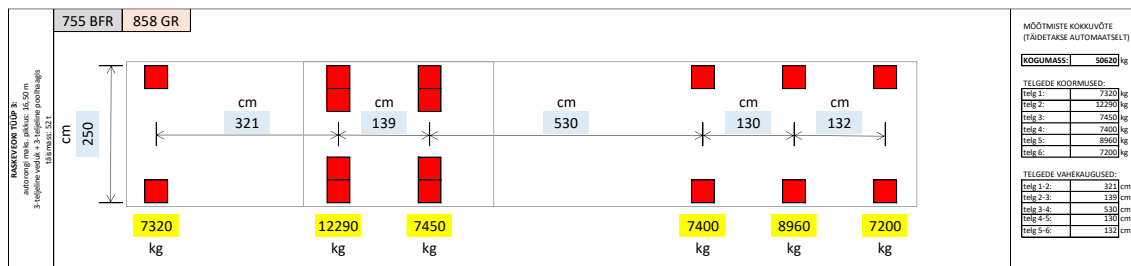
Sild	Raskeveoki tüüp	Veoki tegelik mass [kg]	Telgede tegelikud koormused [kg]						
			1. telg	2. telg	3. telg	4. telg	5. telg	6. telg	7. telg
Poaka sild	Tüüp 1	58 980	8 150	9 950	10 250	6 700	7 620	8 310	8 000
	Tüüp 2	68 050	8 620	12 240	11 910	7 740	8 750	9 750	9 040
	Tüüp 3	58 490	7 230	14 580	9 370	8 580	10 320	8 410	-
Piiometsa sild	Tüüp 1	52 590	8 590	9 900	9 040	5 880	6 040	6 600	6 540
	Tüüp 2	58 050	9 460	10 900	10 690	6 530	6 450	7 040	6 980
	Tüüp 3	50 800	7 150	12 380	7 420	7 490	8 960	7 400	-
Rohe sild	Tüüp 3	50 620	7 320	12 290	7 450	7 400	8 960	7 200	-
Jõgisoo I sild	Tüüp 3	62 180	7 430	13 100	7 650	10 750	12 830	10 420	-
Maetsma sild	Tüüp 3	58 770	7 360	13 720	8 290	9 350	11 070	8 980	-
Sandra sild	Tüüp 3	55 160	6 730	13 070	7 430	8 830	10 560	8 540	-
Valgejõe sild	Tüüp 3	60 970	7 450	12 390	7 590	10 460	12 630	10 450	-
Lungu sild	Tüüp 5	53 470	6 520	9 330	5 800	10 700	10 570	10 550	-
Türi-Alliku sild	Tüüp 5	55 450	6 050	10 760	6 660	10 660	11 240	10 080	-
	Tüüp 6	63 980	10 870	11 340	14 300	13 900	13 570	-	-
Vaida III sild	Tüüp 5	51 810	7 990	11 730	7 580	8 320	7 940	8 250	-
Jõgisoo II sild (keskmise ava)	Tüüp 5	53 010	7 590	10 640	6 770	9 360	9 380	9 270	-
	Tüüp 7	62 570	10 410	10 470	20 845	20 845	-	-	-
Piibe sild	Tüüp 5	61 330	6 100	13 360	8 550	10 850	11 310	11 160	-
Jõgisoo II sild (äärmine ava)	Tüüp 5	52 530	8 090	12 880	8 050	7 880	7 860	7 770	-
Vodja sild	Tüüp 5	50 510	7 060	10 400	6 850	8 510	8 800	8 890	-



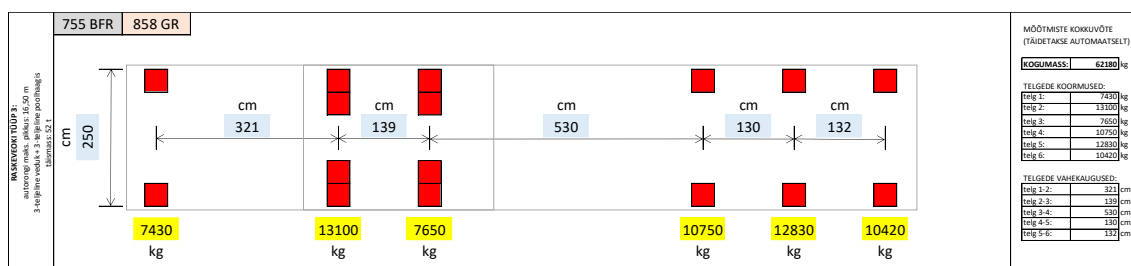
Joonis 38. Poaka silla katsetamisel kasutatud veokid



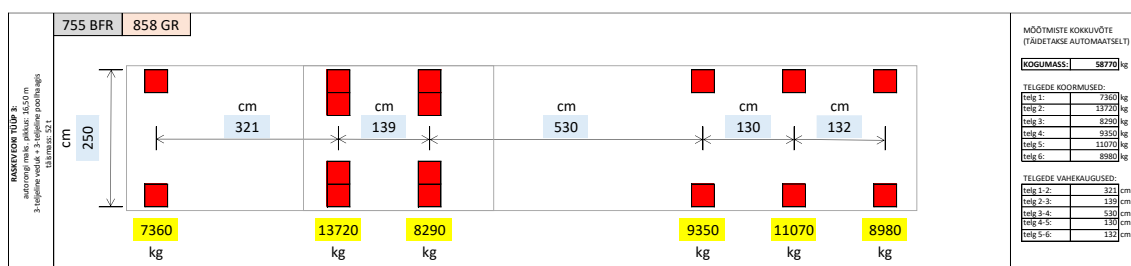
Joonis 39. Piiometsa silla katsetamisel kasutatud veokid



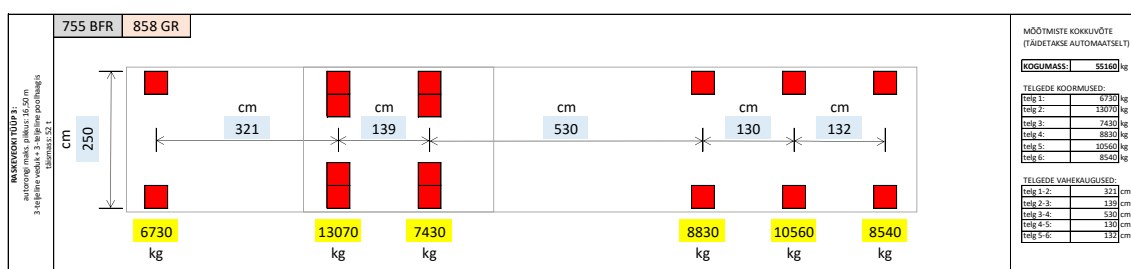
Joonis 40. Rohe silla katsetamisel kasutatud veok



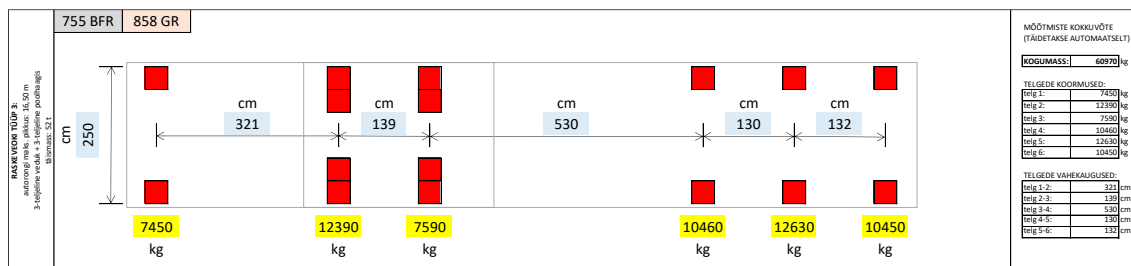
Joonis 41. Jõgisoo I silla katsetamisel kasutatud veok



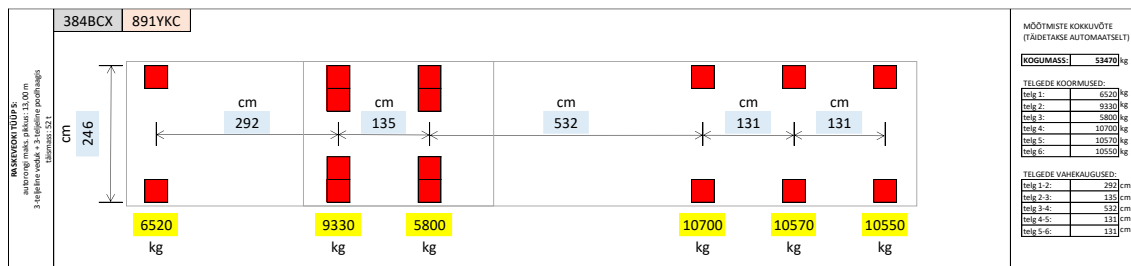
Joonis 42. Maetsma silla katsetamisel kasutatud veok



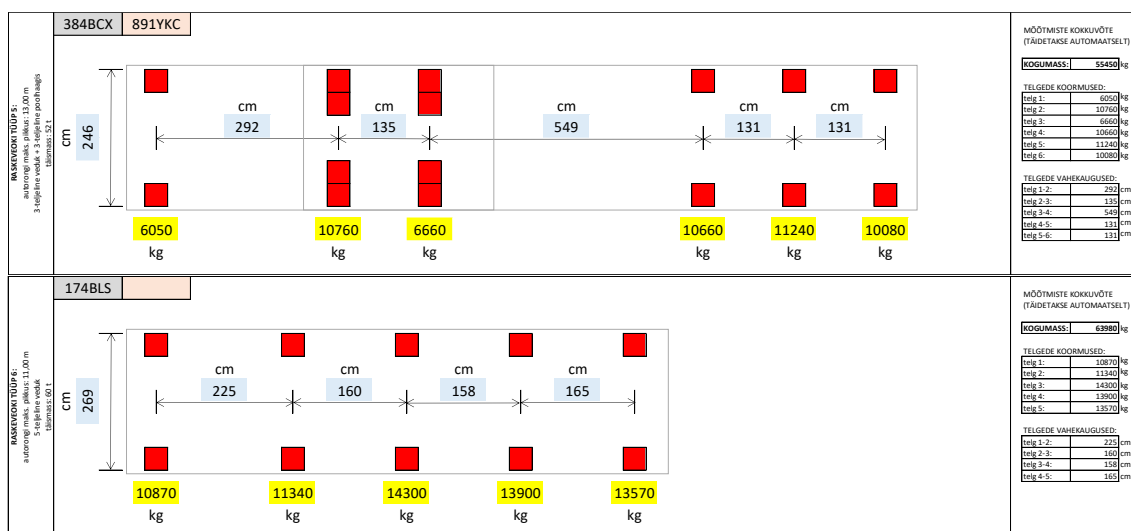
Joonis 43. Sandra silla katsetamisel kasutatud veok



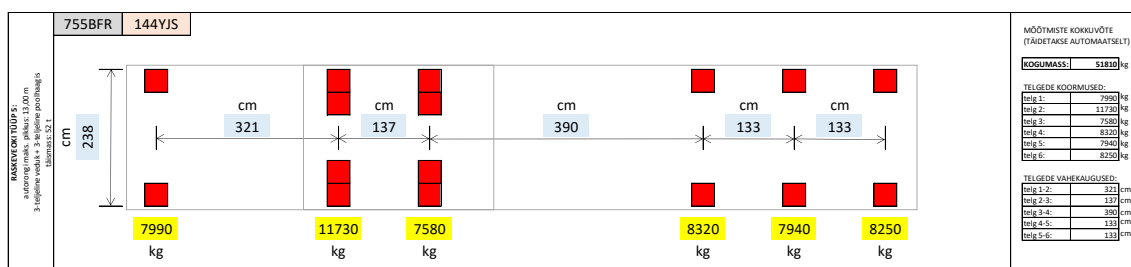
Joonis 44. Valgejõe silla katsetamisel kasutatud veok



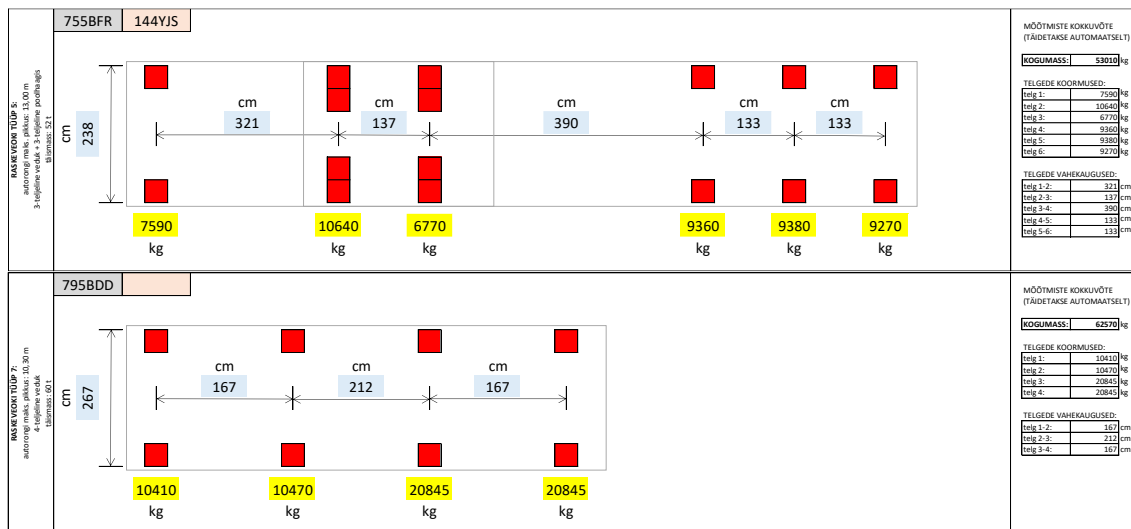
Joonis 45. Lungu silla katsetamisel kasutatud veok



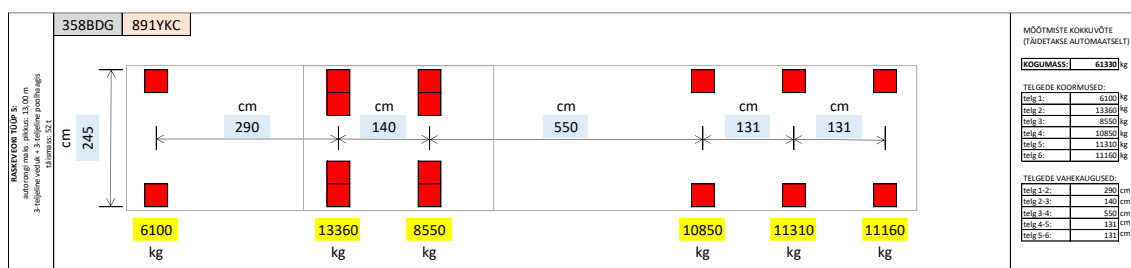
Joonis 46. Türi-Alliku silla katsetamisel kasutatud veokid



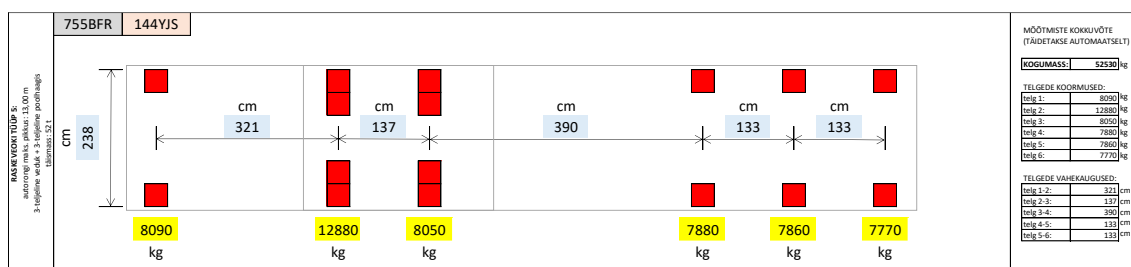
Joonis 47. Vaida III silla katsetamisel kasutatud veok



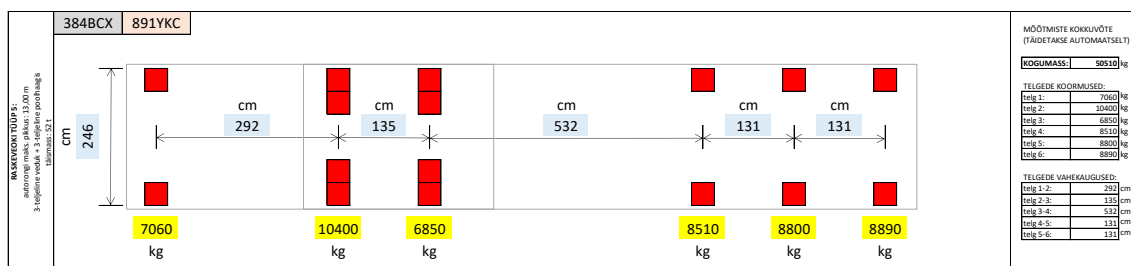
Joonis 48. Jõgisoo II silla keskmise ava katsetamisel kasutatud veokid



Joonis 49. Piibe silla katsetamisel kasutatud veok



Joonis 50. Jõgisoo II silla äärmise ava katsetamisel kasutatud veok



Joonis 51. Vodja silla katsetamisel kasutatud veok

3.1.4. Kasutatud mõõteseadmed

Katsetuste käigus mõõdeti talastiku vertikaalsiirdeid ja selleks kasutati kolme erinevat mõõtesüsteemi:

1) potentsiomeetrilised siirdeandurid (fotod 33...38):

- mudel: Ahlborn FW A150-T,
- mõõteulatus: 0...155 mm,
- mõõtetäpsus: $\pm 0,01$ mm;

2) laserskanner (fotod 39...40):

- mudel: Faro Focus S70,
- seerianumber: LLS081812472,
- skaneerimise ulatus: 0,6...70 m (90% peegeldumiskoefitsiendiga pinnalt),
- skaneerimise tööulatus: vert. 300° ja hor. 360° ,
- skaneerimise sagedus: 122000...976000 Hz,
- individuaalse skaneerimispunkti kauguse täpsus: ± 1 mm,
- individuaalse punkti 3D asukoha määramise täpsus: ± 2 mm (10 m juures);

3) nivelliir (fotod 41...42):

- mudel: Leica Sprinter 100,
- seerianumber: 1007744,
- 1 km edasi-tagasisuunalise nivelleerimiskäigu kõrguskasv: 2,0 mm,
- mõõteulatus: 2,0...80 m,
- lugemi võtmise täpsus: 0,1 mm,
- lugemi võtmise standardhälve: 0,6 mm.

Primaarse mõõteseadmena kasutati potentsiomeetrilisi siirdeandureid (edaspidi: siirdeandur). Nivelliir ja laserskanner olid ette nähtud mõõtetööde dubleerimiseks ja tulemuste kontrollimiseks erandolukorras. Mõõtepunktide arv ja asukoht ning mõõteseadmete kasutamine erinevates etappides oli iga silla eripärade tõttu veidi erinev ning vastavad kirjeldused on esitatud eraldi iga silla jaotises. Siirdeanduri lugemi võtmise täpsuse kontrolliks teostati igal sillal koormamata olukorras kontroll-lugemid (kõikide sildade kohta kokku üle 5000 lugemi), mille alusel arvutatud standardhälbed jäid kõikidel sildadel vahemikku 0,0020...0,0075 mm. Seega võib piisava kindlusega väita, et mõõtetäpsus $\pm 0,01$ mm on usaldusväärne.

Siirdeandurid olid kinnitatud spetsiaalse abitalastiku külge, mis toetus kas maapinnale või jõe põhja ja millega tagati siirdeanduritele stabiilne alus. Siirdeandurid olid traadi kaudu ühendatud iga tala alla kinnitatud konksu külge, mis võimaldas mõõta talastiku alumise pinna vertikaalsiiret. Kasutati kuni 8 andurit (sõltuvalt silla peatalade arvust), mis kõik olid ühendatud arvutiga ja mille mõõtetulemused salvestati automaatselt.



Foto 33. Siirdeandurid Ahlborn FW A150-T



Foto 34. Siirdeandurite kontrollkeskus



Foto 35. Siirdeanduri ühendamine talaga



Foto 36. Siirdeandurid (4 tk) koos abitalastikuga

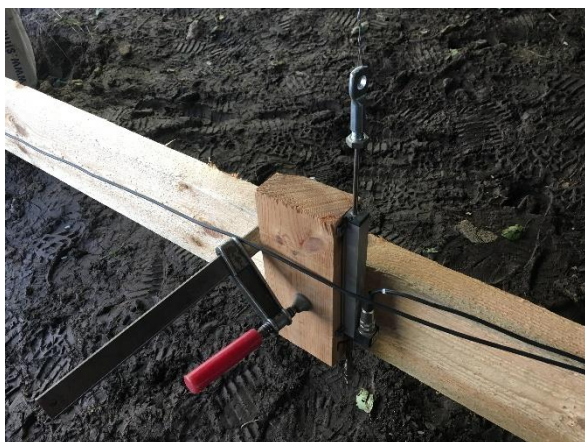


Foto 37. Siirdeandur maapinnal (kinnitatuna abitalastiku külge)



Foto 38. Siirdeanduri kinnitus tala alumisele pinnale

Nivelliiri lugemi täpsust hinnati empiiriliste tulemuste alusel. Selleks võrreldi siirdeandurite lugemeid nivelleerimise tulemustega (kokku vaadeldi 37 mõõtepunkti andmeid). Andmete alusel arvutati nivelleerimise mõõtetulemuste standardhälve, milleks saadi 0,3 mm. Tulemus on kaks korda väiksem seadme tootja poolt deklareeritud väärtusest. Siit võib järeldada, et nivelleerimisel saadud väärtused, mis ületavad $\pm 0,3$ mm, iseloomustavad tegelikke siirdeid. Väärtuste puhul, mis jäid $\pm 0,3$ mm piiridesse, loeti tala või plaat stabiilseks.



Foto 39. Laserskanner Faro Focus S70



Foto 40. Laserskanner Faro Focus S70



Foto 41. Nivelliir Leica Sprinter 100



Foto 42. Nivelleerimine

Veokite kaalumiseks kasutati Dini Argeo WWSE rattakaalusid ([fotod 43...46](#)):

- mudel: WWSE10T;
- kontrollmooduli seerianumber: 0100475327;
- 1. mõõtealuse seerianumber: 0100475327B1;
- 2. mõõtealuse seerianumber: 0100475327B2;
- mõõteulatus: 100...10 000 kg;
- mõõtetäpsus: 5 kg;
- mõõteplatvormi koormusala pindala: 700×450 mm;
- töötemperatuuri vahemik: -10...+40°C.

Korraga mõõdeti ühe telje kahte üksik- või paarisratast. Kaalumise ajaks paigutati mittemõõdetavate rataste alla täiendavad platvormid, mille kõrgus oli sama, mis mõõtealustel.



Foto 43. Kaalude kontrollmoodul



Foto 44. Mõõtealus



Foto 45. Veoki kaalumine



Foto 46. Veoki kaalumine

Sildade seisukorra hindamisel kasutati järgmisi mõõteseadmeid (sulgudes mõõtetööde standard):

- betooni survetugevus: Proceq SilverSchmidt mudel ST N (EVS-EN 12504-2) – [foto 47](#);
- betooni karboniseerumine: fenoolftaleiini 1% lahus (EVS-EN 14630) – [foto 48](#);
- terasarmatuuri paiknemine: Proceq Profoscope+ ja Hilti PS 1000 X-Scan – [fotod 49...50](#);
- terasarmatuuri tõmbetugevus: Proceq Equotip Piccolo 2 (EVS-EN ISO 16859-1) – [foto 51](#);
- terasarmatuuri korrosioonitase: Proceq Resipod (RILEM TC 154-EMC) – [foto 52](#).



Foto 47. Põrkearvu määramine Schmidt'i vasaraga (Proceq SilverSchmidt mudel ST N)



Foto 48. Karboniseerumissügavuse määramine fenoolftaleiini 1% lahusega



Foto 49. Terasarmatuuri paiknemise, betoonist kaitsekihi ja terasarmatuuri läbimõõdu määramine seadmega Proceq Profoscope+



Foto 50. Terasarmatuuri paiknemise, betoonist kaitsekihi ja terasarmatuuri läbimõõdu määramine seadmega Hilti PS 1000 X-Scan



Foto 51. Terasetõmbetugevuse mõõtmine seadmega Proceq Equotip Piccolo 2



Foto 52. Armatuuri korrosioonitaseme mõõtmine seadmega Proceq Resipod

3.1.5. Tööohutus

Katsejuht: Martti Kiisa.

Katsejuht vastutas kõikide katsetööde ajal teostatavate tegevuste eest, mis olid antud tööga seotud.

Iga katsetustöodes osalev isik pidi peale vastavat instrueerimist allkirjaga kinnitama, et ta on ohutusnõuetest teadlik.

Katsetamise ala loeti ohualaks, mis oli eraldatud ohutuslintidega. Sinna võisid siseneda ainult katsejuhi poolt lubatud ning ohutusalase instrueerimise läbinud isikud. Kõrvalistel isikutel oli lubatud viibida ainult ohualast väljaspool.

Isikud, kes viibisid ohualas, pidid:

- kinni pidama ettenähtud katsetamise programmist;
- täitma kõiki katsejuhi korraldusi;
- olema riietatud selliselt, et tööülesandeid täites puudub enda ja teiste vigastamise oht;
- kogu ohualas viibimise aja jooksul kandma neonvärvides helkurvesti (või analoogset riietuseset, nt jope), kiivrit ja turvajalanõusid;
- olema varustatud kaitseprillide ja teiste isikukaitsevahenditega (nt kummikud), mida saaks vajadusel kasutada;
- andma endast kõik võimaliku, et mitte seada ohtu ennast ega teisi isikuid;
- vigastatud isiku või võimaliku ohu märkamisel teavitama sellest viivitamatult katsejuhti;
- tagama kõikide seadmete ja töövahendite nõuetekohase kasutamise.

Erakorralise olukorra tekkimisel (nt sillakonstruktsioonide lubamatud kahjustused, isikute vigastused jne) oleks tulnud:

- võimalusel tagada enda ja teiste isikute ohutu evakueerumine;
- sellest viivitamatult teavitada katsejuhti;
- alluda katsejuhi edasistele korraldustele.

Kui erakorralises olukorras ei oleks katsejuht mõjuval põhjusel olnud võimeline edasisi korraldusi jagama, siis oleks tulnud viivitamatult helistada Päästeameti hädaabinumbri 112. Esmaabikomplektid asusid sõidukites Škoda Octavia (675 MRH), Mercedes-Benz Vito (960 BSR) ja Fiat Ducato (031 BLX).

Sõidukitega sisenemine katsealasse oli üldjuhul keelatud ja lubatud erandkorras ainult katsejuhi loal. Sõidukid, mis olid vajalikud tööde läbiviimiseks, pidid olema varustatud kollase vilkuriga.

Alarmsõidukitele oli erandkorras võimalik tagada ülepääs sillast ka nendel kellaaegadel, kui sild on avalikuks liiklemiseks suletud. Vastava loa oleks andnud katsejuht.

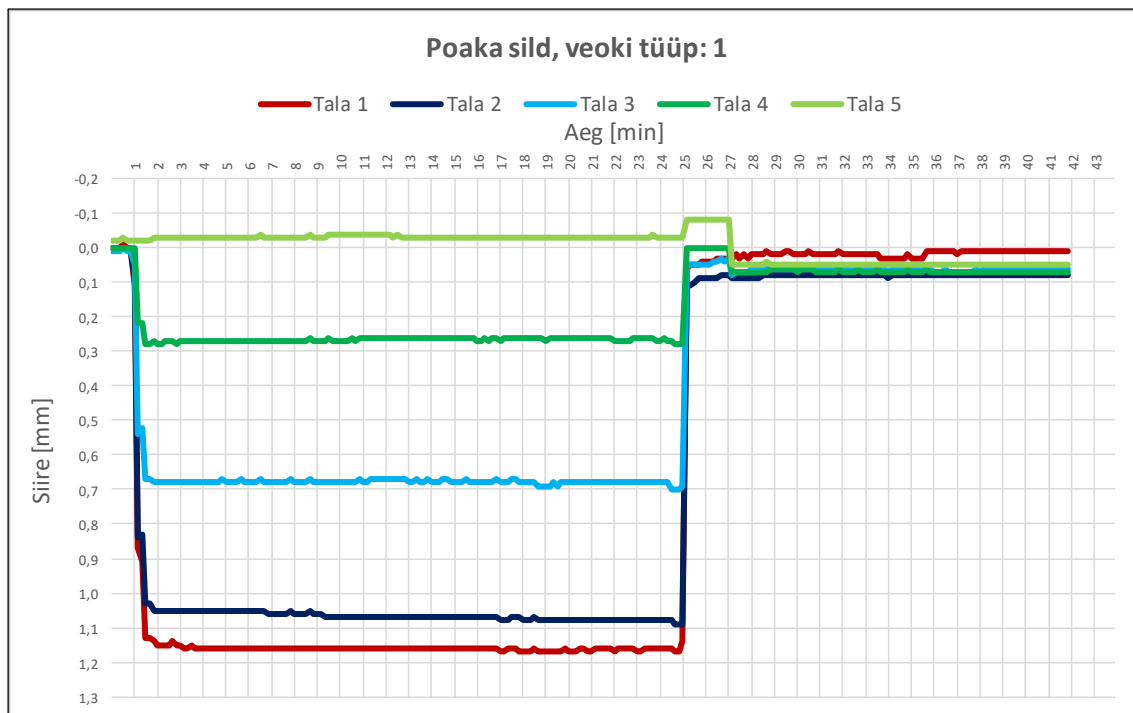
Vihm ei oleks seganud katsetööde läbiviimist. Erandlike ilmastikuolude korral (torm, rahe, udu jne) oleks tööde läbiviimise võimaliku jätkamise üle otsustanud katsejuht ja andnud vastavad korraldused.

Katsetustöödega mitteseotud isikutele jagas informatsiooni ainult katsejuht.

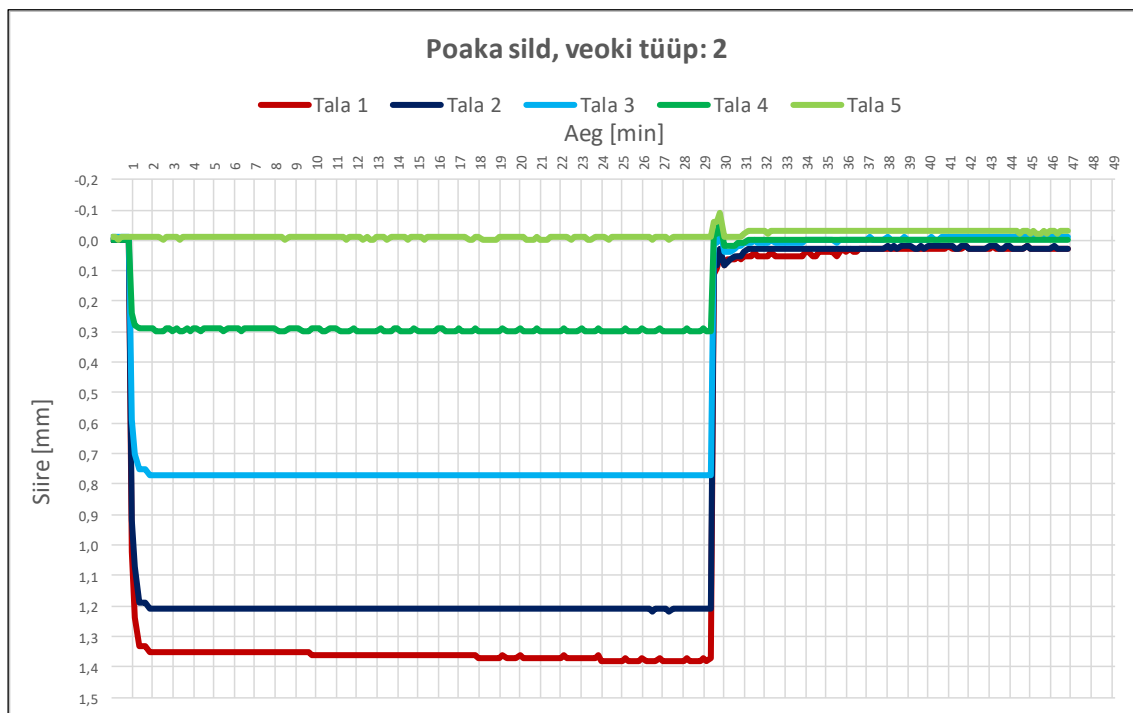
Kõik koormuskatsed algasid ja lõppesid katsejuhi vastava korraldusega.

3.2. Katsetulemused

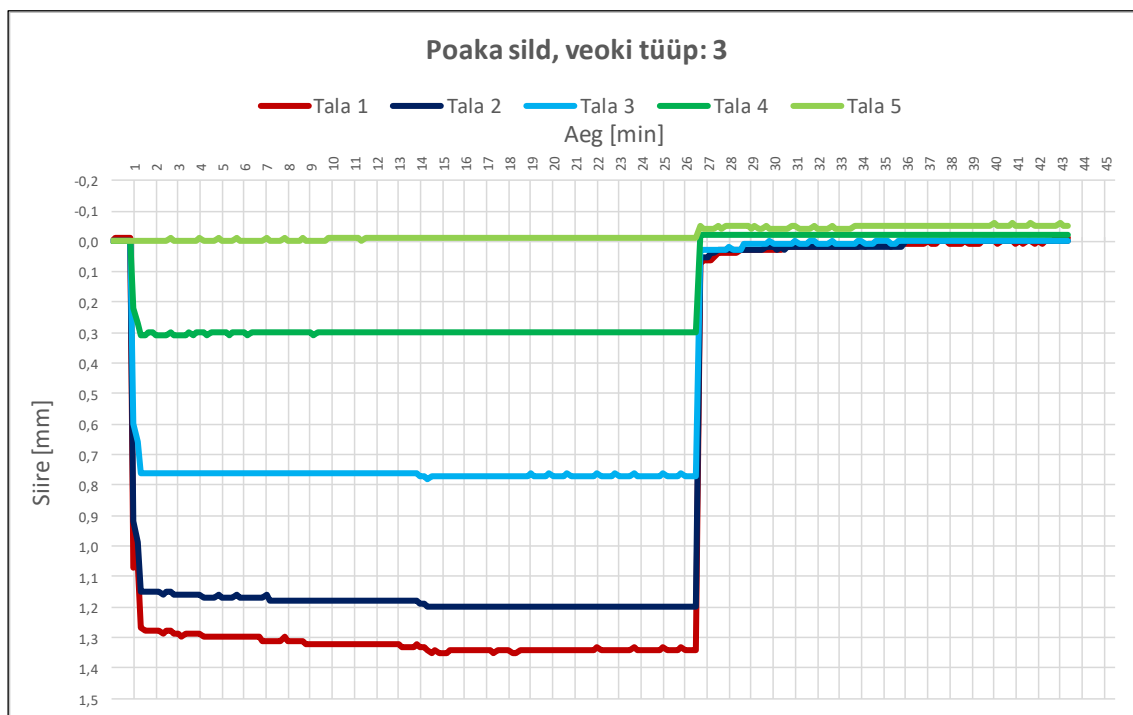
3.2.1. Poaka sild



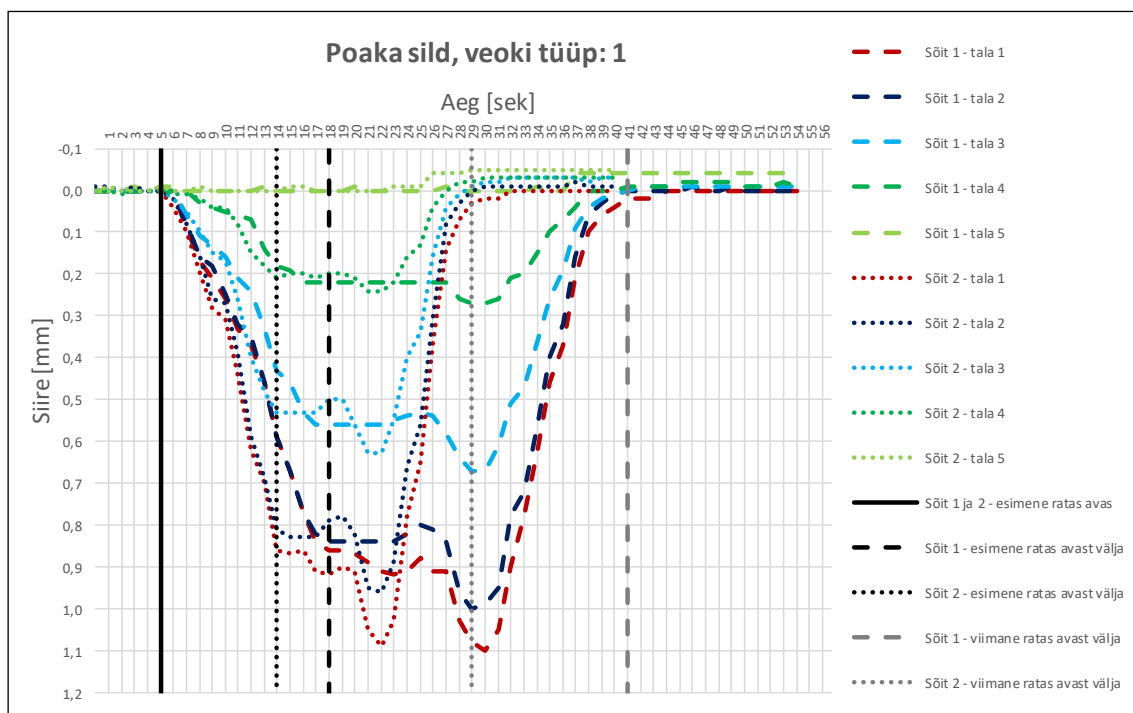
Joonis 52. Poaka silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 1)



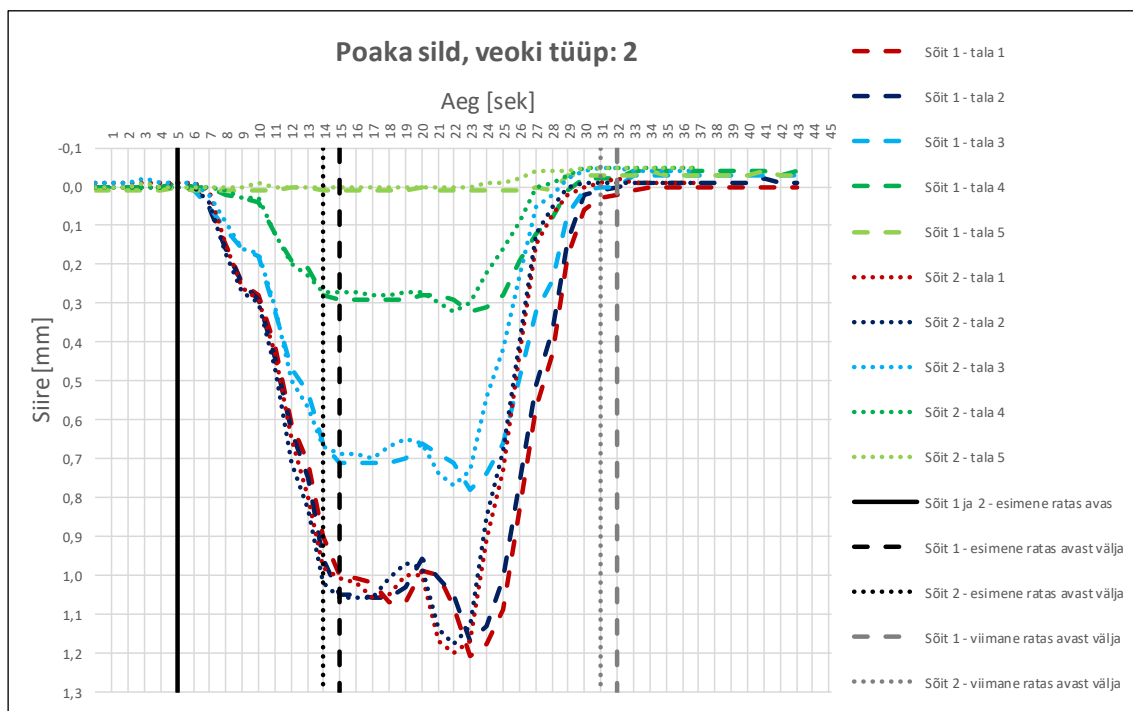
Joonis 53. Poaka silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 2)



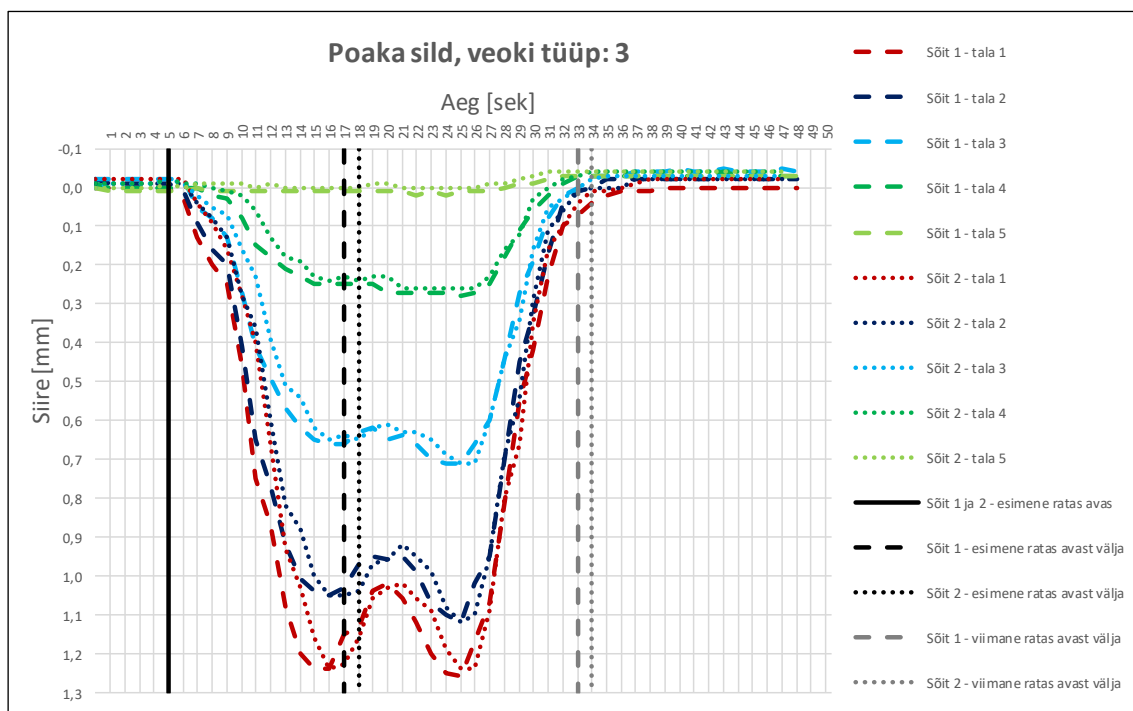
Joonis 54. Poaka silla staatilise koormuse mõõdetulemused (veoki tüüp: 3)



Joonis 55. Poaka silla liikuva koormuse mõõdetulemused (veoki tüüp: 1)



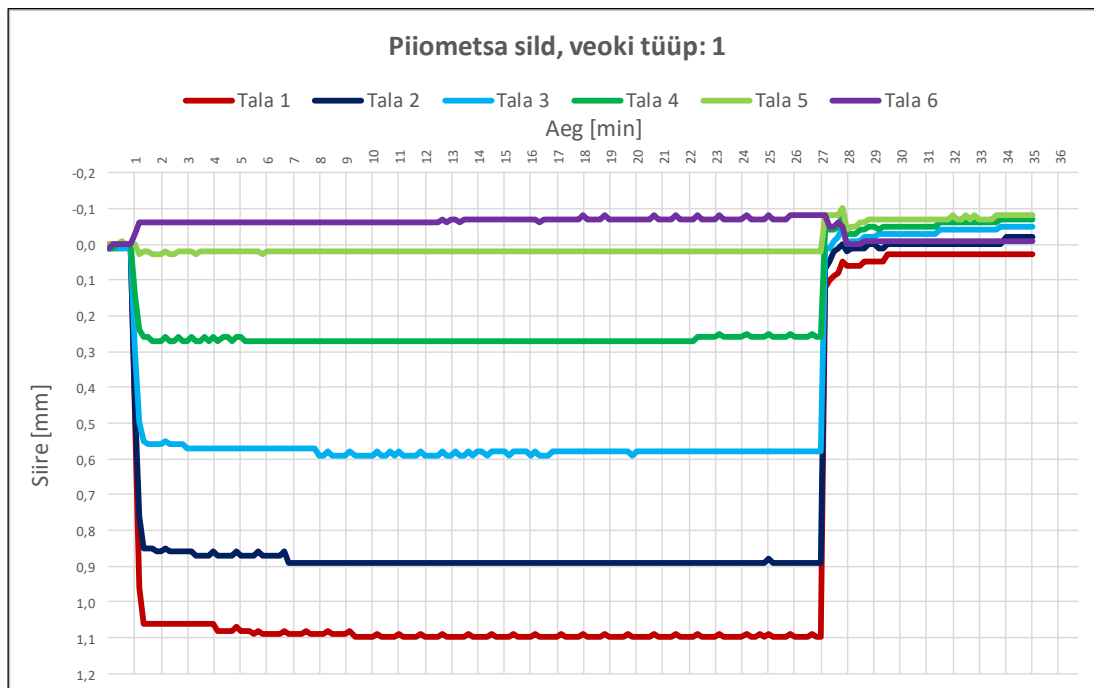
Joonis 56. Poaka silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 2)



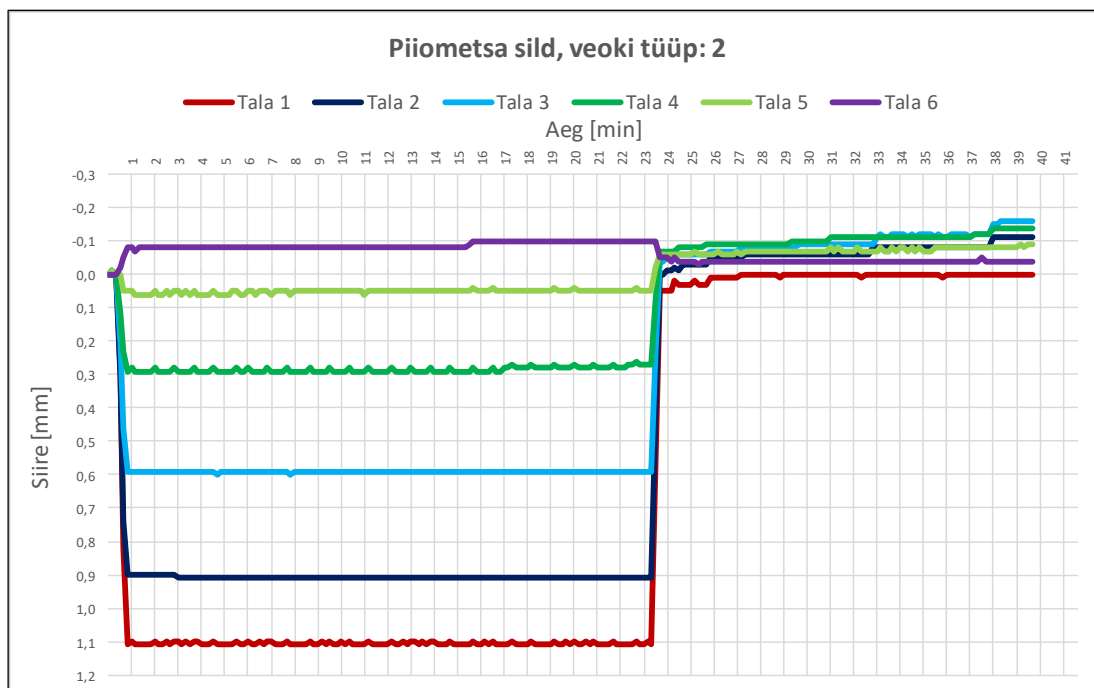
Joonis 57. Poaka silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 3)

Koormuse all avanesid tala 1 keskosas paindepraod sammuga 20...40 cm ja laiusega 0,2...0,5 mm, mis ulatusid kuni ülemise vööni (st umbes 60 cm kõrguseni). Osaliselt olid praod olemas ka enne koormamist, kuid nende laius jäi alla 0,2 mm.

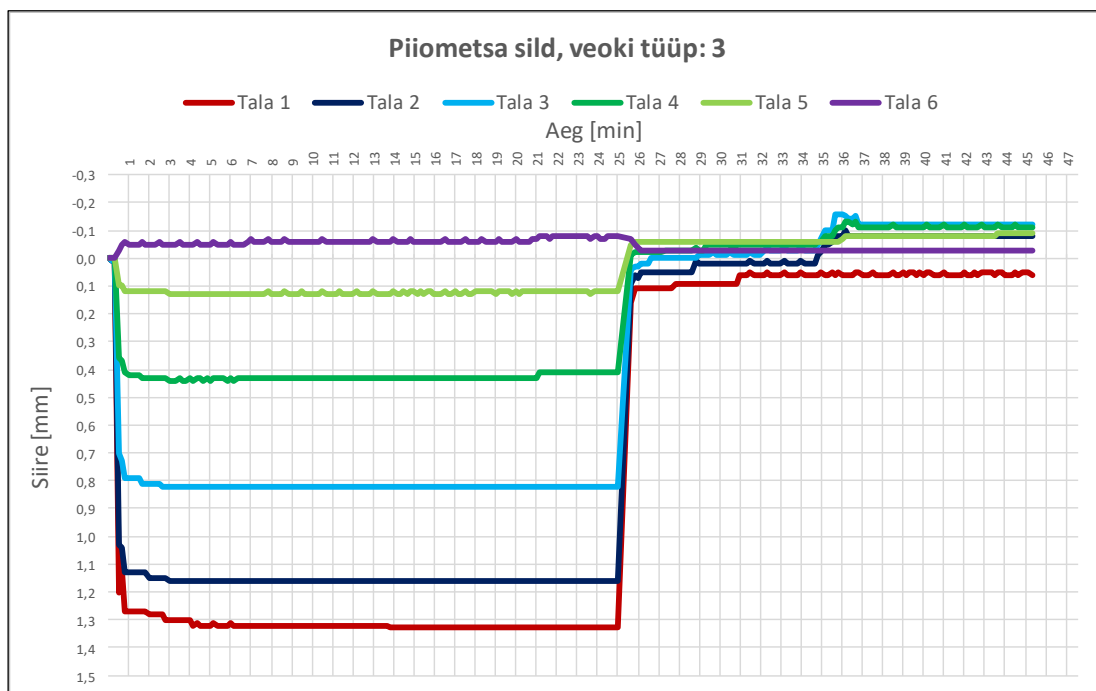
3.2.2. Piiometsa sild



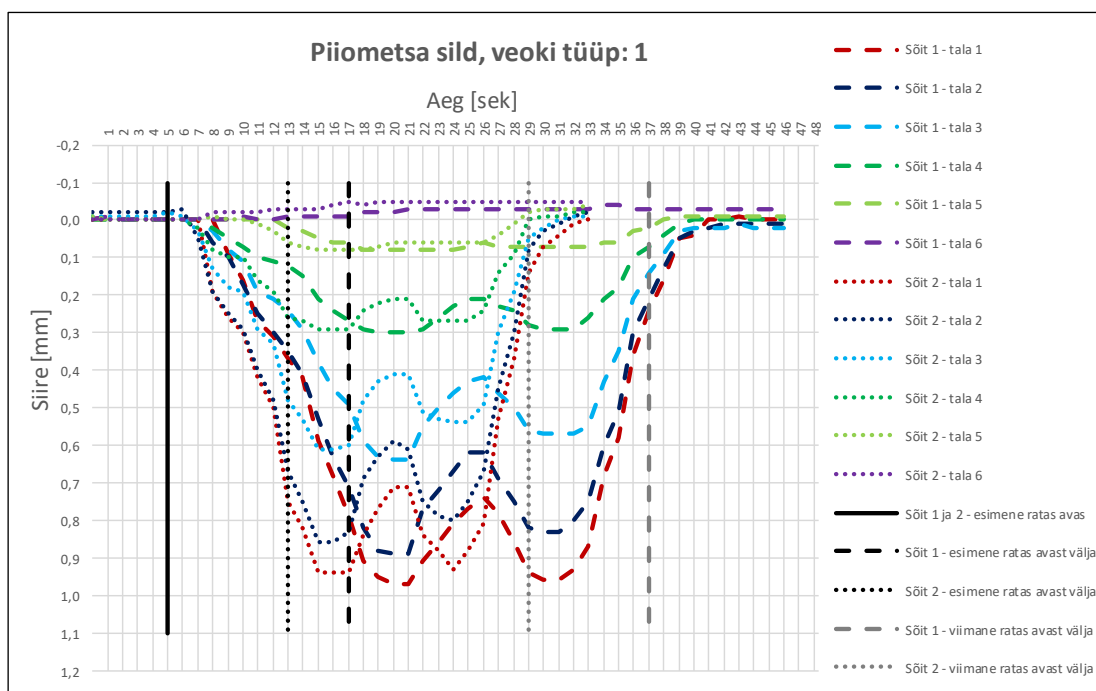
Joonis 58. Piiometsa silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 1)



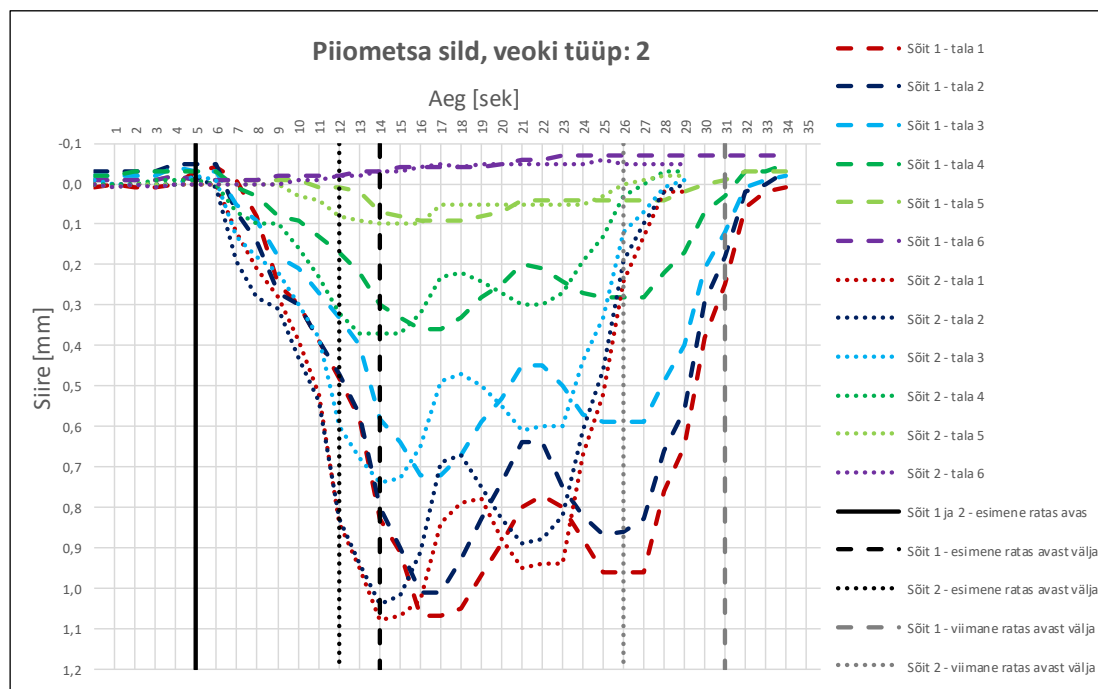
Joonis 59. Piiometsa silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 2)



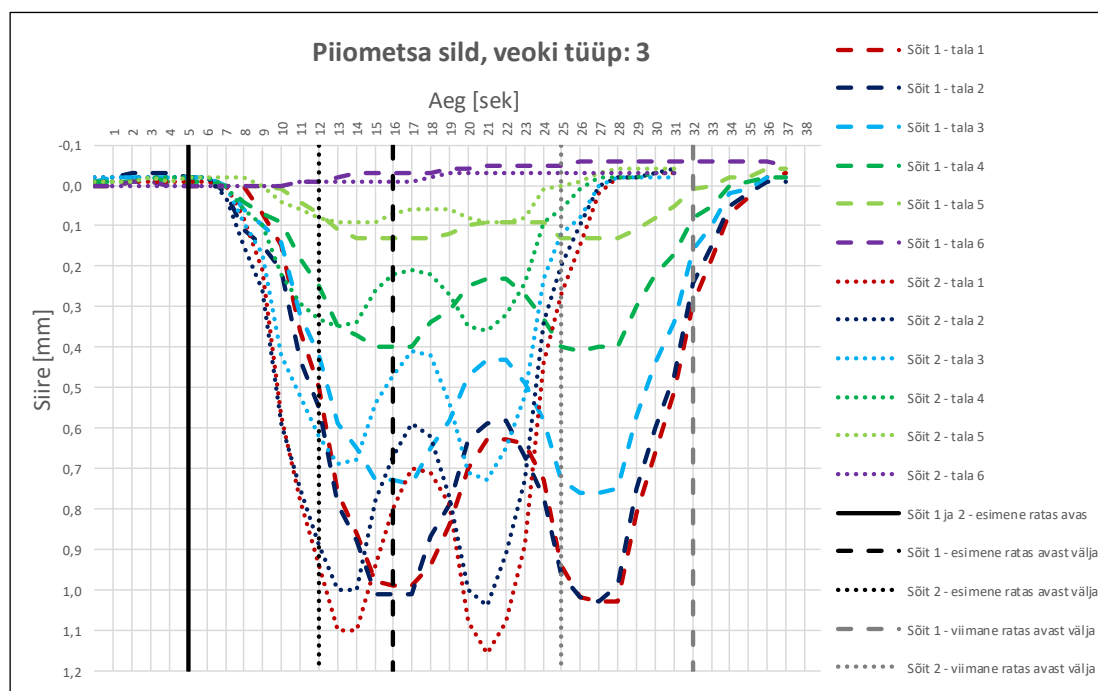
Joonis 60. Piiometsa silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 3)



Joonis 61. Piiometsa silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 1)



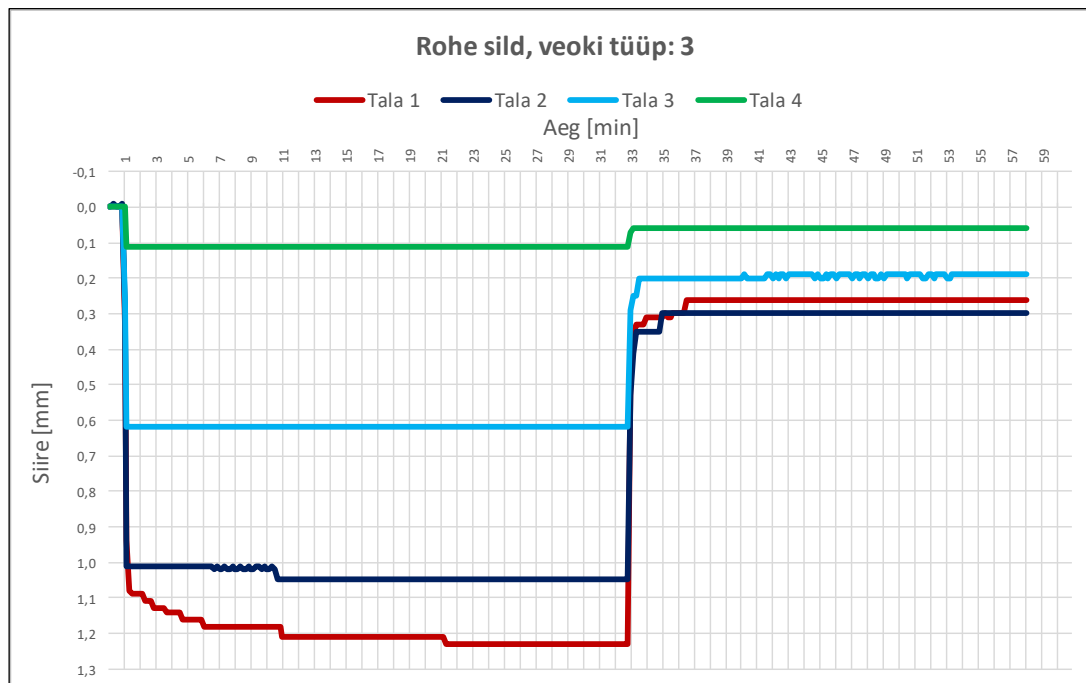
Joonis 62. Piiometsa silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 2)



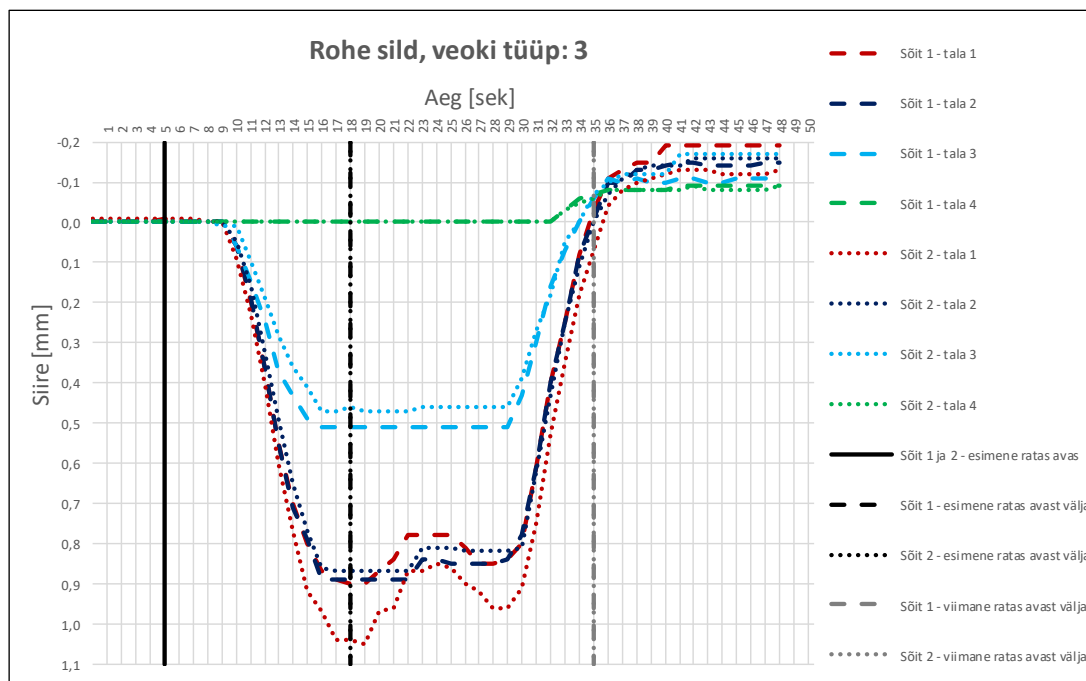
Joonis 63. Piiometsa silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 3)

Silla peataladel olid juba enne koormamist mõned vertikaalpraod laiusega kuni 0,2 mm, mis ulatusid kuni tala plaadini. See viitab silla varasemale ülekoormamisele. Koormuse all avanesid peatalade keskosas paindepraod sammuga orienteeruvalt 50 cm ja laiusega alla 0,2 mm, mis ulatusid tala alumisest pinnast 10...20 cm kõrguseni. Pragude fikseerimist takistas korrodeeruva terasarmatuuri tõttu pragunev betoonipind.

3.2.3. Rohe sild



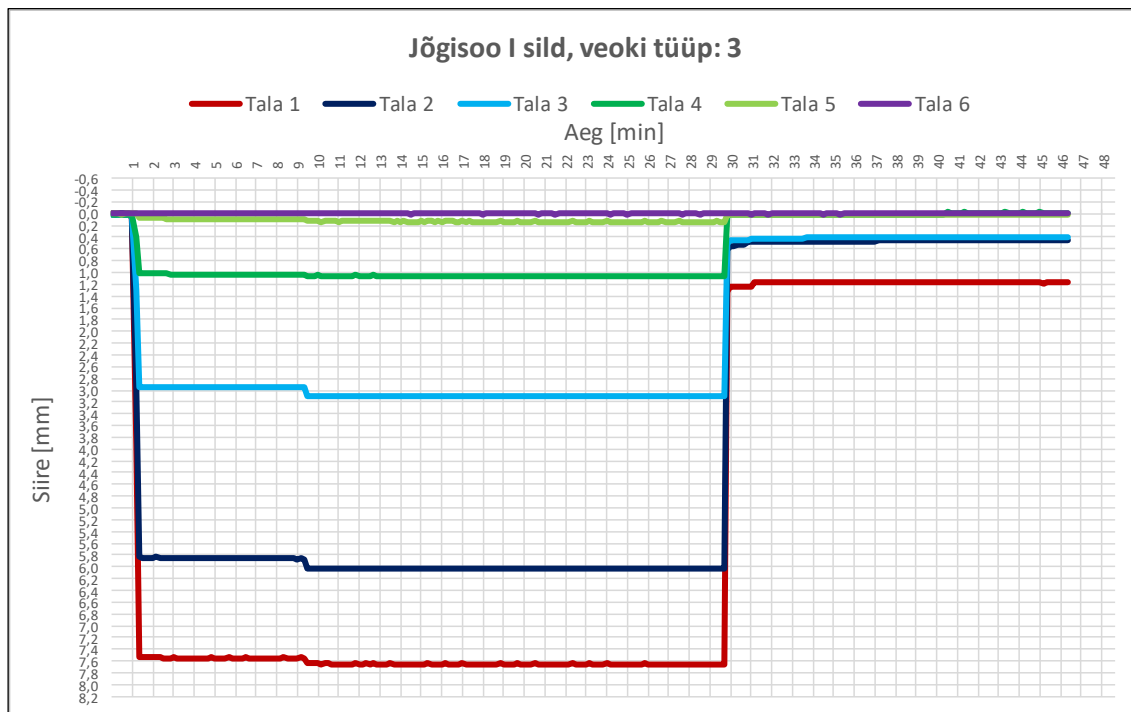
Joonis 64. Rohe silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 3)



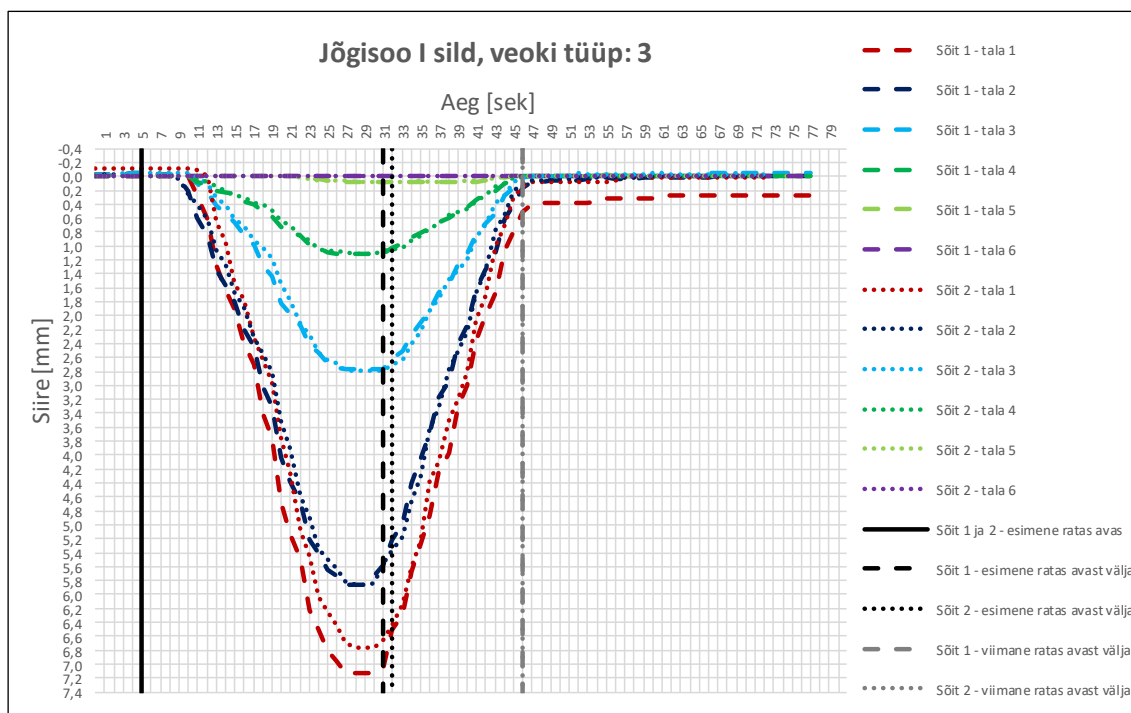
Joonis 65. Rohe silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 3)

Koormuse all avanesid peatalade keskosas vertikaalsed paindepraod sammuga 15...30 cm ja laiusega kuni 0,2 mm, mis ulatusid tala alumisest pinnast 10...25 cm kõrguseni. Erinevalt teistest sildadest oli Rohe silla peataladel tuvastatavad ka põikjõududest tingitud kaldpraod toelähedases piirkonnas (sammuga 30...50 cm, kõrgusega 10...40 cm ja laiusega 0,1...0,2 mm).

3.2.4. Jõgisoo I sild



Joonis 66. Jõgisoo I silla staatilise koormuse mõõdetulemused (veoki tüüp: 3)



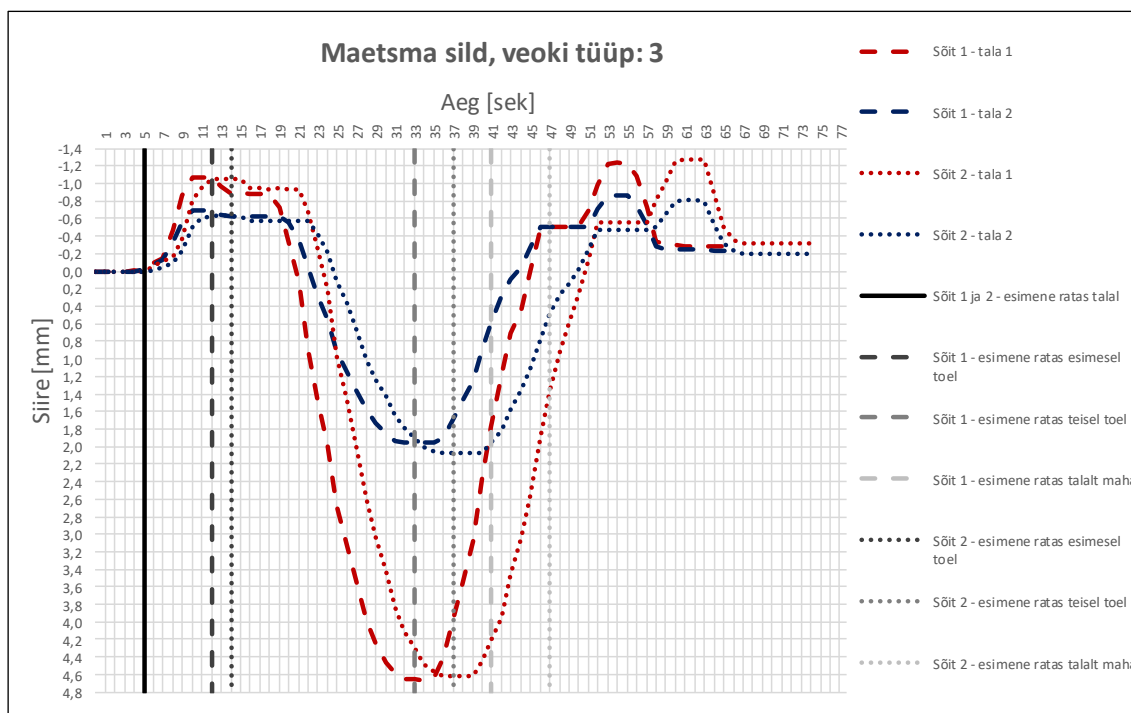
Joonis 67. Jõgisoo I silla liikuva koormusemõõdetulemused (veoki tüüp: 3)

Jõgisoo I sillal pragude avanemist peatalades koormamise käigus ei tuvastatud.

3.2.5. Maetsma sild



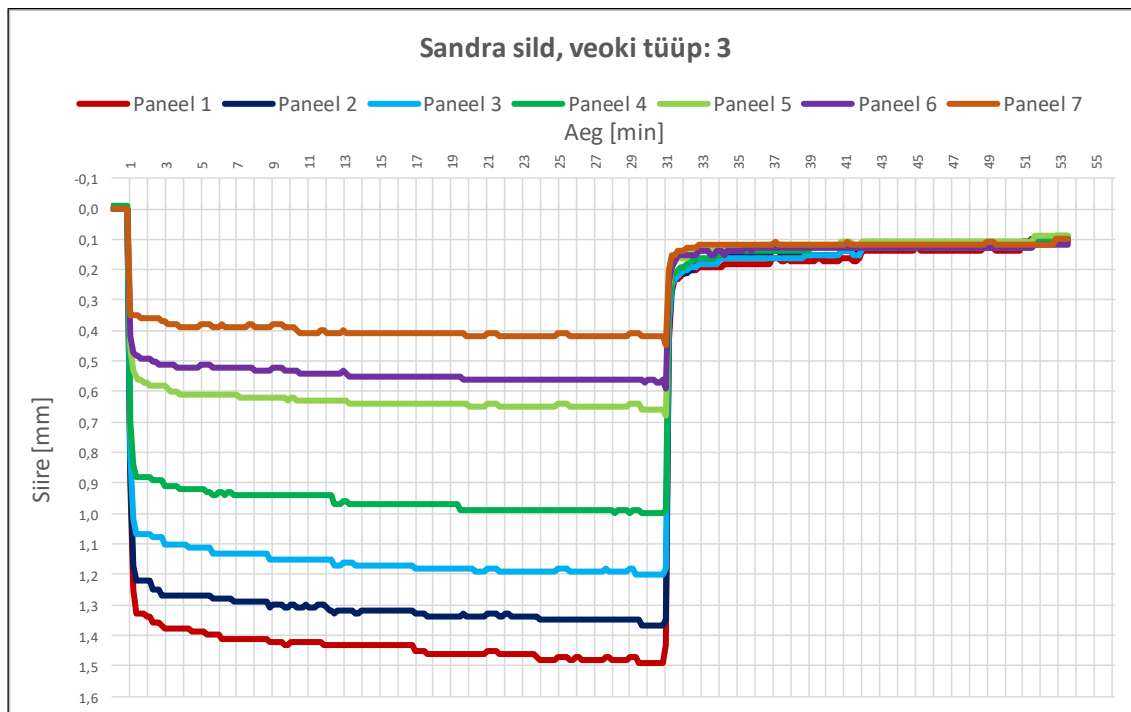
Joonis 68. Maetsma silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 3)



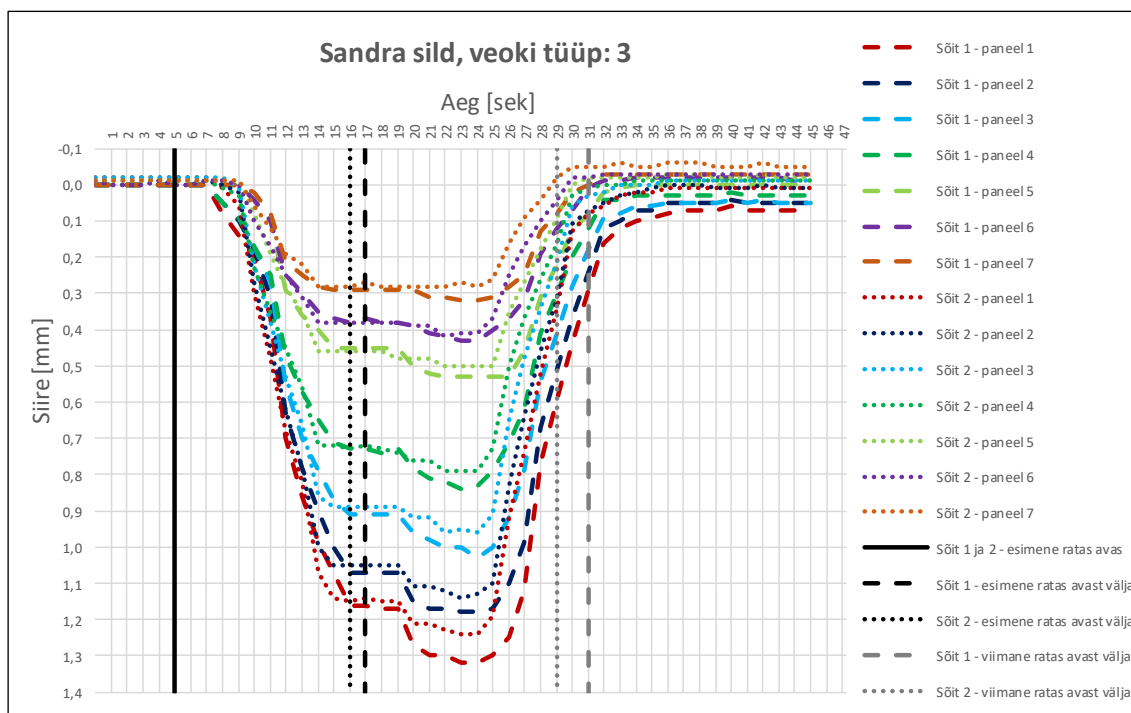
Joonis 69. Maetsma silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 3)

Maetsma sillal pragude avanemist peatalades koormamise käigus ei tuvastatud.

3.2.6. Sandra sild



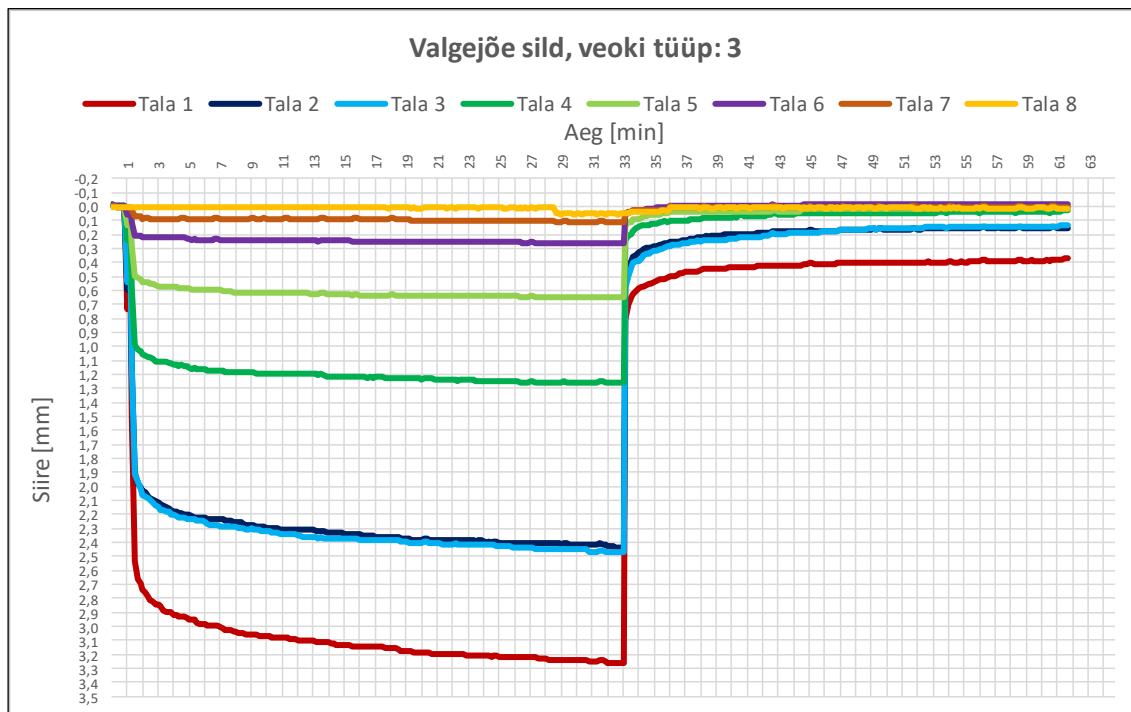
Joonis 70. Sandra silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 3)



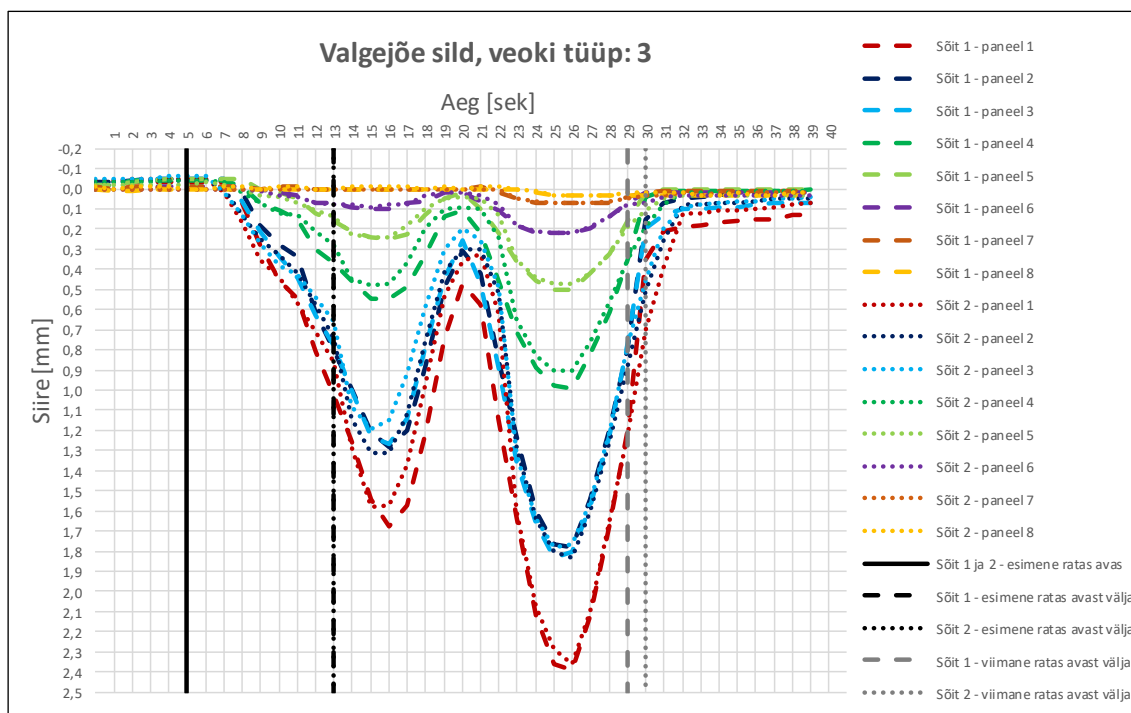
Joonis 71. Sandra silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 3)

Sandra sillal pragude avanemist paneelides koormamise käigus ei tuvastatud.

3.2.7. Valgejõe sild



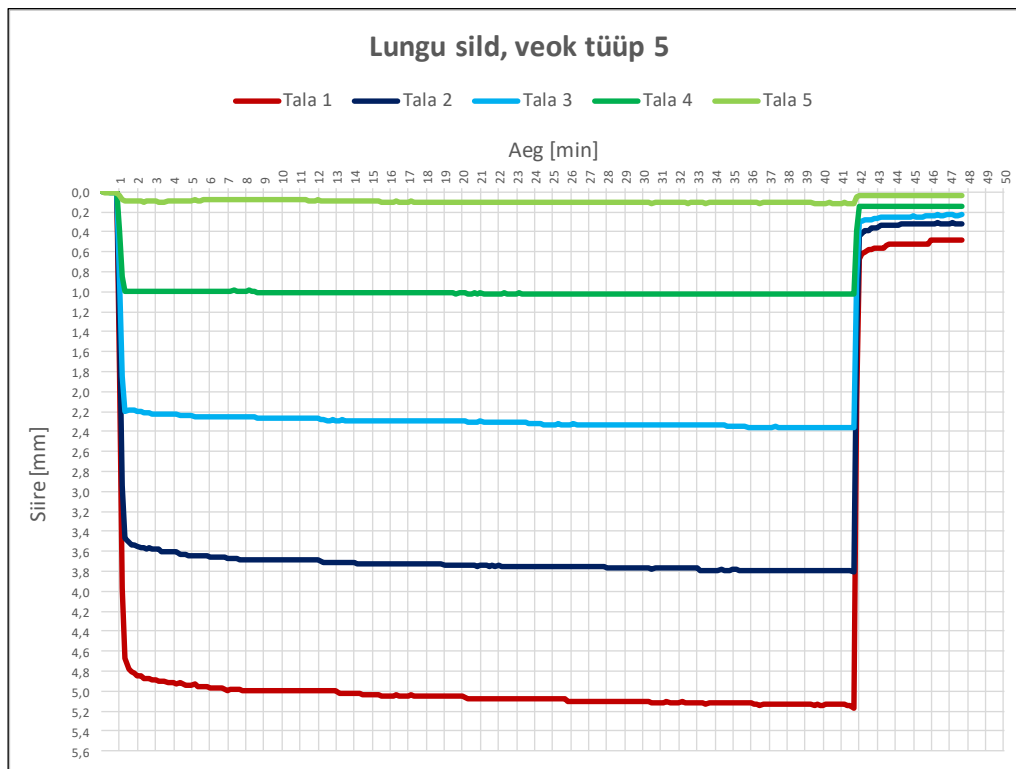
Joonis 72. Valgejõe silla staatilise koormuse mõõdetulemused (veoki tüüp: 3)



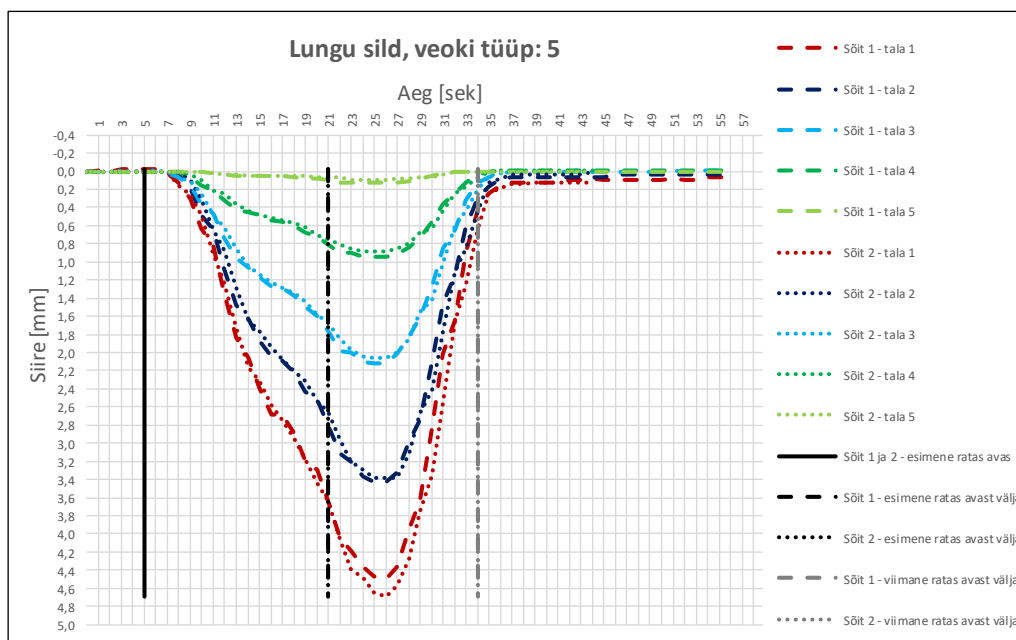
Joonis 73. Valgejõe silla liikuva koormuse mõõdetulemused (veoki tüüp: 3)

Valgejõe silla paneelide alumise betoonpinna kvaliteet oli niivõrd halb, et pragude võimalikku tekkimist nendes ei olnud võimalik tuvastada.

3.2.8. Lungu sild



Joonis 74. Lungu silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)



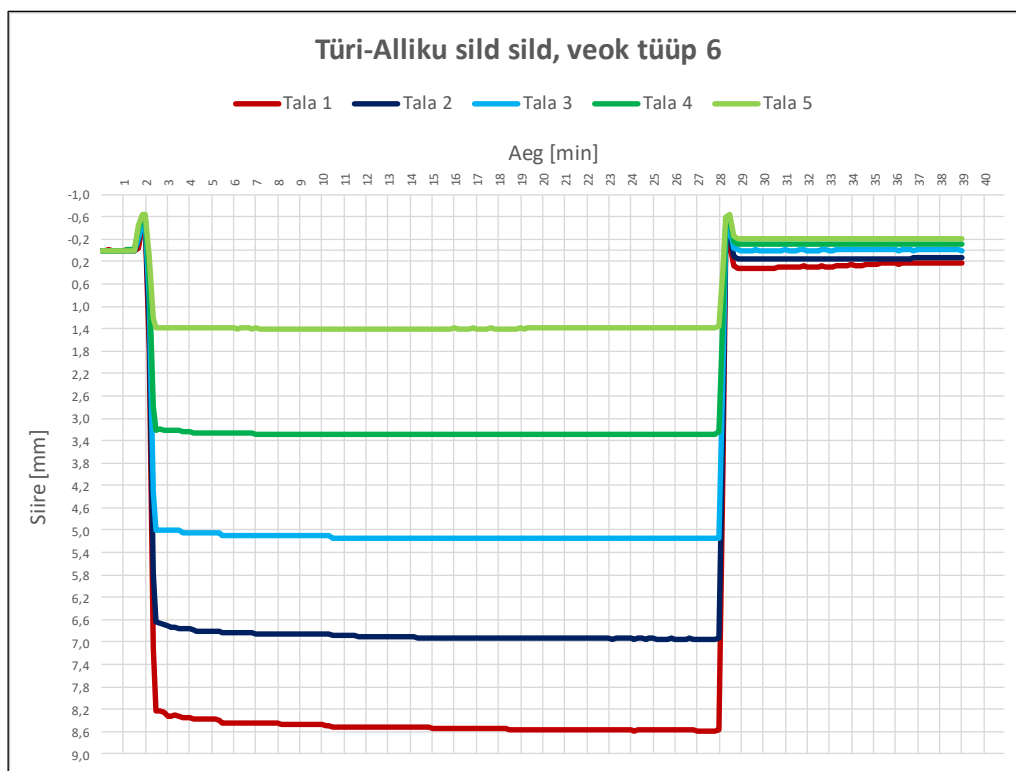
Joonis 75. Lungu silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)

Koormuse all avanesid peatalade keskosas paindepraod sammuga orienteeruvalt 30...50 cm ja laiusega alla 0,2 mm, mis ulatusid tala alumisest pinnast 10...30 cm kõrguseni. Pragude fikseerimist takistas korrodeeruva terasarmatuuri tõttu kahjustatud betoonipind.

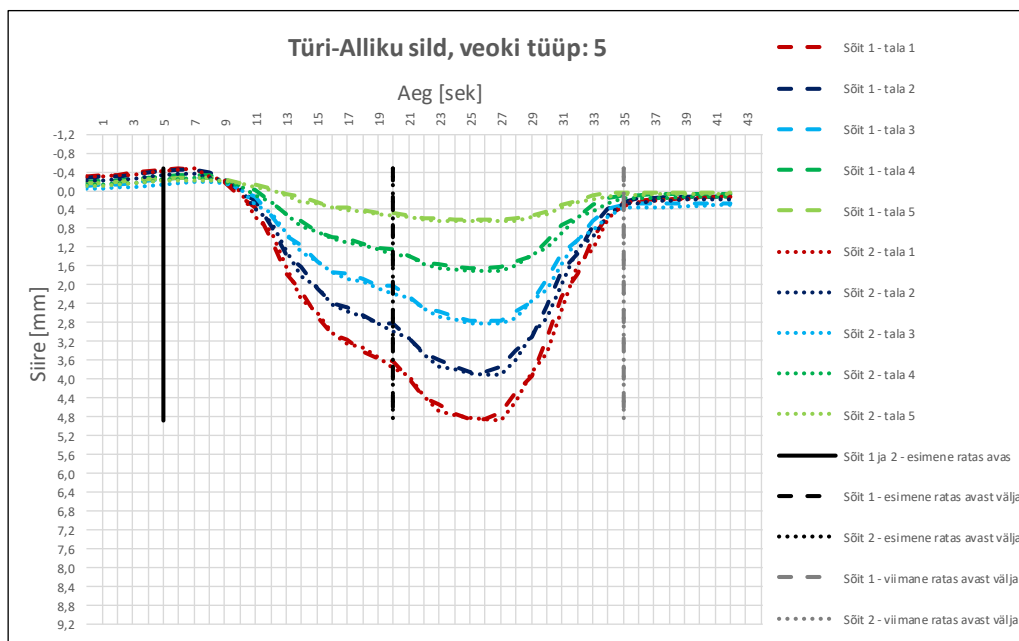
3.2.9. Türi-Alliku sild



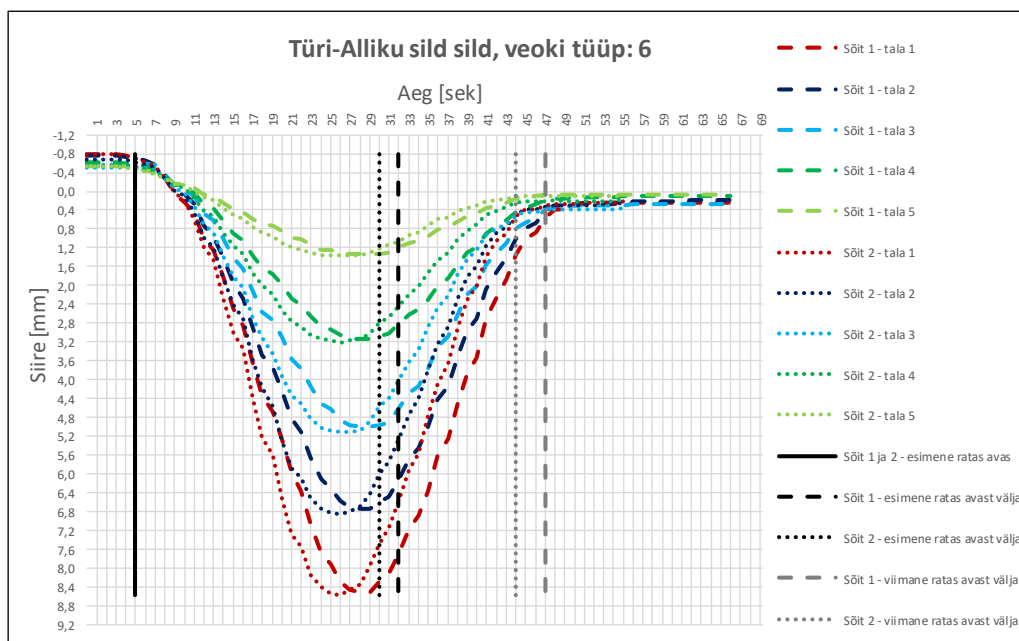
Joonis 76. Türi-Alliku silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)



Joonis 77. Türi-Alliku silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 6)



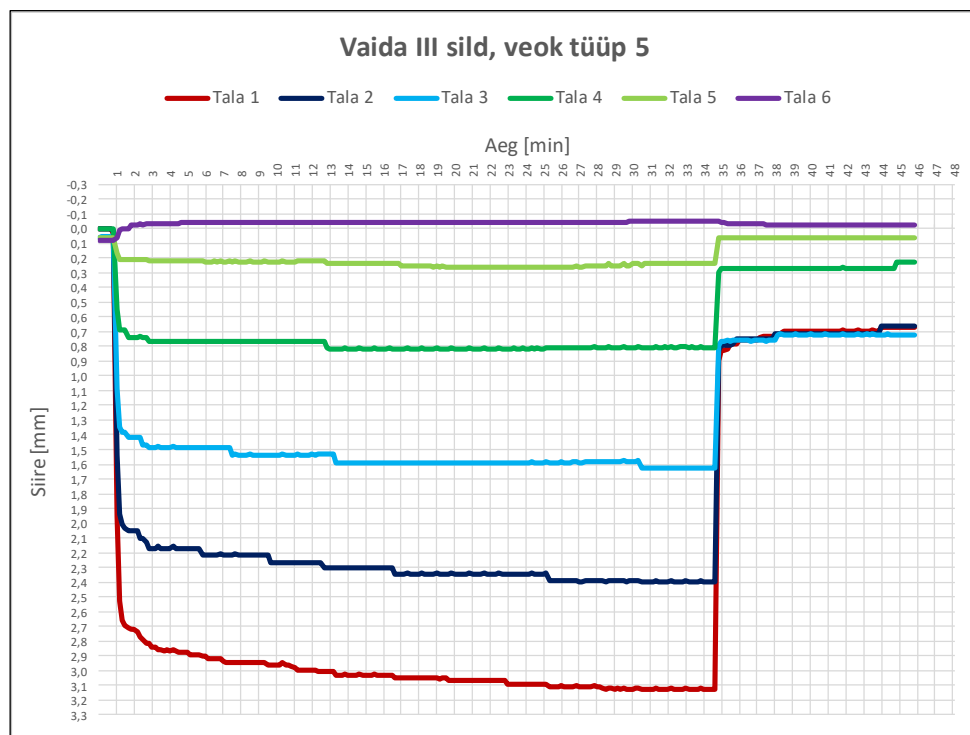
Joonis 78. Türi-Alliku silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)



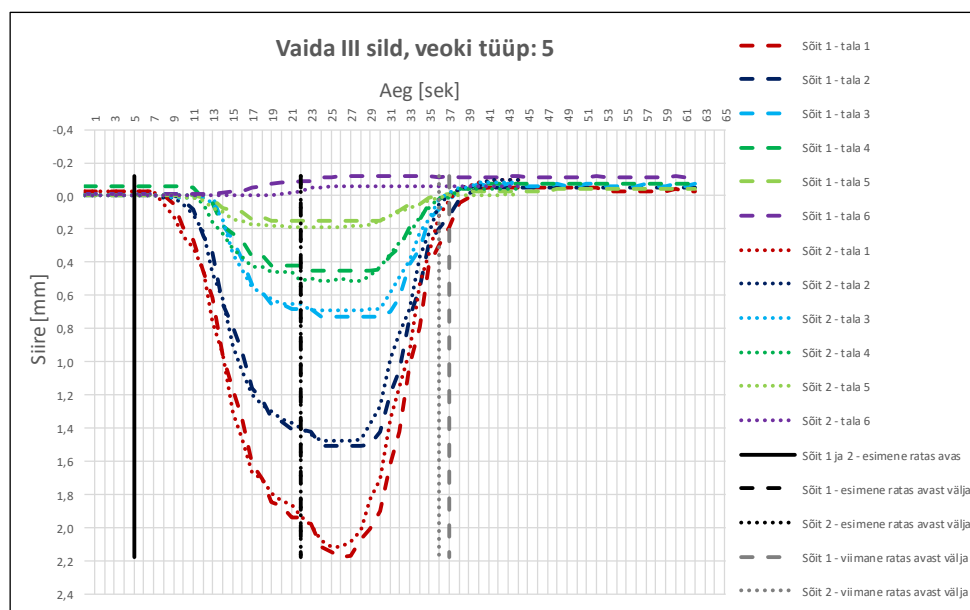
Joonis 79. Türi-Alliku silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 6)

Türi-Alliku silla peatalade betoonpinna kvaliteet oli niivõrd halb ja osaliselt pragunenud (kaitsekihi lahtilöömise tõttu), et pragude võimalikku tekkimist nendes ei olnud võimalik tuvastada.

3.2.10. Vaida III sild



Joonis 80. Vaida III silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)



Joonis 81. Vaida III silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)

Silla peataladel olid juba enne koormamist mõned suhteliselt korrapäratult paiknevad praod laiusega kuni 0,1 mm, mis on valdavalt tingitud betoonist kaitsekihi lahtilöömisest ja kohatisest betooni parandussegu lagunemisest. Koormuse all avanesid peatalade keskosas üksikud paindepraod sammuga orienteeruvalt 20...50 cm ja laiusega alla 0,2 mm, mis ulatusid tala alumisest pinnast 10...30 cm kõrguseni.

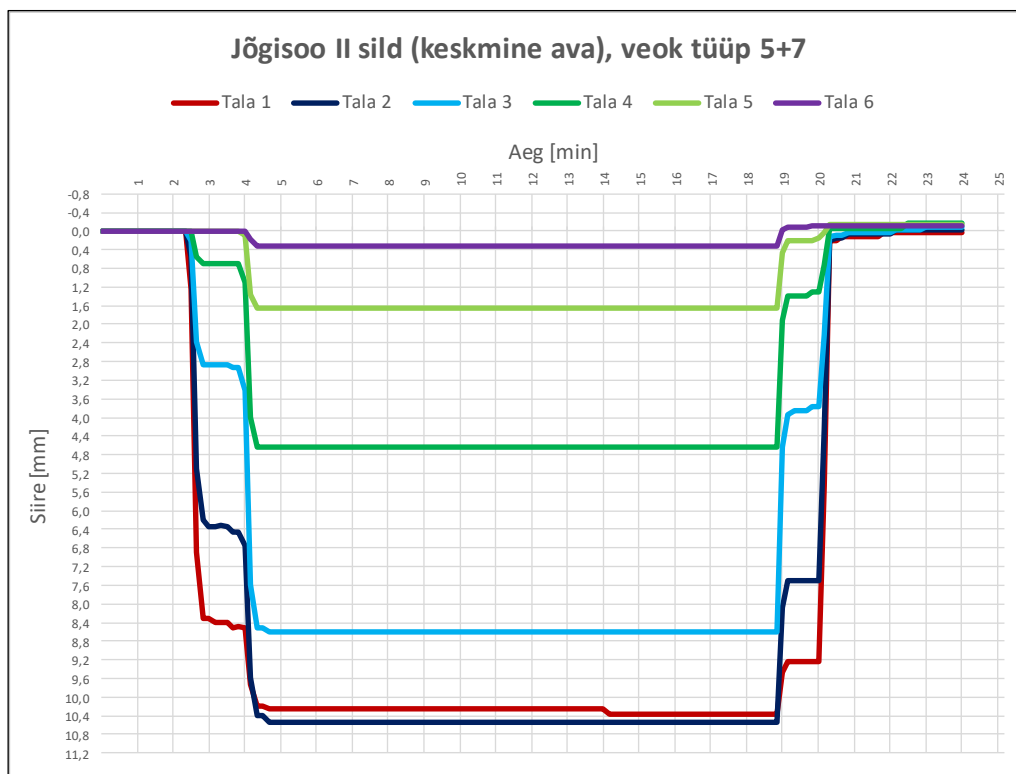
3.2.11. Jõgisoo II sild (keskmise ava)



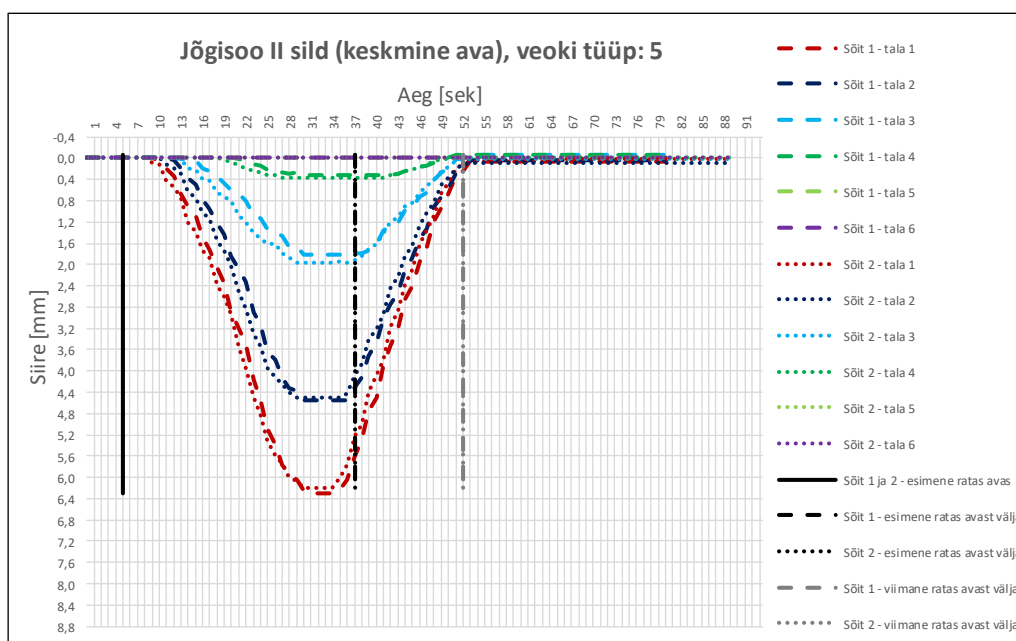
Joonis 82. Jõgisoo II silla (keskmise ava) staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)



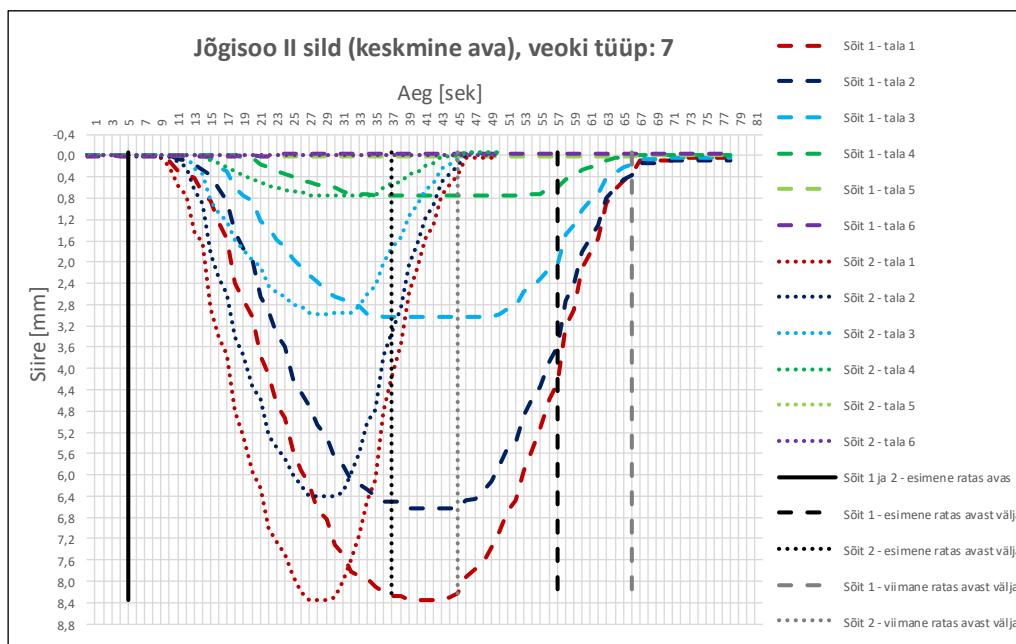
Joonis 83. Jõgisoo II silla (keskmise ava) staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 7)



Joonis 84. Jõgisoo II silla (keskmine ava) staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5+7)



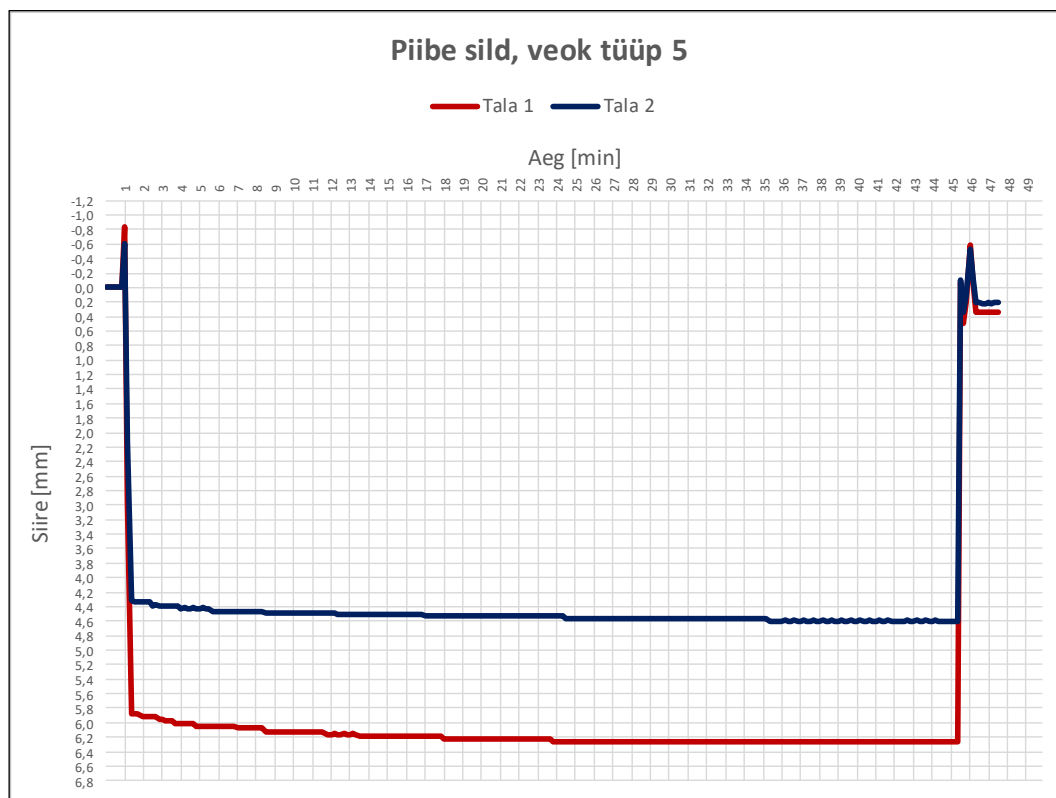
Joonis 85. Jõgisoo II silla (keskmine ava) liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)



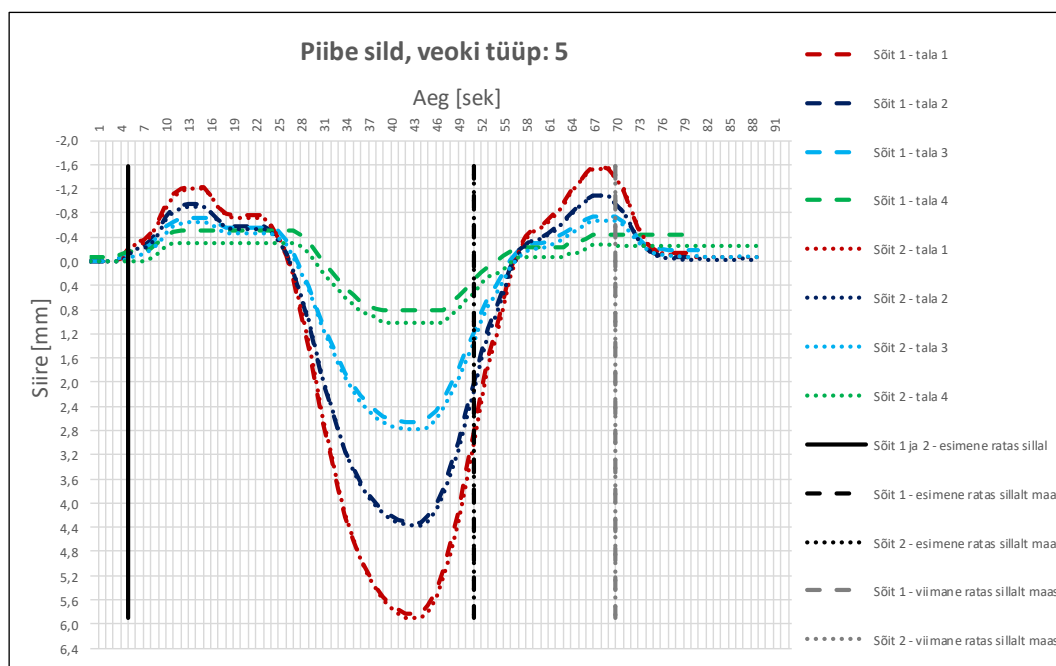
Joonis 86. Jõgisoo II silla (keskmine ava) liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 7)

Sillal pragude avanemist peatalades koormamise käigus ei tuvastatud.

3.2.12. Piibe sild



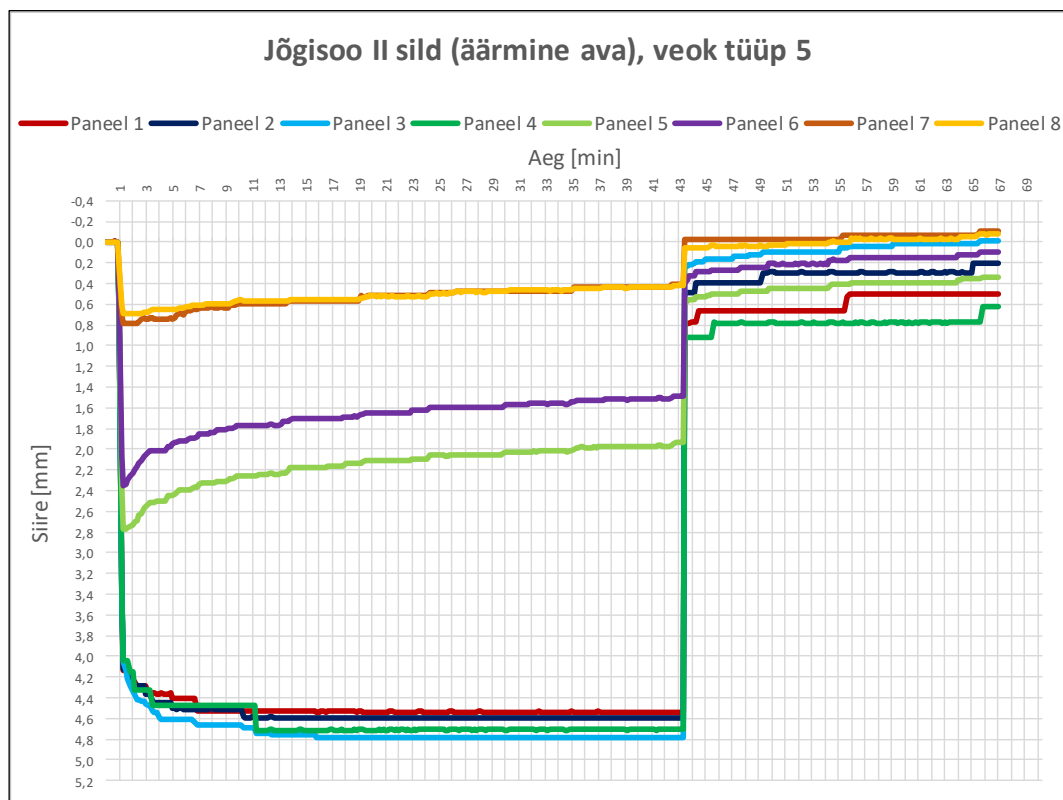
Joonis 87. Piibe silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)



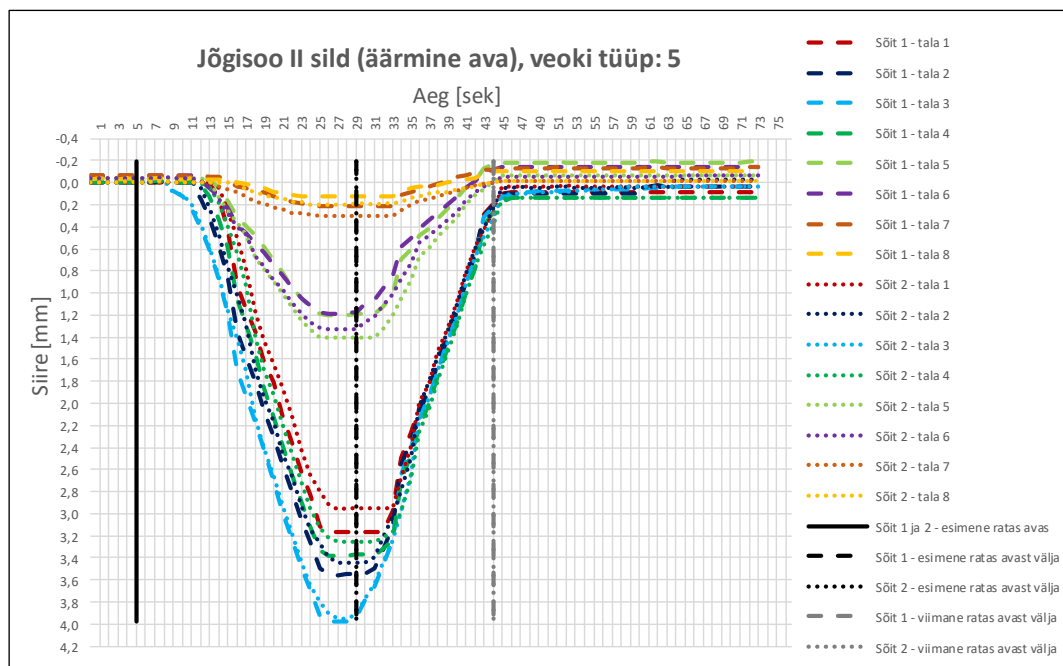
Joonis 88. Piibe silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)

Sillal pragude avanemist peatalades koormamise käigus ei tuvastatud.

3.2.13. Jõgisoo II sild (äärmine ava)



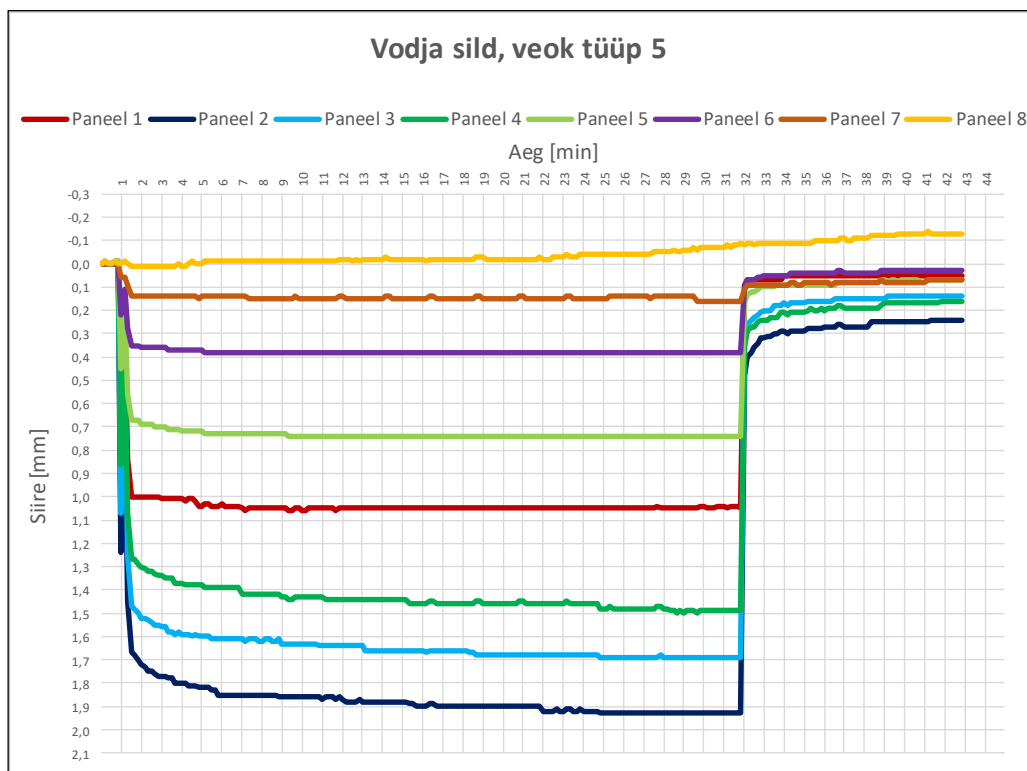
Joonis 89. Jõgisoo II silla (äärmine ava) staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)



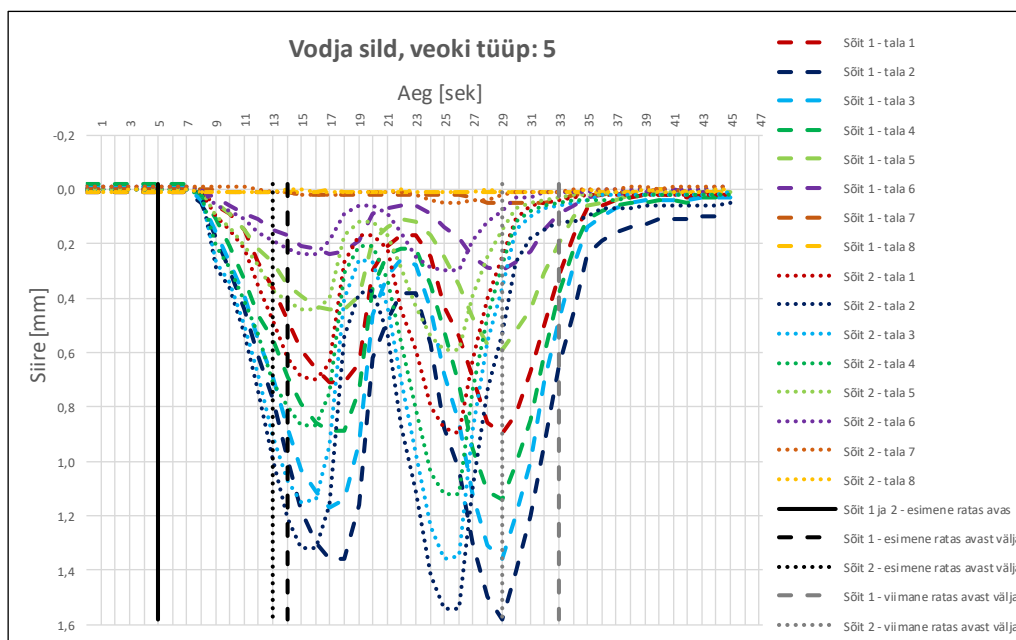
Joonis 90. Jõgisoo II silla (äärmine ava) liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)

Sillal pragude avanemist paneelides koormamise käigus ei tuvastatud.

3.2.14. Vodja sild



Joonis 91. Vodja silla staatilise koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)



Joonis 92. Vodja silla liikuva koormuse mõõtetulemused (veoki tüüp: 5)

Silla paneelide alumise betoonpinna kvaliteet oli niivõrd halb, et pragude võimalikku tekkimist nendes ei olnud võimalik tuvastada.

4. ANALÜÜS

4.1. Katsetulemuste analüüs

4.1.1. Seisev koormus

Sildade mõõdetud peatalade läbipainded korreleerusid suhteliselt hästi arvutatutega ([joonis 93](#) ning [tabelid 40...41](#)). Seejuures olid katsetamise käigus mõõdetud maksimaalsed läbipainded (iga silla enimkoormatud tala/paneel) keskmiselt 9% väiksemad kui arvutatud väärtused.

Katsetulemustest on näha, et enamustel juhtudel (eelkõige talasildade korral) arvutusmeetodid pigem alahindavad koormuse põikjagunemise efekti. Teistest eristusid paneel- ja plaatsillad (Sandra, Valgejõe, Jõgisoo II äärmine ava ja Vodja). Nende puhul on märgata, et koormuste põikjagunemist on arvutustes veidi ülehinnatud. Eriti torkavad silma Valgejõe ja Vodja sild, kus vahetult koormuse all olevatel paneelidel on kuni 30% suuremad läbipainded võrreldes arvutatutega. Samas need paneelid, mille peal veok koormamise ajal ei asunud, omavad arvutuslikega võrreldes oluliselt väiksemaid deformatsioone. Mõlemal mainitud sillal on enamik paneelidevahelisi külgvuuke tühjad ja Valgejõel osaliselt silla halva seisukorra tõttu ka purunenud ning seetõttu on koormuste efektiivne põikjagunemine takistatud. Võib oletada, et antud asjaolu puudutab suurt osa seda tüüpi sildu, mis võib projekteerijatel silla arvutusmudeli koostamise teha suhteliselt keeruliseks.

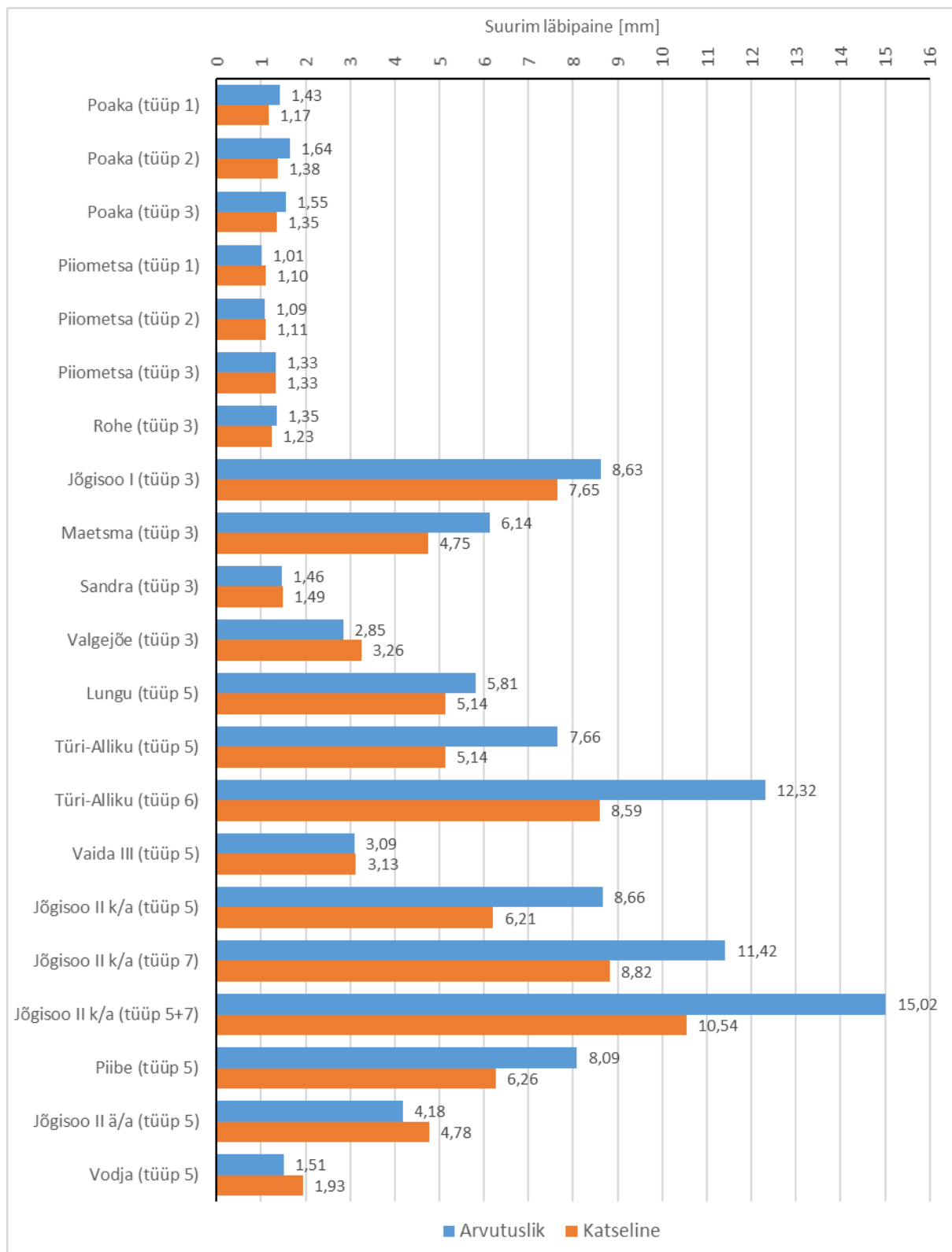
Ühe proovikoormamise protseduur võttis aega orienteeruvalt 1 tunni, millest esimesel pooltunnil paiknes veok sillal ja teise poole tunni jooksul mõõdeti võimalikke jäävdeformatsioone (ilma koormuseta). Üldistades võib väita, et

- koormamise perioodil (20...30 min) suurenesid talade läbipainded suurusjärgus kuni 10% võrra, üksikutel juhtudel ka kuni 20% ([tabel 42](#));
- vaatlusaja lõpuks (15 min peale koormuse eemaldamist) jäid jäävdeformatsioonid enamasti 10% piiridesse, kuid mõnel juhul ulatusid need ka kuni 20%-ni ([tabel 43](#)).

Täpseid põhjusi selgitamiseks osade sildade läbipainete suurenemisi koormamise ajal on raske välja tuua. Ilmselt on see kombinatsioon väikestest deformatsioonidest tugeudel ja paindepragude (ka päris väikeste) mõningasest avanemisest, mistõttu vähenes peakandjate paindejäikus. Samuti võib arvata, et osadel sildadel, kus tõmbearmatuuri kaitsekiht on eraldunud, ei ole enam terasvarda ja betooni vahel ideaalset naket ning nihkumiste korral väheneb paindejäikus. Eriti märgatavad on seejuures juurdekasvud paneelsildade korral, kus muuhulgas ka külgvuugid ilmselt ei toiminud ettenähtud viisil ning ei võimaldanud koormuse efektiivset põikjagunemist. Kuid kõige selle juures tuleb arvestada ka asjaolu, et juurdekasvud olid absoluutväärtuselt suhteliselt väikesed (mõned kümnendikud millimeetrid), mis väikeste läbipainete korral näitavad ka suhteliselt suurt protsentuaalset muutust.

Jäävdeformatsioonide väärtusesse tuleb suhtuda mõningaste reservatsioonidega. Katsetatavaid sildu oli palju ning puudus võimalus need pikaajaliseks seiramiseks sulgeda. Seetõttu ei ole jäävdeformatsioonide väärtused teada pikema ajaperioodi jooksul.

Katsetamisel saadud tulemustest lähtuvalt modifitseeriti sildade lõplike elementide meetodil koostatud arvutusmudeleid (eelkõige koormuste põikjagunemine peakandjate vahel ja nende paindejäikused), mis võeti aluseks järgnevatel jaotistes teostatud analüüsi läbiviimisel.



Joonis 93. Peatalade/paneelide suurimad läbipainded seisva koormuse korral (teoreetiliste ja katseliste võrdlus)

Tabel 40. Sildade arvutuslikud ja katse käigus mõõdetud läbipainded (2018. a katsetatud sillad)

Sild		Tala/paneeli läbipaine [mm]								
		Tüüp 1 (52 t)			Tüüp 2 (60 t)			Tüüp 3 (52 t)		
Nimetus	Tala/paneel	Arvut.	Katsel.	Erinevus	Arvut.	Katsel.	Erinevus	Arvut.	Katsel.	Erinevus
Poaka sild	1. tala	1,43	1,17	-18%	1,64	1,38	-16%	1,55	1,35	-13%
	2. tala	1,38	1,09	-21%	1,59	1,22	-23%	1,39	1,20	-14%
	3. tala	0,71	0,70	-1%	0,82	0,77	-6%	0,75	0,78	4%
	4. tala	0,17	0,28	65%	0,19	0,30	58%	0,18	0,31	72%
	5. tala	-0,04	-0,08	100%	-0,04	-0,01	-75%	-0,04	-0,01	-75%
Piiometsa sild	1. tala	1,01	1,10	9%	1,09	1,11	2%	1,33	1,33	0%
	2. tala	0,79	0,89	13%	0,85	0,91	7%	1,00	1,16	16%
	3. tala	0,53	0,59	11%	0,57	0,60	5%	0,90	0,82	-9%
	4. tala	0,20	0,27	35%	0,22	0,29	32%	0,42	0,44	5%
	5. tala	0,02	0,03	50%	0,02	0,06	200%	0,08	0,13	63%
	6. tala	-0,04	-0,08	100%	-0,04	-0,10	150%	-0,06	-0,07	17%
Rohe sild	1. tala	-	-	-	-	-	-	1,35	1,23	-9%
	2. tala	-	-	-	-	-	-	1,28	1,05	-18%
	3. tala	-	-	-	-	-	-	0,69	0,62	-10%
	4. tala	-	-	-	-	-	-	0,08	0,11	38%
Jõgisoo I sild	1. tala	-	-	-	-	-	-	8,63	7,65	-11%
	2. tala	-	-	-	-	-	-	6,93	6,04	-13%
	3. tala	-	-	-	-	-	-	3,68	3,10	-16%
	4. tala	-	-	-	-	-	-	1,23	1,06	-14%
	5. tala	-	-	-	-	-	-	0,14	0,14	0%
	6. tala	-	-	-	-	-	-	-0,27	0,01	
Maetsma sild	1. tala	-	-	-	-	-	-	6,14	4,75	-23%
	2. tala	-	-	-	-	-	-	1,47	2,03	38%
Sandra sild	1. paneel	-	-	-	-	-	-	1,46	1,49	2%
	2. paneel	-	-	-	-	-	-	1,36	1,37	1%
	3. paneel	-	-	-	-	-	-	1,25	1,20	-4%
	4. paneel	-	-	-	-	-	-	1,13	1,00	-12%
	5. paneel	-	-	-	-	-	-	0,99	0,68	-31%
	6. paneel	-	-	-	-	-	-	0,85	0,59	-31%
	7. paneel	-	-	-	-	-	-	0,73	0,45	-38%
Valgejõe sild	1. paneel	-	-	-	-	-	-	2,85	3,26	14%
	2. paneel	-	-	-	-	-	-	2,32	2,44	5%
	3. paneel	-	-	-	-	-	-	1,90	2,47	30%
	4. paneel	-	-	-	-	-	-	1,50	1,26	-16%
	5. paneel	-	-	-	-	-	-	1,10	0,65	-41%
	6. paneel	-	-	-	-	-	-	0,75	0,26	-65%
	7. paneel	-	-	-	-	-	-	0,55	0,11	-80%
	8. paneel	-	-	-	-	-	-	0,40	0,06	-85%

Tabel 41. Sildade arvutuslikud ja katse käigus mõõdetud läbipained (2019. a katsetatud sillad)

Sild		Tala/paneeli läbipaine [mm]								
		Tüüp 5 (52 t)			Tüüp 6 või 7 (60 t)			Tüüp 5+7 (52+60 t)		
Nimetus	Tala/paneel	Arvut.	Katsel.	Erinevus	Arvut.	Katsel.	Erinevus	Arvut.	Katsel.	Erinevus
Lungu sild	1. tala	5,81	5,14	-12%	-	-	-	-	-	-
	2. tala	4,90	3,79	-23%	-	-	-	-	-	-
	3. tala	3,09	2,36	-24%	-	-	-	-	-	-
	4. tala	1,17	1,03	-12%	-	-	-	-	-	-
	5. tala	-0,05	0,12		-	-	-	-	-	-
Türi-Alliku sild	1. tala	7,66	5,14	-33%	12,32	8,59	-30%	-	-	-
	2. tala	5,75	4,11	-29%	9,29	6,96	-25%	-	-	-
	3. tala	4,08	2,96	-27%	6,69	5,14	-23%	-	-	-
	4. tala	2,17	1,77	-18%	3,64	3,28	-10%	-	-	-
	5. tala	0,28	0,69	146%	0,57	1,39	144%	-	-	-
Vaida III sild	1. tala	3,09	3,13	1%	-	-	-	-	-	-
	2. tala	2,21	2,40	9%	-	-	-	-	-	-
	3. tala	1,55	1,63	5%	-	-	-	-	-	-
	4. tala	0,81	0,81	0%	-	-	-	-	-	-
	5. tala	0,22	0,24	9%	-	-	-	-	-	-
	6. tala	-0,21	-0,05	-76%	-	-	-	-	-	-
Jõgisoo II sild (keskmine ava)	1. tala	8,66	6,21	-28%	11,42	8,82	-23%	12,89	10,37	-20%
	2. tala	6,99	4,88	-30%	9,28	6,61	-29%	15,02	10,54	-30%
	3. tala	3,70	1,95	-47%	4,95	2,88	-42%	13,19	8,61	-35%
	4. tala	1,23	0,45	-63%	1,68	0,74	-56%	8,04	4,64	-42%
	5. tala	0,12	-0,09		0,18	0,00		3,05	1,66	-46%
	6. tala	-0,31	-0,18	-42%	-0,41	-0,15	-63%	-0,39	0,31	
Piibe sild	1. tala	8,09	6,26	-23%	-	-	-	-	-	-
	2. tala	5,77	4,60	-20%	-	-	-	-	-	-
	3. tala	3,26	2,60	-20%	-	-	-	-	-	-
	4. tala	0,93	0,40	-57%	-	-	-	-	-	-
Jõgisoo II sild (äärmine ava)	1. paneel	4,74	4,54	-4%	-	-	-	-	-	-
	2. paneel	4,45	4,60	3%	-	-	-	-	-	-
	3. paneel	4,18	4,78	14%	-	-	-	-	-	-
	4. paneel	3,91	4,71	20%	-	-	-	-	-	-
	5. paneel	3,63	1,94	-47%	-	-	-	-	-	-
	6. paneel	3,37	1,49	-56%	-	-	-	-	-	-
	7. paneel	3,11	0,41	-87%	-	-	-	-	-	-
	8. paneel	2,88	0,42	-85%	-	-	-	-	-	-
Vodja sild	1. paneel	1,37	1,05	-23%	-	-	-	-	-	-
	2. paneel	1,51	1,93	28%	-	-	-	-	-	-
	3. paneel	1,56	1,69	8%	-	-	-	-	-	-
	4. paneel	1,42	1,49	5%	-	-	-	-	-	-
	5. paneel	1,14	0,74	-35%	-	-	-	-	-	-
	6. paneel	0,85	0,38	-55%	-	-	-	-	-	-
	7. paneel	0,59	0,16	-73%	-	-	-	-	-	-
	8. paneel	0,40	-0,09		-	-	-	-	-	-

Tabel 42. Talade/paneelide läbipainde juurdekasvud koormamise ajal

Sild	Tala/paneeli ¹⁾ läbipainde juurdekasv koormamise ajal ²⁾					
	Tüüp 1 (52 t)	Tüüp 2 (60 t)	Tüüp 3 (52 t)	Tüüp 5 (52 t)	Tüüp 6 või 7 (60 t)	Tüüp 5+7 (52+60 t)
Poaka sild	2%	2%	5%	-	-	-
Piiometsa sild	4%	0%	5%	-	-	-
Rohe sild	-	-	13%	-	-	-
Jõgisoo I sild	-	-	1%	-	-	-
Maetsma sild	-	-	0%	-	-	-
Sandra sild	-	-	12%	-	-	-
Valgejõe sild	-	-	21%	-	-	-
Lungu sild	-	-	-	10%	-	-
Türi-Alliku sild	-	-	-	2%	4%	-
Vaida III sild	-	-	-	15%	-	-
Jõgisoo II sild (k/a)	-	-	-	0%	3%	1%
Piibe sild	-	-	-	7%	-	-
Jõgisoo II sild (ä/a)	-	-	-	18%	-	-
Vodja sild	-	-	-	16%	-	-
Märkused:						
1) Siinkohal on esitatud info suurima läbipaindega tala/paneeli kohta.						
2) Mõõteperioodiks on võetud 20...30 min.						

Tabel 43. Talade/paneelide jäävdeformatsioonid

Sild	Tala/paneeli ¹⁾ jäävdeformatsioon ²⁾					
	Tüüp 1 (52 t)	Tüüp 2 (60 t)	Tüüp 3 (52 t)	Tüüp 5 (52 t)	Tüüp 6 või 7 (60 t)	Tüüp 5+7 (52+60 t)
Poaka sild	1%	2%	-1%	-	-	-
Piiometsa sild	3%	0%	5%	-	-	-
Rohe sild	-	-	21%	-	-	-
Jõgisoo I sild	-	-	15%	-	-	-
Maetsma sild	-	-	-4%	-	-	-
Sandra sild	-	-	7%	-	-	-
Valgejõe sild	-	-	11%	-	-	-
Lungu sild	-	-	-	9%	-	-
Türi-Alliku sild	-	-	-	2%	3%	-
Vaida III sild	-	-	-	21%	-	-
Jõgisoo II sild (k/a)	-	-	-	0%	1%	0%
Piibe sild	-	-	-	5%	-	-
Jõgisoo II sild (ä/a)	-	-	-	0%	-	-
Vodja sild	-	-	-	12%	-	-
Märkused:						
1) Siinkohal on esitatud info suurima läbipaindega tala/paneeli kohta.						
2) Jäävdeformatsioone mõõdeti 15 min peale koormuse eemaldamist.						

4.1.2. Liikuv koormus

Liikuva koormusega läbi viidud katsete eesmärgiks oli uurida sillateki käitumist võimalikult erinevates koormusolukordades ehk veoki erinevate asukohtade korral. Eksperimendi käigus mõõdeti sillateki vertikaalsiirdeid (siirdeanduritega iga 1,0 sekundi tagant) aeglaselt liikuvast (kvaasistaatilisest) koormusest. Veok ületas silda kiirusel 2...5 km/h katsejuhi poolt määratud trajektoorigi (veoki asukoht silla põiklõikes ühtis veoki asukohaga seisval koormusel) ning iga ettenähtud veoki tüübiga teostati kaks katset. Kahest mõõtmisest valiti analüüsimiseks reeglina see, millel veoki kiirus oli väiksem, sest niimoodi saadi rohkem mõõtetulemusi.

Liikuva koormusega teostatud katsed andsid lisainfot silla staatikalise arvutusskeemi kohta (nt seda, kas monteeritavad lihttalad töötavad tänu sillateki plaadile osaliselt jätkuvtaladena või mitte). Antud tulemused võimaldasid hinnata, kas lõplike elementide abil koostatud silla kolmemõõtmeline arvutusmudel käitus eelduste kohaselt.

Mõõdetud siirded liikuvast koormusest on sildade ja nende peakandjate kaupa esitatud juba [katsetulemuste jaotises](#). Siinkohal on andmed puhastatud selliselt, et vaadeldakse

- ajahetke alates sellest, kui veoki esimene ratas satub avasse ($t_1 = 0$) kuni viimane ratas on avast väljas (sõltuvalt sildepikkusest ja veoki liikumiskiirusest $t_2 = 19...59$ sek);
- kõige rohkem deformeerunud peakandjat.

Liikuvat koormust iseloomustavad tähtsamad parameetrid on koondatud [tabelisse 44](#).

Tabel 44. Liikuva koormuse koondandmed

Sild	Raskeveoki tüüp	Veoki tegelik mass [kg]	Veoki keskm. liikumiskiirus v [m/sek]	Silla koormamise kestus t_2-t_1 [sek]	Veoki Täpsemad andmed
Poaka sild	Tüüp 1	58 980	0,807	34	Joonis 38
	Tüüp 2	68 050	1,098	25	
	Tüüp 3	58 490	0,838	28	
Piiometsa sild	Tüüp 1	52 590	0,773	32	Joonis 39
	Tüüp 2	58 050	0,952	26	
	Tüüp 3	50 800	1,101	19	
Rohe sild	Tüüp 3	50 620	0,875	27	Joonis 40
Jõgisoo I sild	Tüüp 3	62 180	1,026	35	Joonis 41
Sandra sild	Tüüp 3	55 160	0,957	25	Joonis 43
Valgejõe sild	Tüüp 3	60 970	0,772	24	Joonis 44
Lungu sild	Tüüp 5	53 470	0,918	28	Joonis 45
Türi-Alliku sild	Tüüp 5	55 450	0,966	27	Joonis 46
	Tüüp 6	63 980	0,594	35	
Vaida III sild	Tüüp 5	51 810	0,730	31	Joonis 47
Jõgisoo II sild (k/a)	Tüüp 5	53 010	0,785	44	Joonis 48
	Tüüp 7	62 570	0,489	59	
Jõgisoo II sild (ä/a)	Tüüp 5	52 530	0,751	38	Joonis 50
Vodja sild	Tüüp 5	50 510	0,640	28	Joonis 51

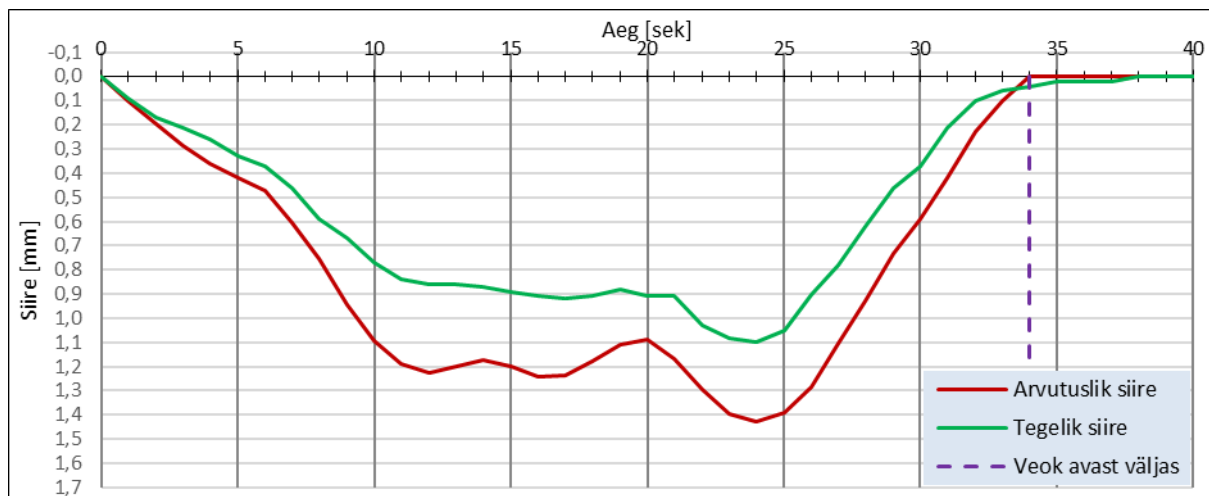
Analüüsis ([joonised 94...111](#)) eeldati veoki ühtlast liikumist kogu sildeavas paiknemise jooksul. Graafikutele on roheline joonega märgitud tala keskpunkti vertikaalsiire iga 1 sekundi möödumisel, mis mõõdeti katse käigus. Punase joonega on graafikutel näidatud teoreetiline siire veoki sama asukoha korral. Teoreetilise siirde arvutamisel võeti aluseks arvutusmodel, mis on kalibreeritud lähtuvalt staatilise koormamise tulemustest. Analüüsis keskenduti lihttalakonstruktsioonidele, mis on käesoleva uurimistöö põhifookuseks.

Peakandjate suurimaid läbipaindeid uurides selgub, et keskmiselt olid siirded liikuva koormuse korral 18% väiksemad kui arvutusmodel eeldas ning 11% väiksemad võrreldes seisva koormuse korral tekkinud siiretega ([tabel 45](#)). Need on oodatavad tulemused, sest teoreetilised arvutusmodelid on tegeliku olukorraga võrreldes mõnevõrra konservatiivsemad. Seisva koormuse korral mõõdeti ka mõningane deformatsioonide juurdekasv mõõteperioodi jooksul, mis liikuva koormuse korral ei pruukinud avalduda. Samuti võib vähesel määral tulemusi mõjutada ka asjaolu, et koormuse põiksuunalist paiknemist sillal on liikuva veoki korral raske täpselt tagada ja ka siin võisid esineda teatavad kõrvalekalded.

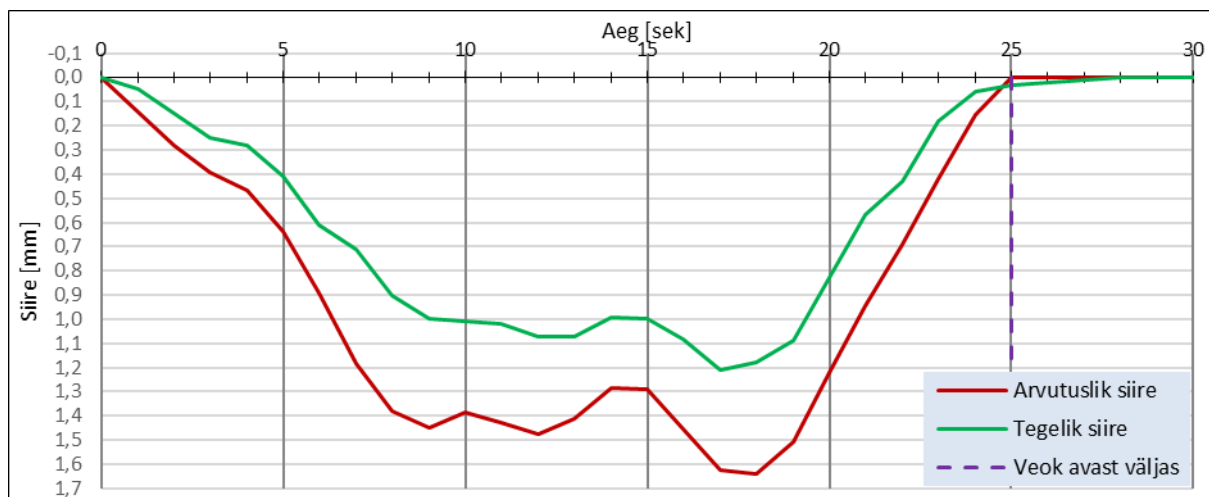
Lihttalasildade teki siirdekäitumine on väga sarnane lihttala lineaarse teoreetilise siirdekäitumisega ja mõõdetud siirdekõverate üldkujud langevad hästi kokku teoreetilistega. Samuti mõõdeti maksimaalsed siirded selliste veokite asukohtade korral, nagu seda eeldasid teoreetilised valemid. Katsetulemuste graafikutelt on selgelt näha, et mitmesildelistel lihttalasildadel on võimalik jätkuvtalaefekt (tulenevalt nt ilma vuukideta pealevalust) suhteliselt väike ja selle võib piirulukorras hüljata.

Tabel 45. Peakandjate suurimad teoreetilised ja katselised läbipainded

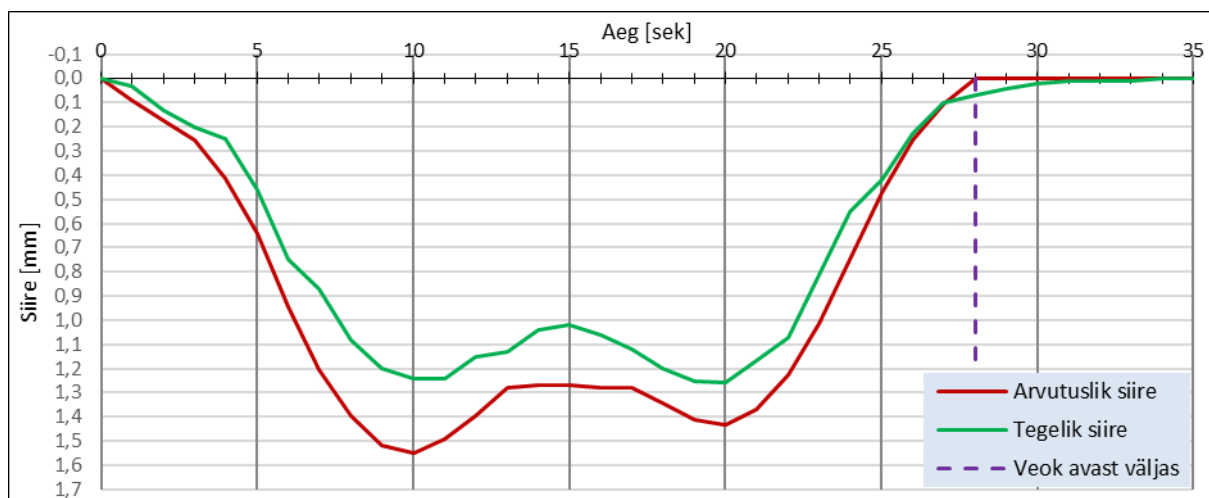
Sild	Raske- veoki tüüp	Tala/paneeli suurim läbipaine [mm]			Läbipainete võrdlus	
		Teoreeti- line δ_1	Katseline – seisev koormus δ_2	Katseline – liikuv koormus δ_3	$\frac{(\delta_3 - \delta_1)}{\delta_1} 100\%$	$\frac{(\delta_3 - \delta_2)}{\delta_2} 100\%$
Poaka sild	Tüüp 1	1,43	1,17	1,10	-23%	-6%
	Tüüp 2	1,64	1,38	1,21	-26%	-12%
	Tüüp 3	1,55	1,35	1,26	-19%	-7%
Piiometsa sild	Tüüp 1	1,01	1,10	0,97	-4%	-12%
	Tüüp 2	1,09	1,11	1,07	-2%	-4%
	Tüüp 3	1,33	1,33	1,16	-13%	-13%
Rohe sild	Tüüp 3	1,35	1,23	1,05	-22%	-15%
Jõgisoo I sild	Tüüp 3	8,63	7,65	7,12	-17%	-7%
Sandra sild	Tüüp 3	1,46	1,49	1,32	-10%	-11%
Valgejõe sild	Tüüp 3	2,85	3,26	2,39	-16%	-27%
Lungu sild	Tüüp 5	5,81	5,14	4,69	-19%	-9%
Türi-Alliku sild	Tüüp 5	7,66	5,14	4,88	-36%	-5%
	Tüüp 6	12,32	8,59	8,57	-30%	0%
Vaida III sild	Tüüp 5	3,09	3,13	2,18	-29%	-30%
Jõgisoo II sild (k/a)	Tüüp 5	8,66	6,21	6,29	-27%	1%
	Tüüp 7	11,42	8,82	8,36	-27%	-5%
Jõgisoo II sild (ä/a)	Tüüp 5	4,18	4,78	3,98	-5%	-17%
Vodja sild	Tüüp 5	1,51	1,93	1,58	5%	-18%



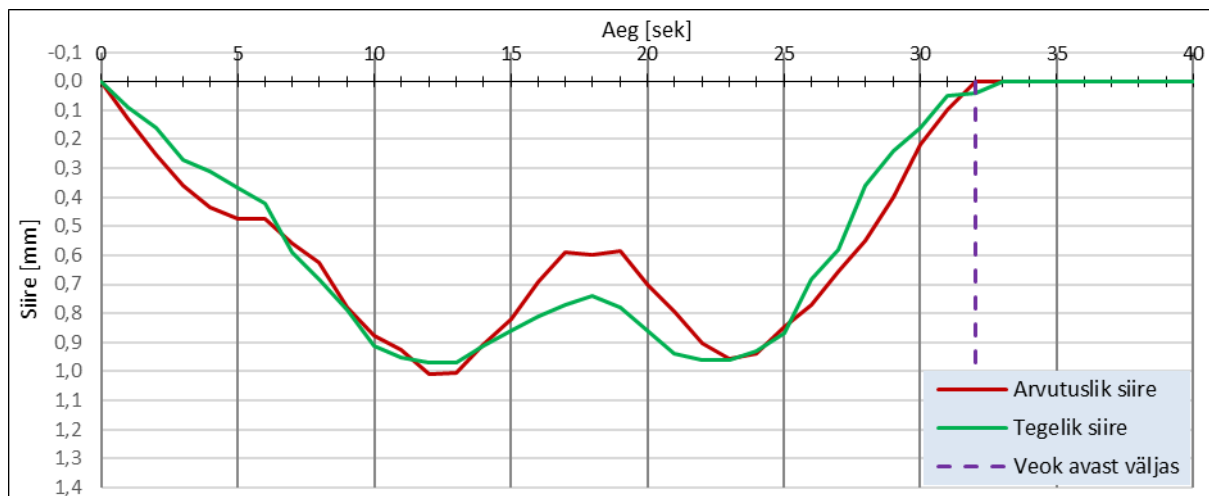
Joonis 94. Poaka sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 1)



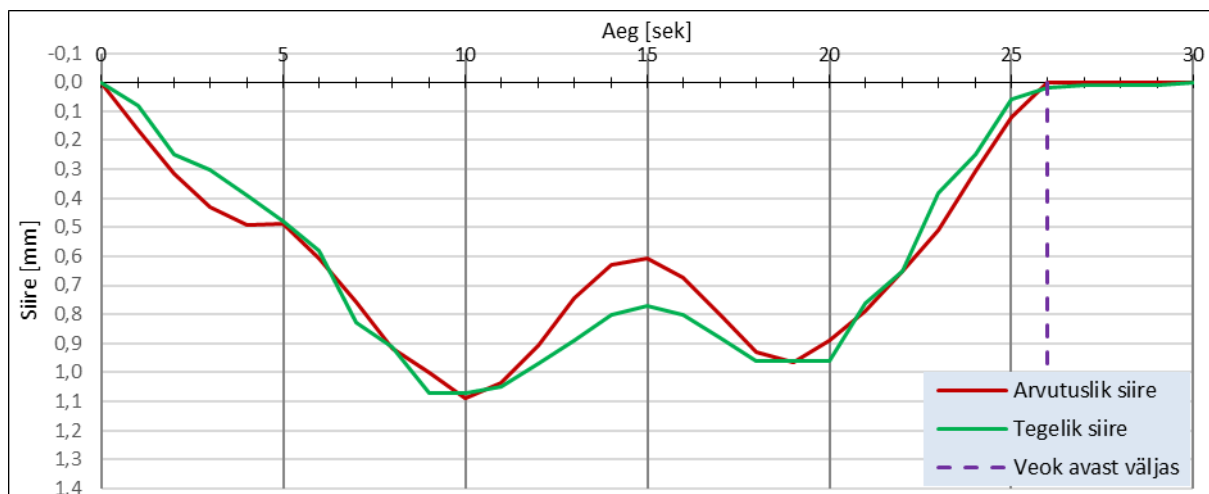
Joonis 95. Poaka sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 2)



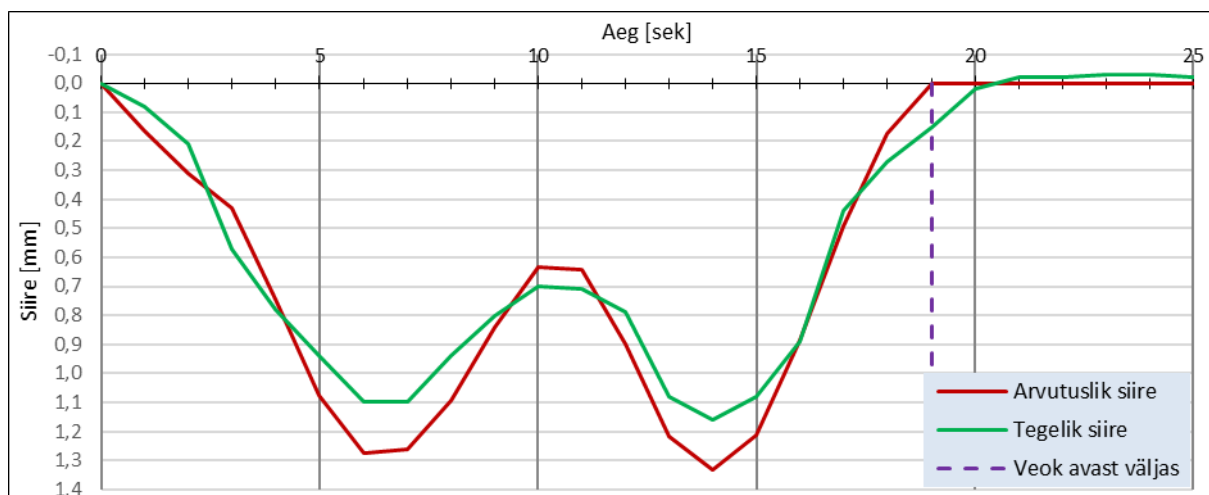
Joonis 96. Poaka sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 3)



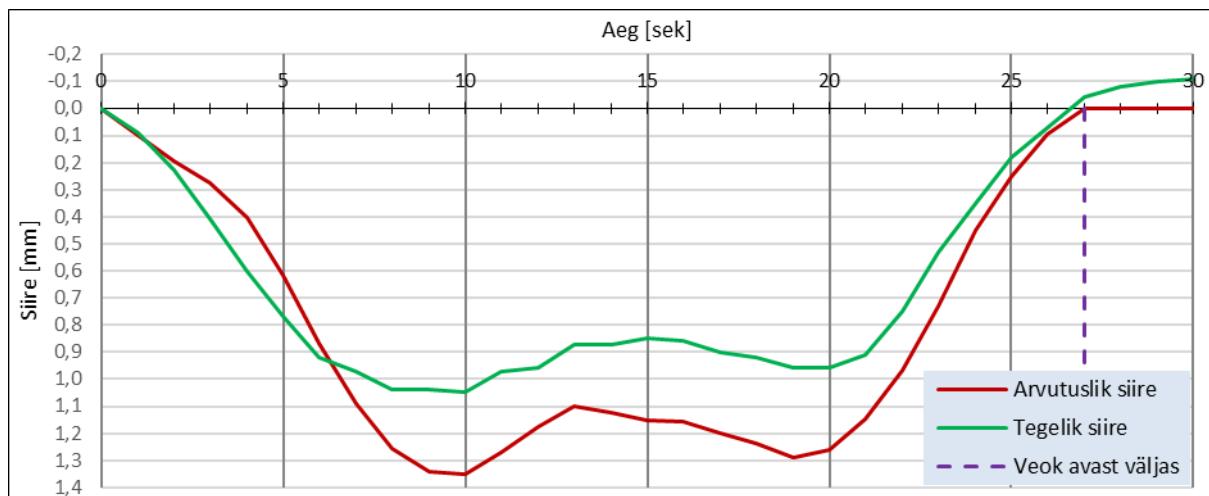
Joonis 97. Piiometsa sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 1)



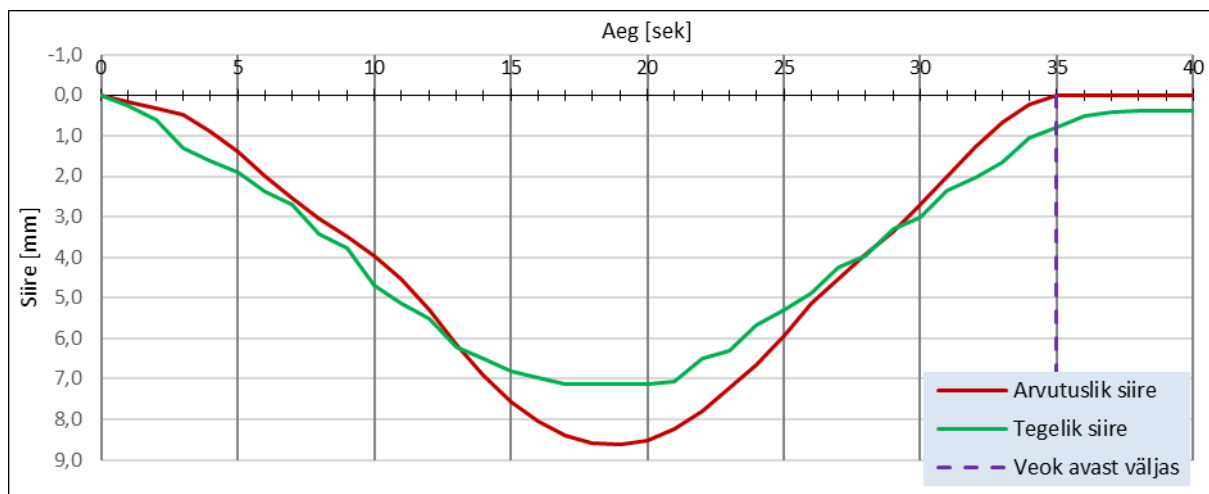
Joonis 98. Piiometsa sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 2)



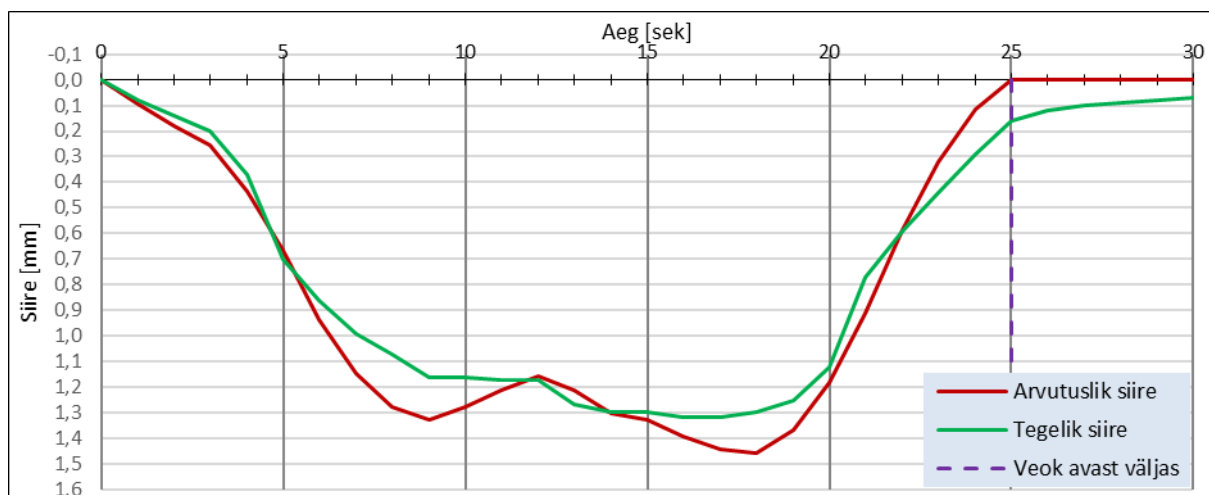
Joonis 99. Piiometsa sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 3)



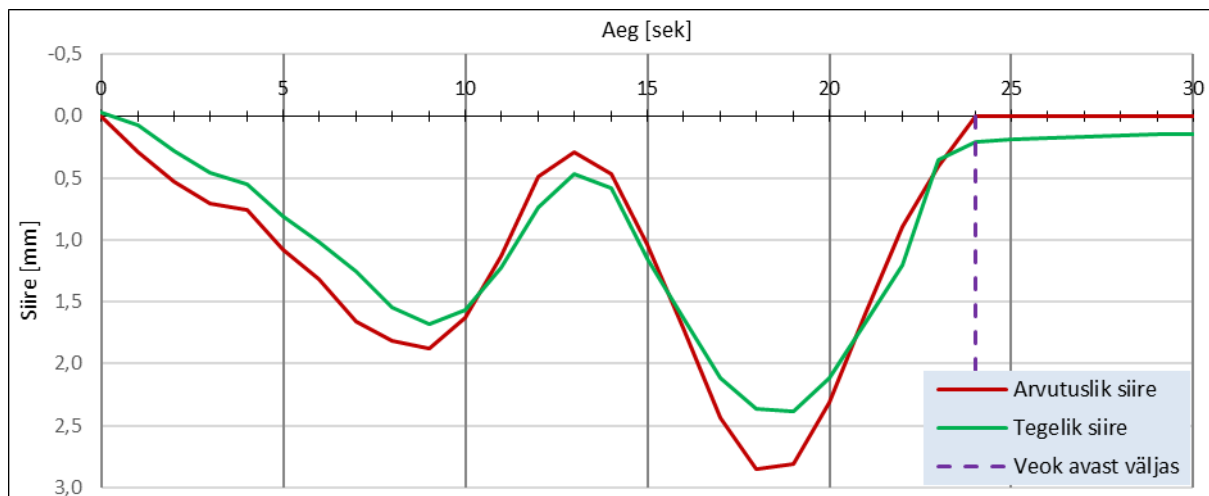
Joonis 100. Rohe sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 3)



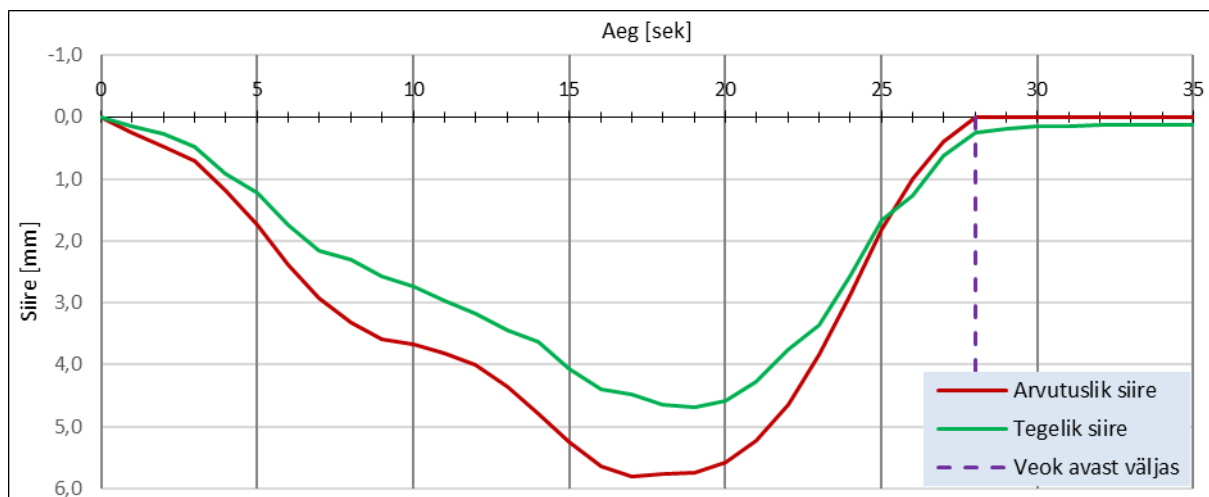
Joonis 101. Jõgisoo I sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 3)



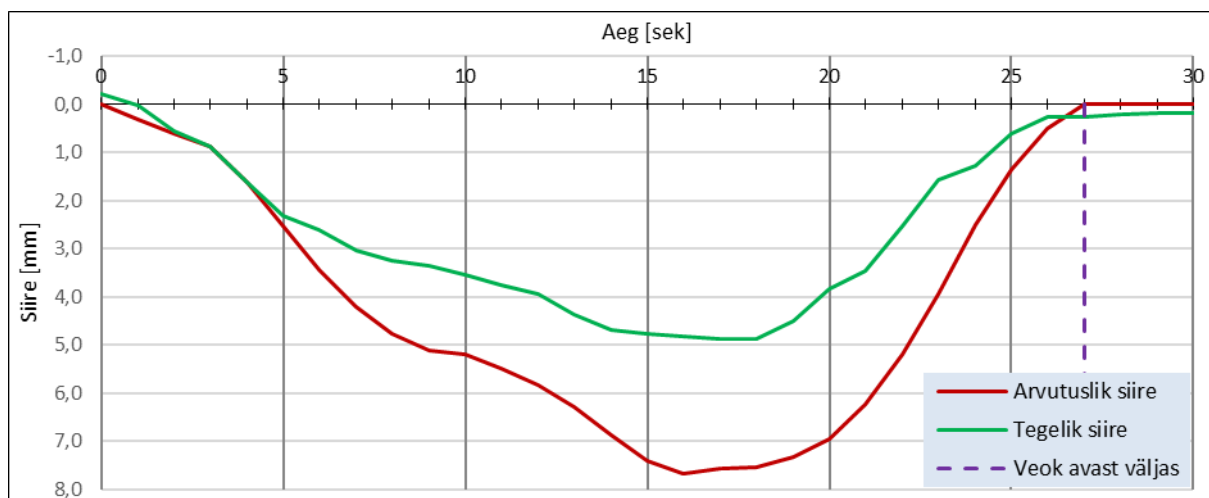
Joonis 102. Sandra sild – enimkoormatud paneeli läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 3)



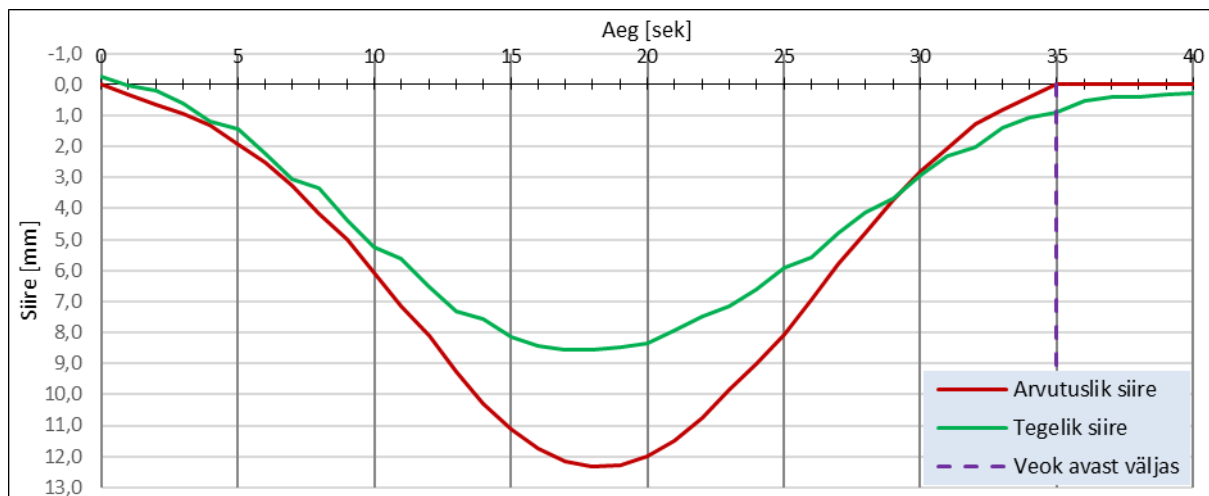
Joonis 103. Valgejõe sild – enimkoormatud paneeli läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 3)



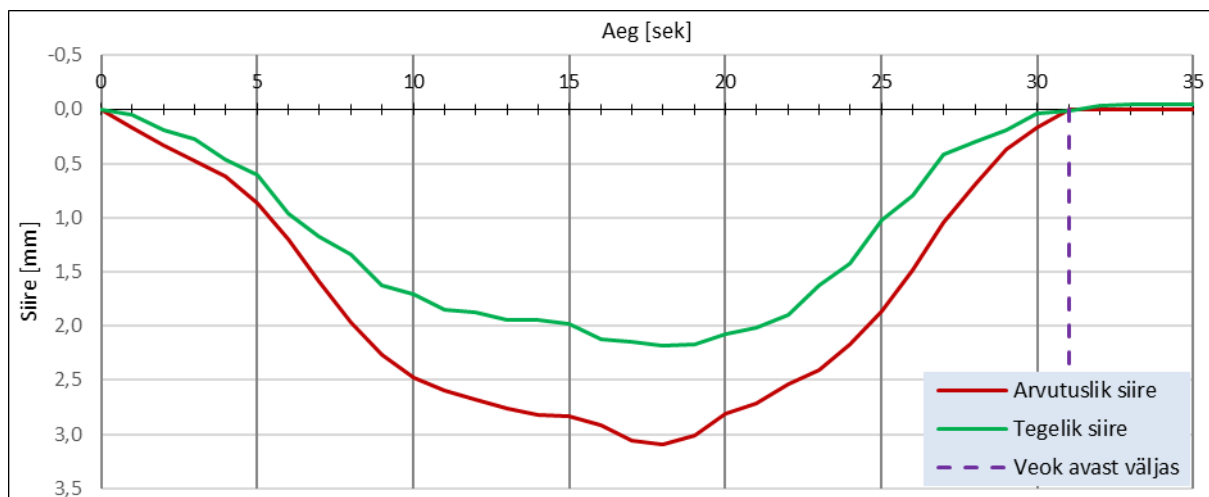
Joonis 104. Lungu sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 5)



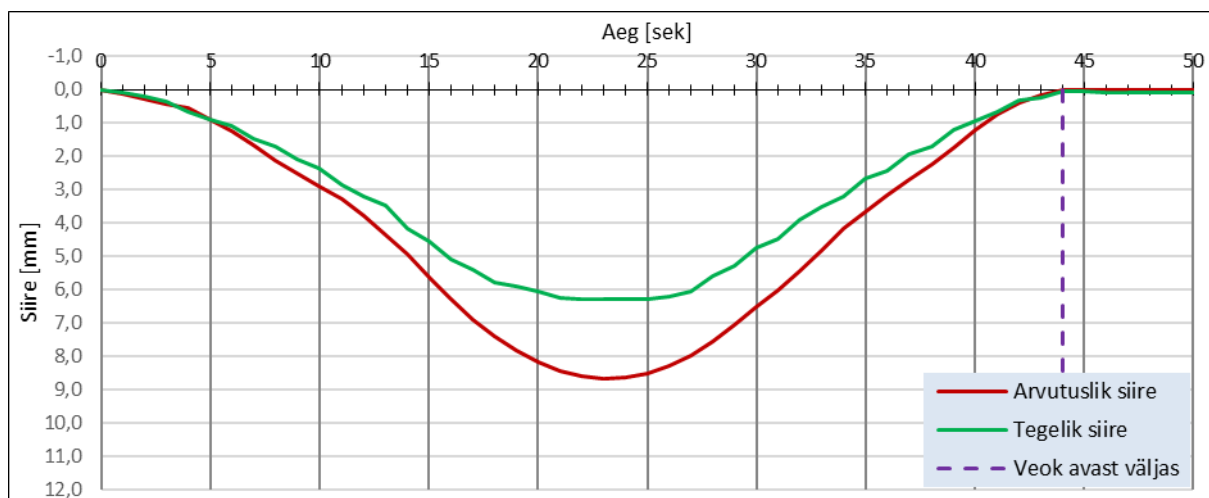
Joonis 105. Türi-Alliku sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 5)



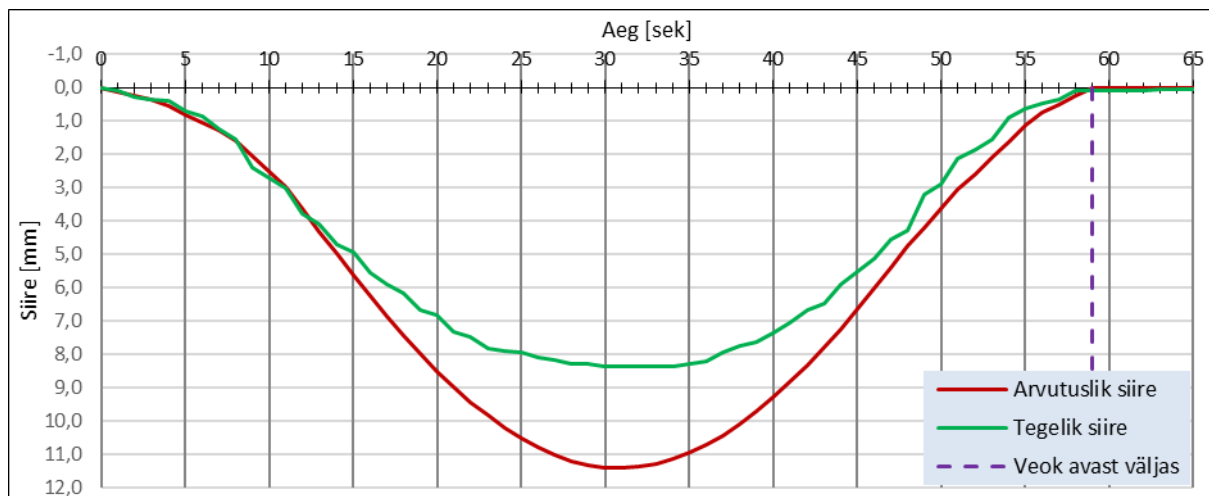
Joonis 106. Türi-Alliku sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 6)



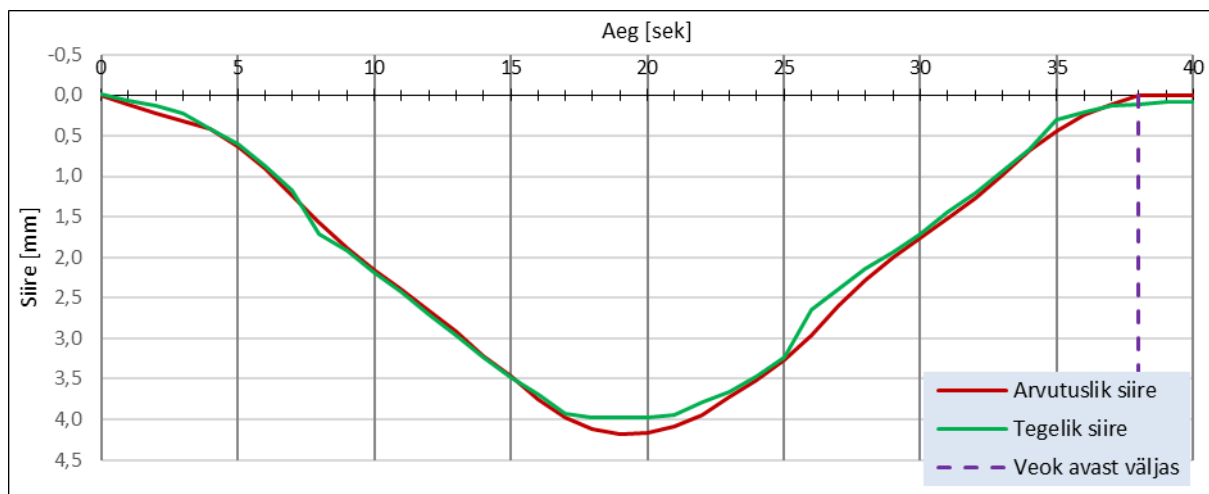
Joonis 107. Vaida III sild – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 5)



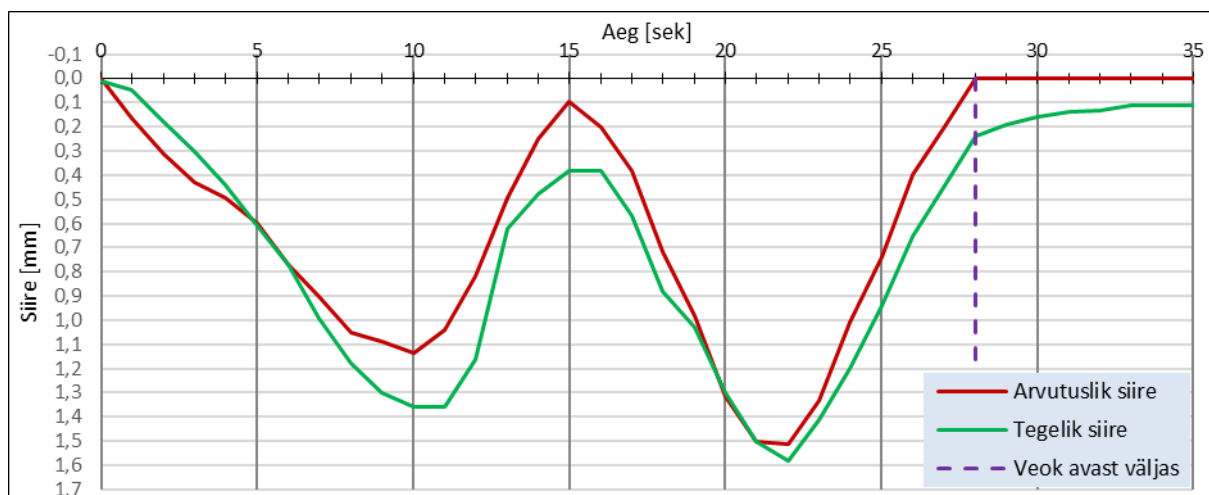
Joonis 108. Jõgisoo II sild (keskmise ava) – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 5)



Joonis 109. Jõgisoo II sild (keskmise ava) – enimkoormatud tala läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 7)



Joonis 110. Jõgisoo II sild (äärmise ava) – enimkoormatud paneeli läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 5)



Joonis 111. Vodja sild – enimkoormatud paneeli läbipaine ava keskel (veoki tüüp: 5)

Üldise statistika huvides on [tabelis 46](#) ära näidatud ka minimaalsed, maksimaalsed ja erinevad keskmised väärtused. Vastav info on kogutud iga silla suurima läbipaindega tala kõikide lugemite hulgast ehk „sammuga“ 1 sekund. Reeglina on suurimad ekstreemumid pärit nendest koormusolukordadest, kui veoki esimene ratas oli just avasse jõudnud või viimane ratas oli just avast väljumas – seetõttu olid siirded talade keskkohas nendel ajahetkedel minimaalsed ja ka väikesed erinevused teoreetiliste ning katseliste tulemuste vahel tähendasid absoluutväärtuselt küll väikest, kuid protsentuaalset suurt erinevust. Seetõttu on tabelis kaldjoone taga näidatud ka selle koormamisperioodi statistilised näitajad, kust on maha arvatud ajaliselt esimese ja viimase veerandi mõõtetulemused.

Tabel 46. Enimkoormatud talade/paneelide suhteline erinevus kvaasistaatiliste katsetulemuste ja teoreetiliste tulemuste vahel

Sild	Raskeveoki tüüp	Suhteline erinevus kvaasistaatiliste katsetulemuste ja teoreetiliste tulemuste vahel (suurima koormusega talal) ¹⁾			
		Mediaan	Aritm. keskm.	Min.	Maks.
Poaka sild	Tüüp 1	-26% / -26%	-27% / -25%	-56% / -30%	-11% / -16%
	Tüüp 2	-32% / -27%	-35% / -28%	-66% / -40%	-22% / -22%
	Tüüp 3	-18% / -17%	-20% / -17%	-67% / -28%	-4% / -11%
Piiometsa sild	Tüüp 1	0% / 5%	-5% / 10%	-50% / -4%	33% / 33%
	Tüüp 2	-1% / 7%	-4% / 10%	-52% / -2%	27% / 27%
	Tüüp 3	-11% / -12%	-5% / -7%	-52% / -14%	56% / 11%
Rohe sild	Tüüp 3	-22% / -23%	-12% / -22%	-28% / -26%	50% / -11%
Jõgisoo I sild	Tüüp 3	2% / -12%	27% / -7%	-17% / -17%	356% / 18%
Sandra sild	Tüüp 3	-8% / -7%	0% / -6%	-22% / -16%	147% / 5%
Valgejõe sild	Tüüp 3	-13% / -5%	-7% / 4%	-76% / -25%	64% / 64%
Lungu sild	Tüüp 5	-22% / -22%	-18% / -23%	-46% / -31%	59% / -18%
Türi-Alliku sild	Tüüp 5	-35% / -33%	-35% / -34%	-93% / -45%	2% / -28%
	Tüüp 6	-21% / -27%	-13% / -25%	-94% / -31%	162% / -12%
Vaida III sild	Tüüp 5	-30% / -30%	-36% / -29%	-77% / -33%	-20% / -25%
Jõgisoo II sild (k/a)	Tüüp 5	-24% / -25%	-20% / -23%	-52% / -29%	35% / -13%
	Tüüp 7	-21% / -22%	-19% / -21%	-60% / -27%	17% / -12%
Jõgisoo II sild (ä/a)	Tüüp 5	-3% / -2%	-5% / -2%	-40% / -11%	24% / 2%
Vodja sild	Tüüp 5	19% / 22%	29% / 47%	-70% / -1%	291% / 291%

Märkused:
1) Kaldjoone ees on näidatud kogu koormamisperioodi ja taga selle koormamisperioodi statistilised näitajad, kust on maha arvatud ajaliselt esimese ja viimase veerandi mõõtetulemused.

4.2. Katsetatud sildade kontrollarvutused

Kande- ja kasutuspiirseisundi arvutustes on aluseks võetud eurokoodeksid [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43] ja [44]. Koormustulemite leidmiseks koostati tarkvaraga Autodesk Robot Structural Analysis Professional (2019) igale sillale kolmemõõtmeline lõplike elementide meetodil baseeruv arvutusmudel, mis kalibreeriti vastavalt tegelikele katsetulemustele. Seetõttu erinevad lõplikud arvutustulemused mõnevõrra esialgsetest (teostatud enne koormuskatseid), kuna silla eelduslik ja tegelik käitumine koormusolukorras ei pruugi alati kokku langeda.

Järgnevas kahes jaotises on liikluskoormusena kasutatud 52 t veokeid (tüüp 5). Korraga on sillatekile paigutatud 2 veokit kõrvuti ning selliselt, et koormustulemid (paindemoment, põikjõud jne) oleksid kõige ekstreemsemad. Seetõttu asub üks veokitest võimalikult serva lähedal (20 cm kaugusel servaprussist, piirdest vms) ja teine vahetult esimese veoki kõrval (kahe veoki kaugus teineteisest on 1 m mõõdetuna rataste telgedest). Enamasti paiknevad veokid sillatekil mõnevõrra soodsamalt (nt sümmeetriliselt silla pikitelje suhtes), kuid põhimõtteliselt ei saa välistada ka kõige ebasoodsamat paigutust.

Kuna analüüs sisaldab suhteliselt palju informatsiooni, siis on tähtsamate tulemuste esiletoomiseks kasutatud järgmist värvide süsteemi:

- roheline – nõuded on täidetud (vähemalt 100%);
- punane – nõuded on täidetud vähem kui 90% ulatuses;
- kollane – nõuded on täidetud 90% kuni 99% ulatuses.

4.2.1. Arvutused kandepiirseisundis

Sildade vastavust kandepiirseisundi²⁹ nõuetele analüüsiti sillateki peakandjates tekkivate tähtsaimate sisejõudude – paindemoment ja põikjõud – kontrollimise abil. Arvutustulemuste koond on esitatud tabelis 47, mis on mõnevõrra pikemalt sisejõudude kaupa lahti selgitatud tabelites 48...49.

Muutuvkoormuste (raskeveoki tüüp 5) korral kasutati koormuse osavarutegurit 1,50 (kuna tegu on eurokoodeksis kirjeldatud nn muu muutuvkoormusega, mistõttu ei ole osavaruteguri 1,35 kasutamine põhjendatud) ja alaliskoormustel 1,35.

Kontrollarvutused näitasid, et:

- põikjõukandevõimega esines vaid ühel sillal väikseid probleeme (puudujääk 5%);
- paindekandevõime osas ei ole kuuel sillal nõuded tagatud, kusjuures puudujääk on vahemikus 5...15%.

²⁹ Kandepiirseisund – seisund, mis kaasneb konstruktsiooni varisemise või muu sarnase purunemisega.

Tervikuna võib väita, et kaasaegsete arvutusmeetodite alusel arvutatud kandevõime on üldjuhul tagatud. Esineb küll nõudeid, mis ei ole täidetud, kuid puudujääk ei ole suur ning seejuures tuleks arvesse võtta ka järgnevaid pehmeid asjaolusid:

- vastavalt uuringu lähteülesandele on analüüsimiseks kasutatavad kontrollarvutused teostatud projektis või tüüpikataloogis toodud materjalide andmete põhjal, kuid näiteks betooni mõõdetud survetugevus ületas enamustel sildadel oluliselt projektijärgset näitajat;
- lisaprobleeme on tekitanud aastate jooksul lisandunud katendikiht, mis mõnel juhul suurendab omakaalu arvestatavalt võrreldes esialgse olukorraga;
- veokid paigutati võimalikult sillateki servale ja teineteisele suhteliselt lähedale – selline paigutus on teoreetiliselt küll võimalik, kuid ekspluatatsioonis väga vähetõenäoline.

Teiselt poolt esineb osadel sildadel ka kahjustusi, mis kandevõimet omakorda vähendavad. Seega tuleb vastavalt vajadusele määrata iga silla kandevõime eraldi, võttes arvesse ümberehitusest tingitud asjaolusid, materjalide omaduste muutumist ajas ja konstruktsioonide kahjustusi.

Tabel 47. Kandepiir seisundis teostatud kontrollarvutuste koondtabel

Sild		Nõude täidetud [%]	
		Paindekandevõime (M_{Rd}/M_{Ed})×100%	Põikjõukandevõime (Q_{Rd}/Q_{Ed})×100%
Poaka sild		85	165
Piiometsa sild		114	132
Rohe sild		123	218
Jõgisoo I sild		100	101
Maetsma sild	ava	95	129
	tugi/konsool	92	179
Sandra sild		219	342
Valgejõe sild		94	101
Lungu sild		105	151
Türi-Alliku sild		86	109
Vaida III sild		164	198
Jõgisoo II sild (keskmise ava)		95	95
Piibe sild	ava	89	I/P ¹⁾
	tugi/konsool	94	I/P ¹⁾
Jõgisoo II sild (äärmise ava)		132	284
Vodja sild		193	717
Märkused: 1) I/P – detailse kontrolli teostamiseks info puudub (seotud puuduliku projektdokumentatsiooniga).			

Alljärgnevat tabelites kasutatud tähistel selgitused:

- $M_{Ek,1}$ – normatiivne paindemoment silla omakaalust;
- $M_{Ek,2}$ – normatiivne paindemoment muutuvkoormusest (kaks 52 t veokit kõrvuti, tüüp 5);
- M_{Ek} – normatiivne summaarne paindemoment;
- $M_{Ed,1}$ – arvutuslik paindemoment silla omakaalust;
- $M_{Ed,2}$ – arvutuslik paindemoment muutuvkoormusest (kaks 52 t veokit kõrvuti, tüüp 5);
- M_{Ed} – arvutuslik summaarne paindemoment;
- M_{Rd} – arvutuslik paindekandevõime;
- $Q_{Ek,1}$ – normatiivne põikjõud silla omakaalust;
- $Q_{Ek,2}$ – normatiivne põikjõud muutuvkoormusest (kaks 52 t veokit kõrvuti, tüüp 5);
- Q_{Ek} – normatiivne summaarne põikjõud;
- $Q_{Ed,1}$ – arvutuslik põikjõud silla omakaalust;
- $Q_{Ed,2}$ – arvutuslik põikjõud muutuvkoormusest (kaks 52 t veokit kõrvuti, tüüp 5);
- Q_{Ed} – arvutuslik summaarne põikjõud;
- Q_{Rd} – arvutuslik põikjõukandevõime.

Tabel 48. Paindekandevõimekontroll kandepiirseisundis (omakaal + 2 veokit 52 t tüüp 5)

Sild		Normatiivne painde- moment [kNm]			Arvutuslik painde- moment [kNm]			Arvut. painde- kande- võime M_{Rd} [kNm]	Nõude täide- tus [%]
		$M_{Ek,1}$	$M_{Ek,2}$	M_{Ek}	$M_{Ed,1}$	$M_{Ed,2}$	M_{Ed}		
Poaka sild		424	342	766	572	513	1085	920	85
Piiometsa sild		117	173	289	158	259	417	477	114
Rohe sild		336	260	596	453	390	843	1036	123
Jõgisoo I sild		2863	1396	4258	3864	2094	5958	5973	100
Maetsma sild	ava	932	1762	2695	1259	2644	3902	3689	95
	tugi/konsool	1729	2067	3796	2335	3100	5435	4988	92
Sandra sild		166	111	276	224	166	390	854	219
Valgejõe sild		70	76	147	95	115	210	197	94
Lungu sild		657	423	1080	887	634	1521	1603	105
Türi-Alliku sild		370	371	741	500	556	1056	906	86
Vaida III sild		263	257	519	354	385	739	1214	164
Jõgisoo II sild (keskmise ava)		3057	1462	4518	4126	2192	6319	5973	95
Piibe sild	ava	246	715	961	333	1072	1405	1251	89
	tugi/konsool	839	816	1656	1133	1224	2357	2224	94
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		637	254	891	860	381	1241	1635	132
Vodja sild		28	40	68	38	59	98	188	193

Tabel 49. Põikjõukandevõimekontroll kandepiirseisundis (omakaal + 2 veokit 52 t tüüp 5)

Sild		Normatiivne põik- jõud [kN]			Arvutuslik põik- jõud [kN]			Arvut. põikjõu- kande- võime Q_{Rd} [kN]	Nõude täide- tus [%]
		$Q_{Ek,1}$	$Q_{Ek,2}$	Q_{Ek}	$Q_{Ed,1}$	$Q_{Ed,2}$	Q_{Ed}		
Poaka sild		179	147	325	241	220	461	762	165
Piiometsa sild		52	88	140	70	132	202	266	132
Rohe sild		118	116	234	159	174	334	727	218
Jõgisoo I sild		458	223	681	618	335	953	963	101
Maetsma sild	ava	476	388	863	642	582	1224	1574	129
	tugi/konsool	476	388	863	642	582	1224	2191	179
Sandra sild		73	68	141	99	102	201	688	342
Valgejõe sild		49	81	130	66	122	188	190	101
Lungu sild		180	164	344	244	245	489	739	151
Türi-Alliku sild		96	133	229	130	199	329	360	109
Vaida III sild		89	113	202	121	169	290	573	198
Jõgisoo II sild (keskmise ava)		502	227	729	678	340	1018	963	95
Piibe sild	ava	191	185	376	258	278	535	Info puudub	
	tugi/konsool	191	185	376	258	278	535	Info puudub	
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		142	75	217	191	113	304	863	284
Vodja sild		27	63	90	37	94	131	937	717

4.2.2. Arvutused kasutuspiirseisundis

Kasutuspiirseisundis³⁰ on hinnatud katsetatud sildade peakandjaid lähtuvalt järgmistest aspektidest:

- 1) pingepiirangud:
 - betooni piki pragude pingepiirang (kontroll 1),
 - roome lineaarsuse pingepiirang (kontroll 2),
 - tõmbearmatuuri pingepiirang (kontroll 3),
 - survearmatuuri pingepiirang (kontroll 4);
- 2) pragudekontroll (kontroll 5);
- 3) läbipaindekontroll (kontroll 6).

Kõikide kasutuspiirseisundi nõuete arvutustulemused on esitatud [tabelites 51...56](#), mis on omakorda parema koondülevaate saamiseks kokkuvõtlikul kujul koondatud ka [tabelisse 50](#).

Tulemused näitavad, et ainsana esineb kasutuspiirseisundis tõsisemaid probleeme konsoolidega talasildade (Maetsma ja Piibe) puhul, kus tuge ja/või konsoolide piirkonnas esineb mõnede nõuete täitmise osas kuni kahekordne puudujääk.

Tabel 50. Kasutuspiirseisundis teostatud kontrollarvutuste koondtabel

Sild		Kasutuspiirseisundi kontrollide koondandmed – nõuete täidetud [%]					
		Kontroll 1	Kontroll 2	Kontroll 3	Kontroll 4	Kontroll 5	Kontroll 6
Poaka sild		113	153	104	266	200	888
Piimetsa sild		295	549	152	590	300	840
Rohe sild		150	200	148	341	300	925
Jõgisoo I sild		123	106	P/A ¹⁾	P/A ¹⁾	P/A ¹⁾	369
Maetsma sild	ava	119	257	124	393	167	298
	tugi/konsool	52	85	159	144	107	208
Sandra sild		383	479	P/A ¹⁾	P/A ¹⁾	P/A ¹⁾	1157
Valgejõe sild		129	201	125	214	167	392
Lungu sild		111	138	124	249	214	370
Türi-Alliku sild		124	186	110	257	214	338
Vaida III sild		227	339	207	406	600	658
Jõgisoo II sild (keskmine ava)		111	102	P/A ¹⁾	P/A ¹⁾	P/A ¹⁾	355
Piibe sild	ava	174	509	112	I/P ²⁾	214	296
	tugi/konsool	65	95	98	107	58	157
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		155	163	P/A ¹⁾	P/A ¹⁾	P/A ¹⁾	437
Vodja sild		155	278	266	435	429	393

Märkused:
1) P/A – pole asjakohane ehk puudub vajadus kontrolli teostamiseks (seoses pingekonstruktsioonidega);
2) I/P – detailse kontrolli teostamiseks info puudub (seotud puuduliku projektdokumentatsiooniga).

³⁰ Kasutuspiirseisund – seisund, millele vastavate tingimuste ületamisel konstruktsiooni või konstruktsioonilemendi normaalseks kasutamiseks kehtestatud nõuded ei ole enam täidetud.

Tabel 51. Kontroll kasutuspiirseisundis – betooni pikipragude pingepiirang (omakaal + 2 veokit 52 t tüüp 5)

Sild		Nõue	Betooni pikipragude pingepiirang (kontroll 1)				
			Betooni maks. survepinge		Betooni lubatav pingepinge $0,6f_{ck}$ [MPa]	Nõude täidetatus [%]	Selgitus
			$\sigma_{c,lühi}$ [MPa]	$\sigma_{c,pika}$ [MPa]			
Poaka sild		$\max(\sigma_{c,lühi}; \sigma_{c,pika}) \leq 0,6f_{ck}$	10,6	7,4	12,0	113	Nõuded on tagatud
Piiometsa sild			6,1	4,1	18,0	295	Nõuded on tagatud
Rohe sild			8,0	5,6	12,0	150	Nõuded on tagatud
Jõgisoo I sild			14,6	13,9	18,0	123	Nõuded on tagatud
Maetsma sild	ava		8,1	5,5	9,6	119	Nõuded on tagatud
	tugi		18,6	12,4	9,6	52	Nõuded ei ole tagatud
Sandra sild			4,6	4,7	18,0	383	Nõuded on tagatud
Valgejõe sild			14,0	10,0	18,0	129	Nõuded on tagatud
Lungu sild			13,5	9,9	15,0	111	Nõuded on tagatud
Türi-Alliku sild			9,7	7,3	12,0	124	Nõuded on tagatud
Vaida III sild			6,6	5,1	15,0	227	Nõuded on tagatud
Jõgisoo II sild (keskmine ava)			16,2	15,3	18,0	111	Nõuded on tagatud
Piibe sild	ava		6,9	5,2	12,0	174	Nõuded on tagatud
	tugi		18,6	12,2	12,0	65	Nõuded ei ole tagatud
Jõgisoo II sild (äärmine ava)			11,6	11,5	18,0	155	Nõuded on tagatud
Vodja sild			6,2	4,3	9,6	155	Nõuded on tagatud

Tabel 52. Kontroll kasutuspiirseisundis – roome lineaarsuse pingepiirang (ainult omakaal)

Sild		Nõue	Roome lineaarsuse pingepiirang (kontroll 2)				
			Betooni maks. survepinge		Betooni lubatav pinge $0,45f_{ck}$ [MPa]	Nõude täidetatus [%]	Selgitus
			$\sigma_{c,lühi}$ [MPa]	$\sigma_{c,pika}$ [MPa]			
Poaka sild		$\max(\sigma_{c,lühi}; \sigma_{c,pika}) \leq 0,45f_{ck}$	5,9	4,1	9,0	153	Nõuded on tagatud
Piiometsa sild			2,5	1,7	13,5	549	Nõuded on tagatud
Rohe sild			4,5	3,2	9,0	200	Nõuded on tagatud
Jõgisoo I sild			9,8	9,3	13,5	138	Nõuded on tagatud
Maetsma sild	ava		2,8	1,9	7,2	257	Nõuded on tagatud
	tugi		8,5	5,6	7,2	85	Nõuded ei ole tagatud
Sandra sild			2,8	2,8	13,5	479	Nõuded on tagatud
Valgejõe sild			6,7	4,8	13,5	201	Nõuded on tagatud
Lungu sild			8,2	6,0	11,3	138	Nõuded on tagatud
Türi-Alliku sild			4,8	3,6	9,0	186	Nõuded on tagatud
Vaida III sild			3,3	2,6	11,3	339	Nõuded on tagatud
Jõgisoo II sild (keskmine ava)			11,0	10,4	13,5	123	Nõuded on tagatud
Piibe sild	ava		1,8	1,3	9,0	509	Nõuded on tagatud
	tugi		9,4	6,2	9,0	95	Nõuded ei ole tagatud
Jõgisoo II sild (äärmine ava)			8,3	8,2	13,5	163	Nõuded on tagatud
Vodja sild			2,6	1,8	7,2	278	Nõuded on tagatud

Tabel 53. Kontroll kasutuspiiriseisundis – tõmbearmatuuri pingepiirang (omakaal + 2 veokit 52 t tüüp 5)

Sild	Nõue	Tõmbearmatuuri pingepiirang (kontroll 3)					
		Armatuuri maks. tõmbepinge		Armatuuri lubatav pingepinge $0,8f_{yk}$ [MPa]	Nõude täidetatus [%]	Selgitus	
		$\sigma_{s1,lühi}$ [MPa]	$\sigma_{s1,pika}$ [MPa]				
Poaka sild	$\max(\sigma_{s1,lühi}; \sigma_{s1,pika}) \leq 0,8f_{yk}$	222,6	230,3	240,0	104	Nõuded on tagatud	
Piiometsa sild		154,6	157,9	240,0	152	Nõuded on tagatud	
Rohe sild		155,8	161,7	240,0	148	Nõuded on tagatud	
Jõgisoo I sild		Pole asjakohane					
Maetsma sild		ava	213,6	219,7	272,0	124	Nõuded on tagatud
		tugi	165,5	170,6	272,0	159	Nõuded on tagatud
Sandra sild		Pole asjakohane					
Valgejõe sild		180,2	188,8	236,0	125	Nõuded on tagatud	
Lungu sild		239,4	251,1	312,0	124	Nõuded on tagatud	
Türi-Alliku sild		208,8	214,3	236,0	110	Nõuded on tagatud	
Vaida III sild		110,3	114,1	236,0	207	Nõuded on tagatud	
Jõgisoo II sild (keskmine ava)		Pole asjakohane					
Piibe sild		ava	162,1	168,1	188,0	112	Nõuded on tagatud
		tugi	182,2	191,0	188,0	98	Nõuded ei ole tagatud
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		Pole asjakohane					
Vodja sild		85,2	88,8	236,0	266	Nõuded on tagatud	

Tabel 54. Kontroll kasutuspiiriseisundis – survearmatuuri pingepiirang (omakaal + 2 veokit 52 t tüüp 5)

Sild		Nõue	Survearmatuuri pingepiirang (kontroll 4)				
			Armatuuri maks. survepinge		Armatuuri lubatav pingepinge $0,8f_{yk}$ [MPa]	Nõude täidetatus [%]	Selgitus
			$\sigma_{s2, l\ddot{u}hi}$ [MPa]	$\sigma_{s2, pika}$ [MPa]			
Poaka sild		$\max(\sigma_{s2, l\ddot{u}hi}; \sigma_{s2, pika}) \leq 0,8f_{yk}$	39,4	90,3	240,0	266	Nõuded on tagatud
Piiometsa sild			15,3	40,7	240,0	590	Nõuded on tagatud
Rohe sild			30,5	70,3	240,0	341	Nõuded on tagatud
Jõgisoo I sild			Pole asjakohane				
Maetsma sild	ava		30,0	69,2	272,0	393	Nõuded on tagatud
	tugi		100,1	188,5	272,0	144	Nõuded on tagatud
Sandra sild			Pole asjakohane				
Valgejõe sild			51,3	110,3	236,0	214	Nõuded on tagatud
Lungu sild			54,6	125,1	312,0	249	Nõuded on tagatud
Türi-Alliku sild			37,3	91,8	236,0	257	Nõuded on tagatud
Vaida III sild			25,3	58,1	236,0	406	Nõuded on tagatud
Jõgisoo II sild (keskmine ava)			Pole asjakohane				
Piibe sild	ava		Info puudub				
	tugi		93,9	175,8	188,0	107	Nõuded on tagatud
Jõgisoo II sild (äärmine ava)			Pole asjakohane				
Vodja sild			26,9	54,3	236,0	435	Nõuded on tagatud

Tabel 55. Kontroll kasutuspiirseisundis – pragudekontroll (omakaal + 2 veokit 52 t tüüp 5)

Sild		Nõue	Pragudekontroll (kontroll 5)				
			Tekkiva prao laius w_k [mm]	Lubatud prao laius w_{max} [mm]	Pragude maks. vahekaugus $s_{r,max}$ [mm]	Nõude täidetatus [%]	Selgitus
Poaka sild		$w_k \leq w_{max}$	0,15	0,30	167	200	Nõuded on tagatud
Piiometsa sild			0,10	0,30	178	300	Nõuded on tagatud
Rohe sild			0,10	0,30	166	300	Nõuded on tagatud
Jõgisoo I sild			Pole asjakohane, kuna pragu ei teki				
Maetsma sild	ava		0,18	0,30	206	167	Nõuded on tagatud
	konsool		0,28	0,30	555	107	Nõuded on tagatud
Sandra sild			Pole asjakohane, kuna pragu ei teki				
Valgejõe sild			0,18	0,30	231	167	Nõuded on tagatud
Lungu sild			0,14	0,30	154	214	Nõuded on tagatud
Türi-Alliku sild			0,14	0,30	159	214	Nõuded on tagatud
Vaida III sild			0,05	0,30	143	600	Nõuded on tagatud
Jõgisoo II sild (keskmise ava)			Pole asjakohane, kuna pragu ei teki				
Piibe sild	ava		0,14	0,30	231	214	Nõuded on tagatud
	konsool		0,52	0,30	989	58	Nõuded ei ole tagatud
Jõgisoo II sild (äärmise ava)			Pole asjakohane, kuna pragu ei teki				
Vodja sild		0,07	0,30	201	429	Nõuded on tagatud	

Tabel 56. Kontroll kasutuspiirseisundis – läbipaindekontroll (2 veokit 52 t tüüp 5)

Sild		Nõue	Läbipaindekontroll (kontroll 6)			
			Tekkiv läbipaine δ_k [mm]	Lubatud läbipaine δ_{max} [mm]	Nõude täidetus [%]	Selgitus
Poaka sild		$\delta_k \leq \delta_{max}$	2,5	22,2	888	Nõuded on tagatud
Piiometsa sild			2,0	16,8	840	Nõuded on tagatud
Rohe sild			2,4	22,2	925	Nõuded on tagatud
Jõgisoo I sild			12,7	46,8	369	Nõuded on tagatud
Maetsma sild	ava		12,1	36,0	298	Nõuded on tagatud
	konsool		14,2	29,6	208	Nõuded on tagatud
Sandra sild			2,0	22,8	1157	Nõuded on tagatud
Valgejõe sild			2,8	10,9	392	Nõuded on tagatud
Lungu sild			7,3	27,0	370	Nõuded on tagatud
Türi-Alliku sild			8,1	27,3	338	Nõuded on tagatud
Vaida III sild			3,3	21,7	658	Nõuded on tagatud
Jõgisoo II sild (keskmise ava)			13,2	46,8	355	Nõuded on tagatud
Piibe sild	ava		11,3	33,5	296	Nõuded on tagatud
	konsool		17,6	27,6	157	Nõuded on tagatud
Jõgisoo II sild (äärmise ava)			8,0	34,8	437	Nõuded on tagatud
Vodja sild			2,8	11,0	393	Nõuded on tagatud

4.2.3. Sildade kontroll paindemomentide võrdlemise teel

Võttes arvesse mõõdetud läbipaindeid ja nende jagunemist erinevate talade (paneelide) vahel, modifitseeriti veokitest tekkivate sillateki peakandjate sisejõudude väärtuseid, et hinnata mitme veoki samaaegse sillal paiknemise mõju sillakonstruktsioonidele. Vältimaks erinevate projekteerimisel kasutatud normide ja standardite metoodilisi erinevusi, teostati võrdlus paindemomentide võrdlemise teel, kuna enamasti saavad need silla kontrollarvutustes määravaks.

Omavahel võrreldi projekteerimisel kasutatud liikluskoormustest (eriveokid HF-60/HK-80 ning autokolonnid H-10/H-13/H-18/H-30) ja katsetamisel kasutatud 52-tonnistest raskeveoki(te)st (tüüp 5) tekkivaid arvutuslikke paindemomente. Seejuures eeldati, et kui projekteerimisel kasutatud eriveokist tekkivad paindemomendid on suuremad, siis on põhimõtteliselt võimalik 52 t raskeveoki rakendamine. Analüüs teostati igale sillale eraldi, kusjuures vaadeldi arvutuslikke sildepikkusi kuni 35 m (konsoolidel piirduki 20 meetriga). See on vajalik tendentside väljaselgitamiseks, kuigi paljudel tüüplahendustel piirdatakse oluliselt väiksemate sildeavadega. Arvutuslike paindemomentide võrdlemisel kasutati projektijärgsetel koormustel neid osavaru- ja dünaamikategoreid, mida igale konkreetsele sillale projekteerimisel rakendati. 52-tonnistel veokitel kasutati osavarutegurit 1,5 ning täiendavat dünaamikategurit ei rakendatud.

52 t veokite (tüüp 5) korral vaadeldi võimalusi, kus sillal paikneb:

- 1) ainult 1 veok (sõiduk paikneb servast või piirdest 25 cm kaugusel);
- 2) üks veokikolonn (sõidukite pikisuunaline vahe rataste tsentritest mõõdetuna on 5 m);
- 3) kõrvuti 2 veokit (veokite omavaheline kaugus rataste tsentritest mõõdetuna on 1 m);
- 4) kaks veokite kolonni (sõidukite pikisuunaline vahe on 5 m ja põiksuunaline vahe 1 m).

Siinkohal tuleb sisse tuua mõned eeldused, mis puudutavad 52 t raskeveokeid:

- 1) Kui ühes sõidureas paikneb pikisuunas mitu raskeveokit korraga, siis nende omavaheline kaugus on telgedest mõõdetuna 5 m. Suuremate kiiruste juures on see ebaloomulikul väike, kuid ei saa välistada ka olukorda, kus mingil põhjusel on liiklus häiritud ning veokid kas seisavad või liiguvad väikestel kiirustel. Kuna analüüsis on vaadeldud kuni 35 m sildeavasid, siis reaalsetel saab ühes avas paikneda pikisuunas korraga maksimaalselt 2 raskeveokit.
- 2) Korraga paikneb kõrvuti maksimaalselt kaks veokite kolonni. Olukorda, kus samaaegselt on sillal kõrvuti kolm või enam veokit, võib lugeda liiga vähetõenäoliseks ja sellest on analüüsis loobutud.

Üldistuste tegemisel on mõistlik võtta aluseks eeldus, et kahe kõrvuti paikneva katkematu veokikolonna esinemine on suhteliselt vähetõenäoline ja piirduda võiks juhtumiga, kus korraga paikneb kõrvuti kaks 52 t raskeveokit.

Analüüsi ([tabel 57](#)) tähtsamad üldistatud järeldused (võttes aluseks 52 t veokite kasutamise):

- Normaalarmeeritud talasildadel (tüüpkataloogid [\[79\]](#), [\[80\]](#) ja [\[97\]](#)) üldjuhul kataloogi tüüpvalikute hulgast piiranguid ei ole. Ainsana võiks kriitiliselt suhtuda sildadesse, mille puhul on kasutatud kõige pikemaid talasid (20 m) koos projektikoormusega HF-60.
- Eeltingestatud taladega sillad (tüüpkataloog [\[81\]](#)) suudavad edukalt kanda 52 t veokeid kuni sildeavani 24 m. Sellest suuremate sildeavade korral (mida riigiteedel on üksikuid) tuleb teostada täpsem analüüs võttes arvesse konkreetse silla parameetreid.
- 52 t veokite kasutamisel ei esine probleeme normaalarmeeritud plaatsildadel (tüüpkataloogid [\[83\]](#), [\[96\]](#)) ega ka eeltingestatud paneelsildadel (tüüpkataloog [\[85\]](#)), kuna maksimaalsed

sildepikkused on kataloogides üldjuhul vastavalt 9 ja 18 m, millede puhul on kandevõime 52 t veokitele tagatud.

- Ainsana esineb katsetatud sildadest tõsiseltvõetavaid probleeme koormusele HF-60 projekteeritud konsoolsildadega (foto 53). Nendel sildadel võivad veokid liikuda ainult ühes kolonnis, sest vastasel korral ületavad peatalade arvutuslikud paindemomendid toel lubatavaid väärtuseid. NB! Paindemomendi kontrolltingimus ei ole täidetud ka normatiivsete koormuste võrdlemisel! Probleemi süvendab asjaolu, et seda tüüpi sildadel puuduvad silla otstes sambad, mistõttu esinevad pealesõiduplaadide all sageli arvestatavad pinnase äravajumised ja uhtumised (foto 54). See omakorda muudab tee tasapinna ebaühtlaseks ning soodustab dünaamilise löögi teket.



Foto 53. Konsoolidega talasildadel osutuvad probleemiks suured paindemomendid peatalade tugele

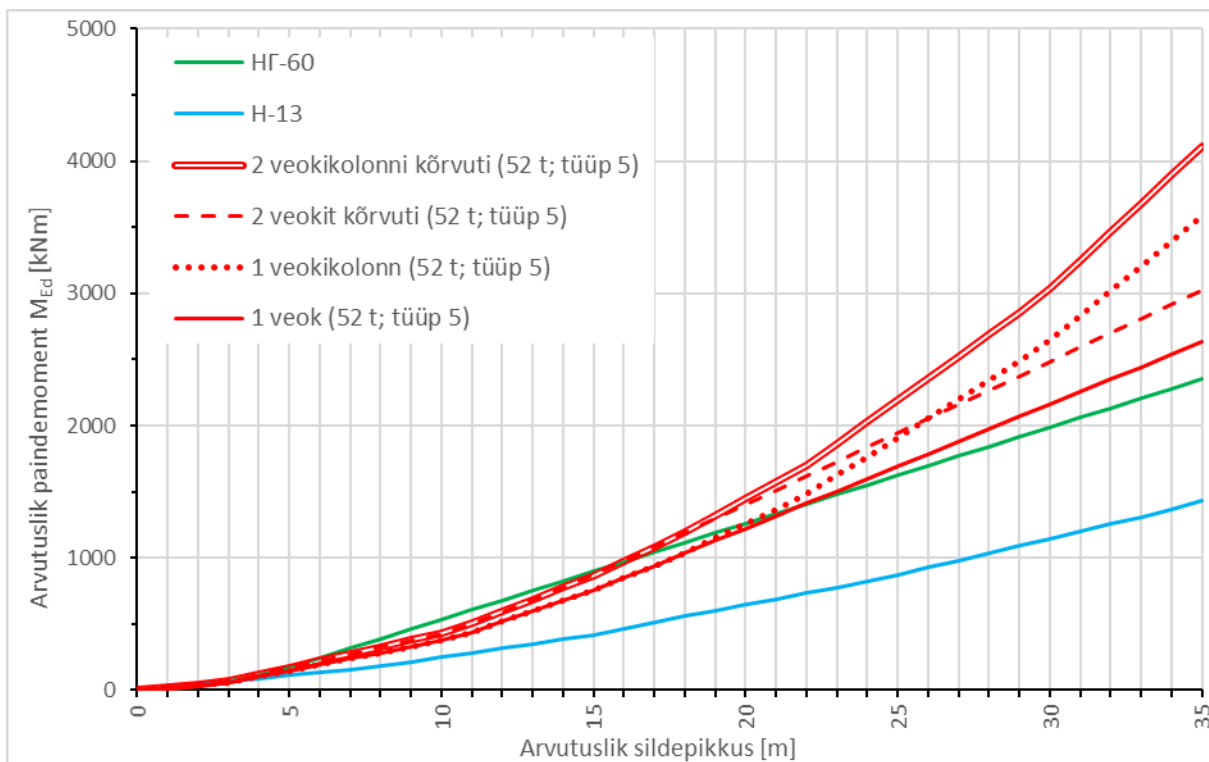


Foto 54. Pinnase äravajumine konsooli otsa piirkonnas (pealesõiduplaadi alt)

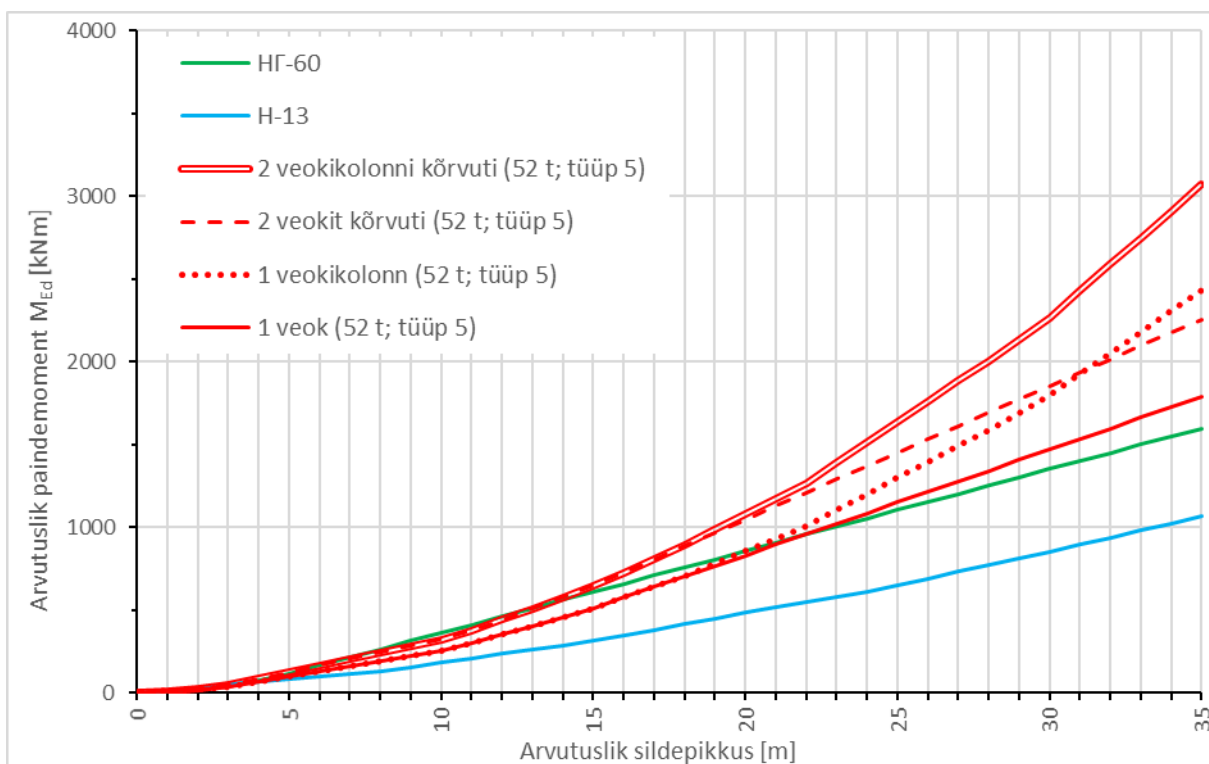
Sildade detailsema analüüsi tulemused on graafiliselt kajastatud [joonistel 112...127](#).

Tabel 57. Katsetatud sildade maksimaalsed sildepikkused 52 t veoki(te)le

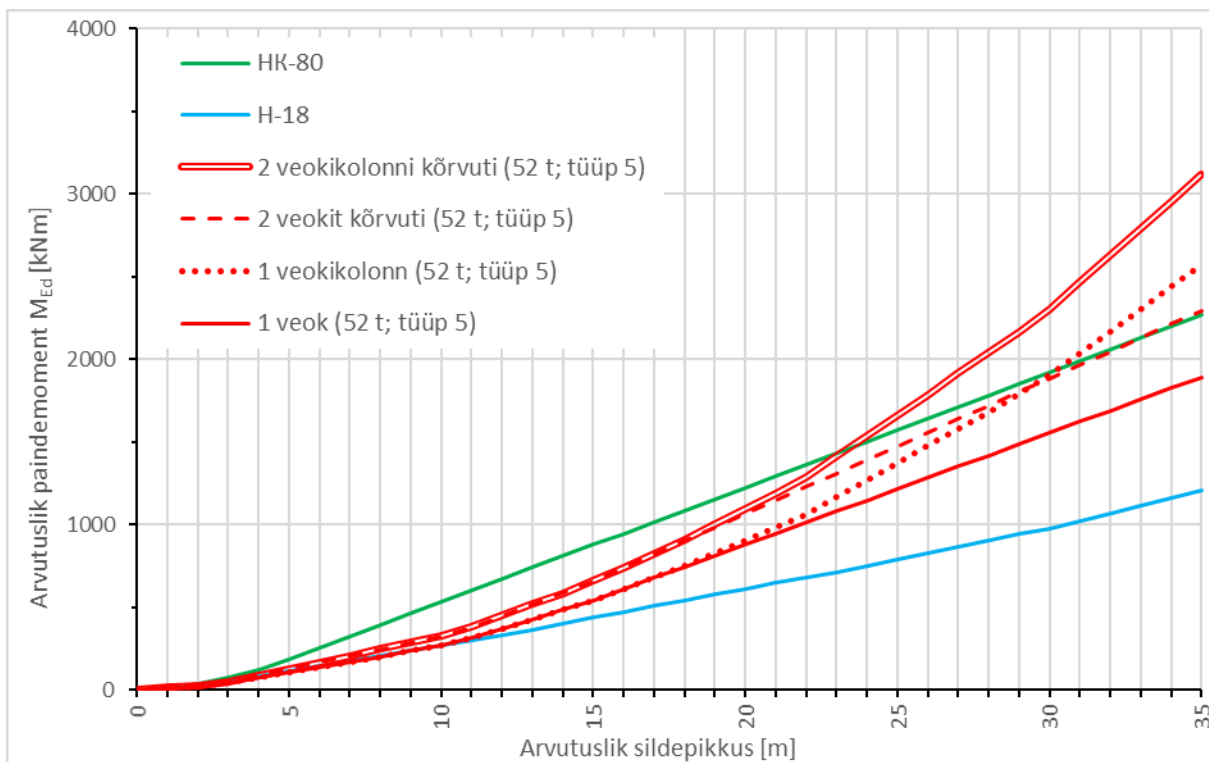
Sild		Maksimaalne lubatav sildepikkus [m]			
		Üks 52 t veok	Üks kolonn 52 t veokitega	Kaks 52 t veokit kõrvuti	Kaks kolonni 52 t veokitega
Poaka sild		22	20	16	16
Piiometsa sild		22	20	14	14
Rohe sild		>35	30	33	23
Jõgisoo I sild		>35	33	23	21
Maetsma sild	ava	22	24	0	0
	tugi/konsool	13 ¹⁾	13 ¹⁾	0	0
Sandra sild		>35	33	17	17
Valgejõe sild		>35	30	19	18
Lungu sild		>35	33	19	19
Türi-Alliku sild		22	20	13	13
Vaida III sild		>35	30	19	18
Jõgisoo II sild (keskmine ava)		>35	33	23	20
Piibe sild	ava	22	24	0	0
	tugi/konsool	13 ¹⁾	13 ¹⁾	0	0
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		>35	33	18	18
Vodja sild		>35	30	19	18
Märkused:					
1) Lühikeste konsoolide korral (alla 4 m) ületavad 52 t veokist tekkivad paindemomendid napilt HF-60 koormusest tekkivaid paindemomente, kuid selle võib siinkohal piisavalt konservatiivse meetodika tõttu hüljata.					



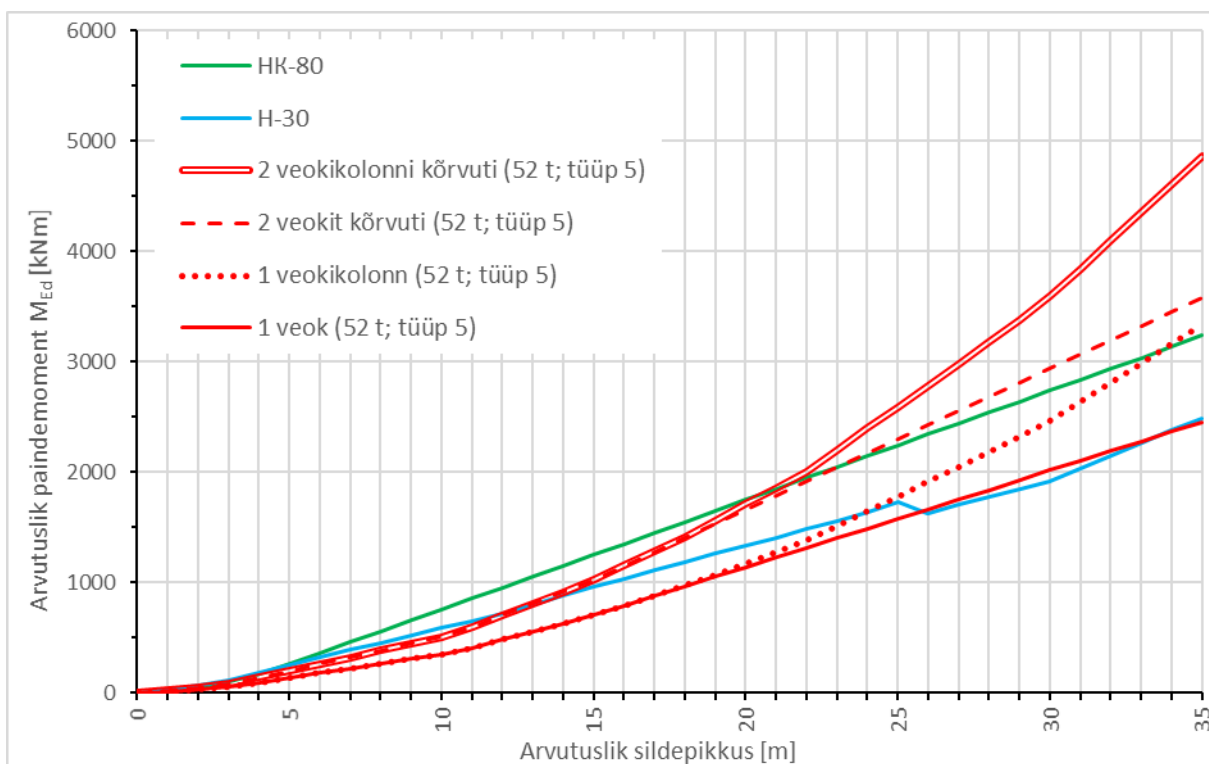
Joonis 112. Poaka sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HF-60/H-13) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



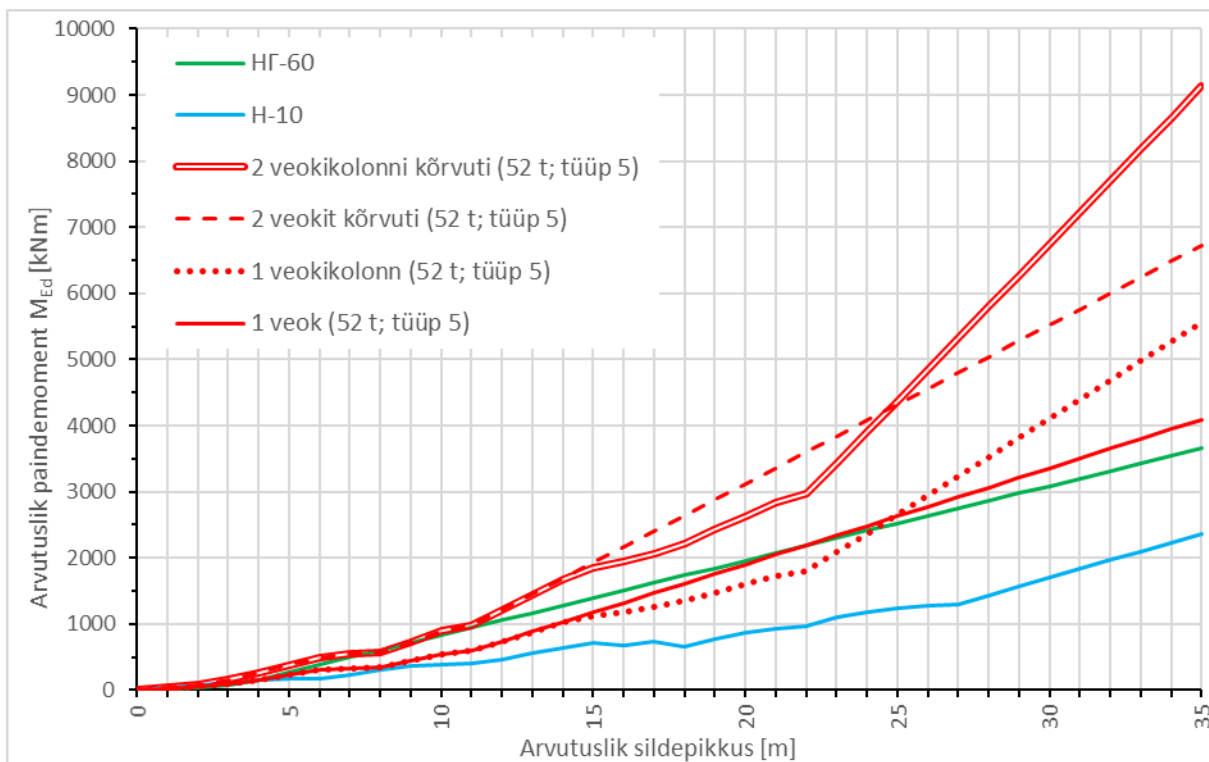
Joonis 113. Piiometsa sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HF-60/H-13) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



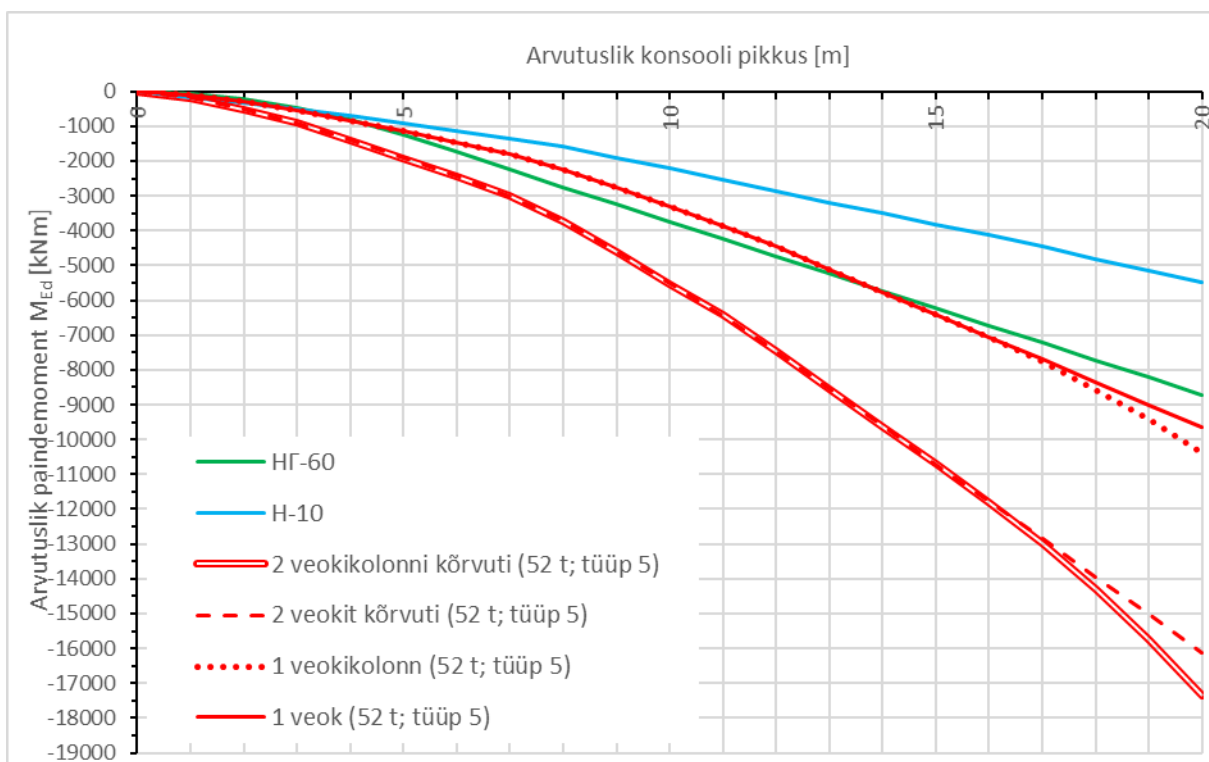
Joonis 114. Rohe sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HK-80/H-18) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



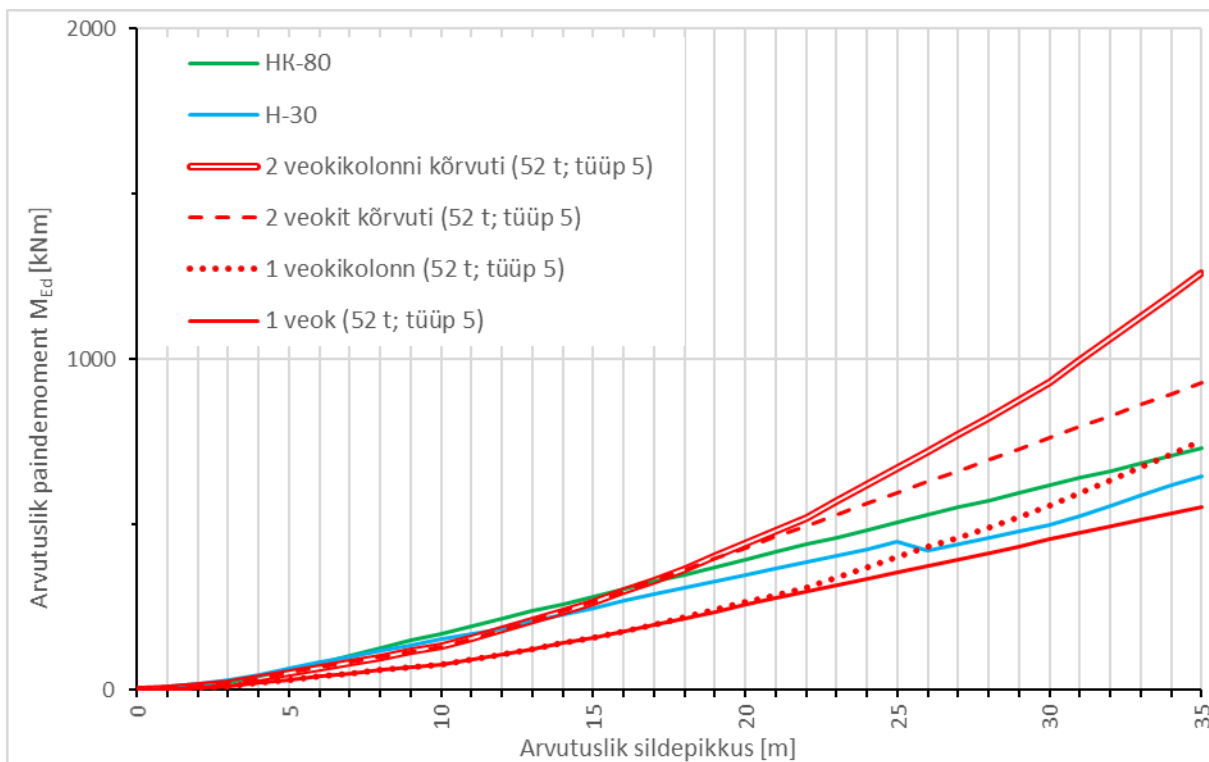
Joonis 115. Jägisoo I sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HK-80/H-30) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



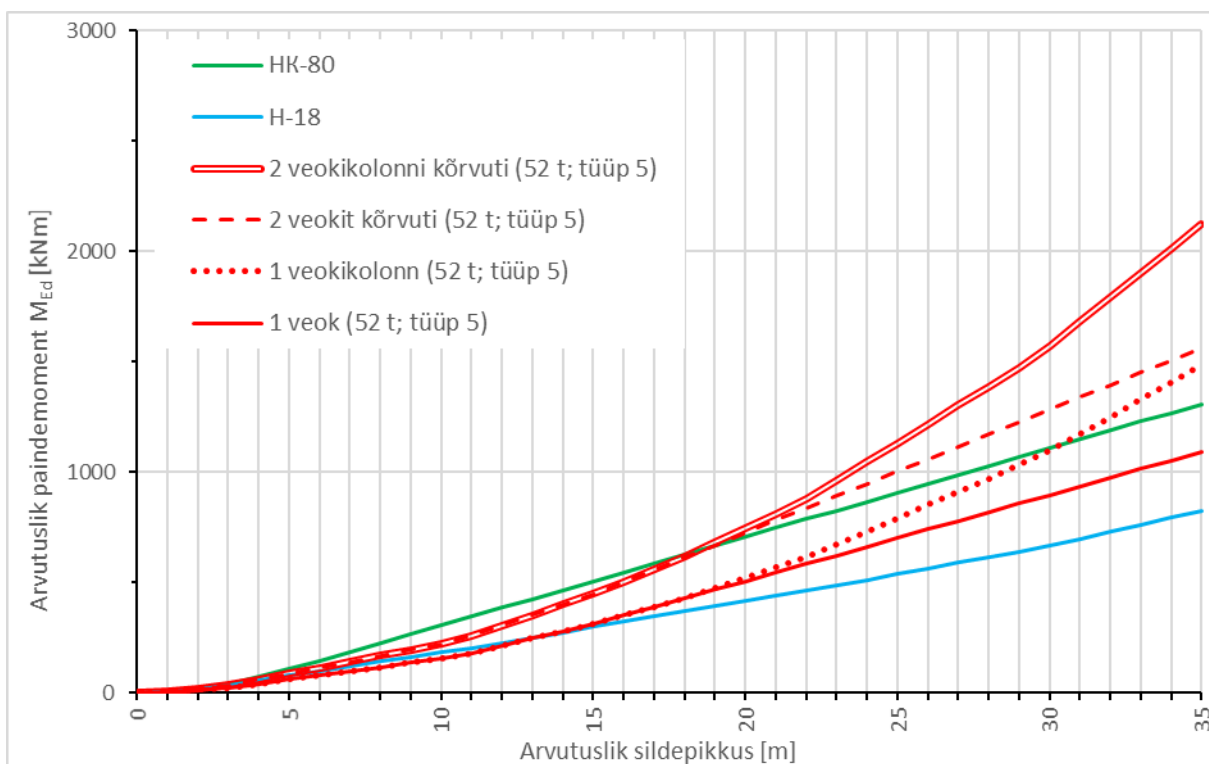
Joonis 116. Maetsma sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HF-60/H-10) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



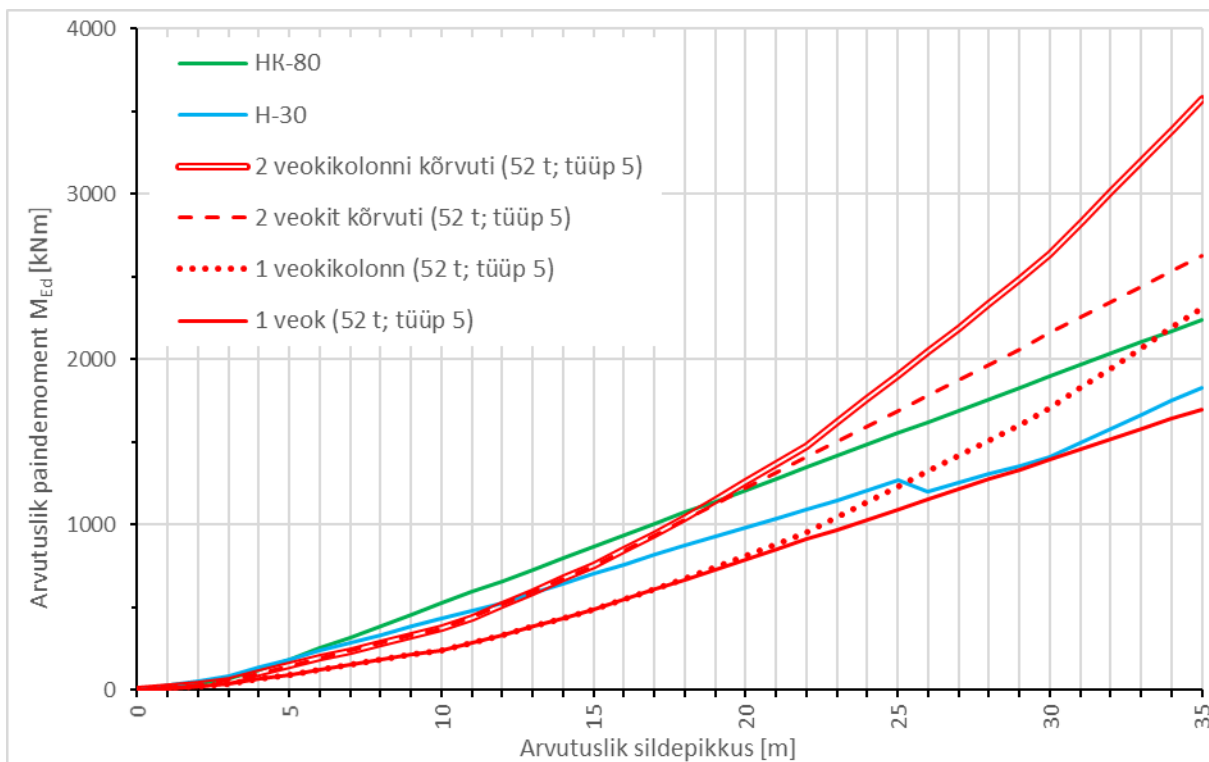
Joonis 117. Maetsma sild – arvutuslikud paindemomendid toel projektijärgsetest koormustest (HF-60/H-10) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



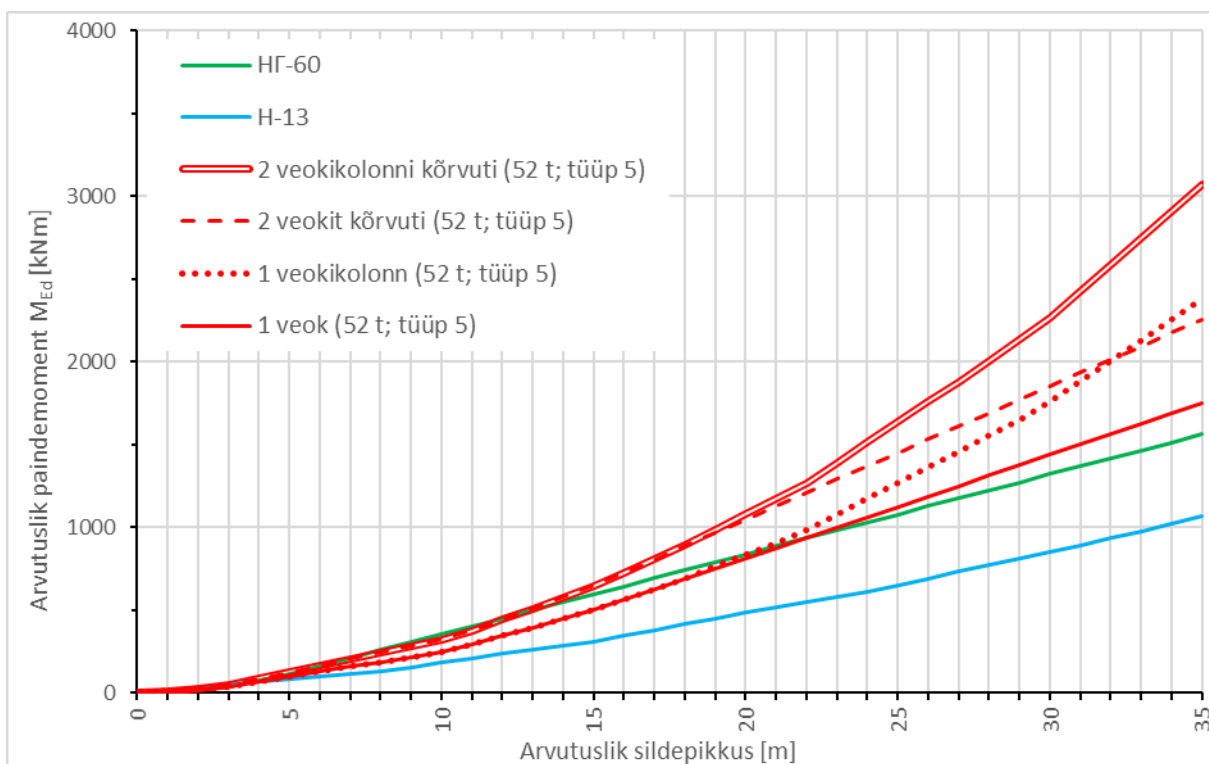
Joonis 118. Sandra sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HK-80/H-30) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



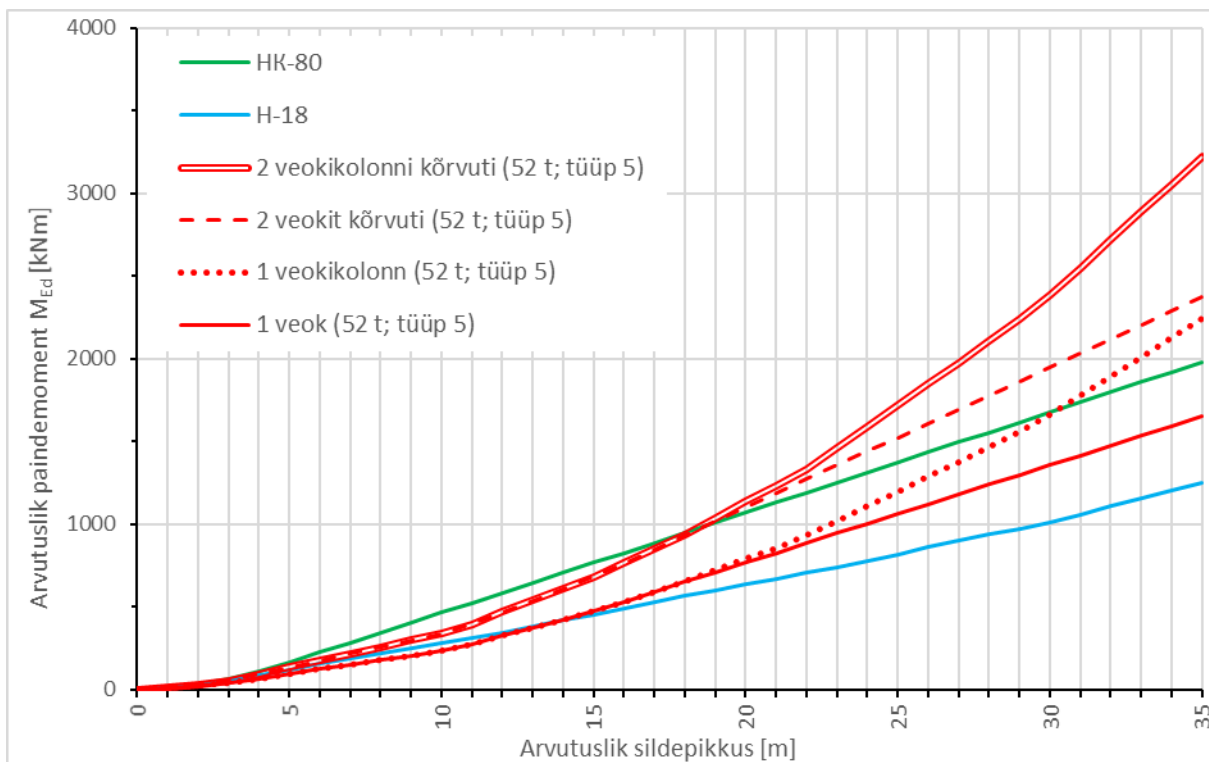
Joonis 119. Valgejõe sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HK-80/H-18) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



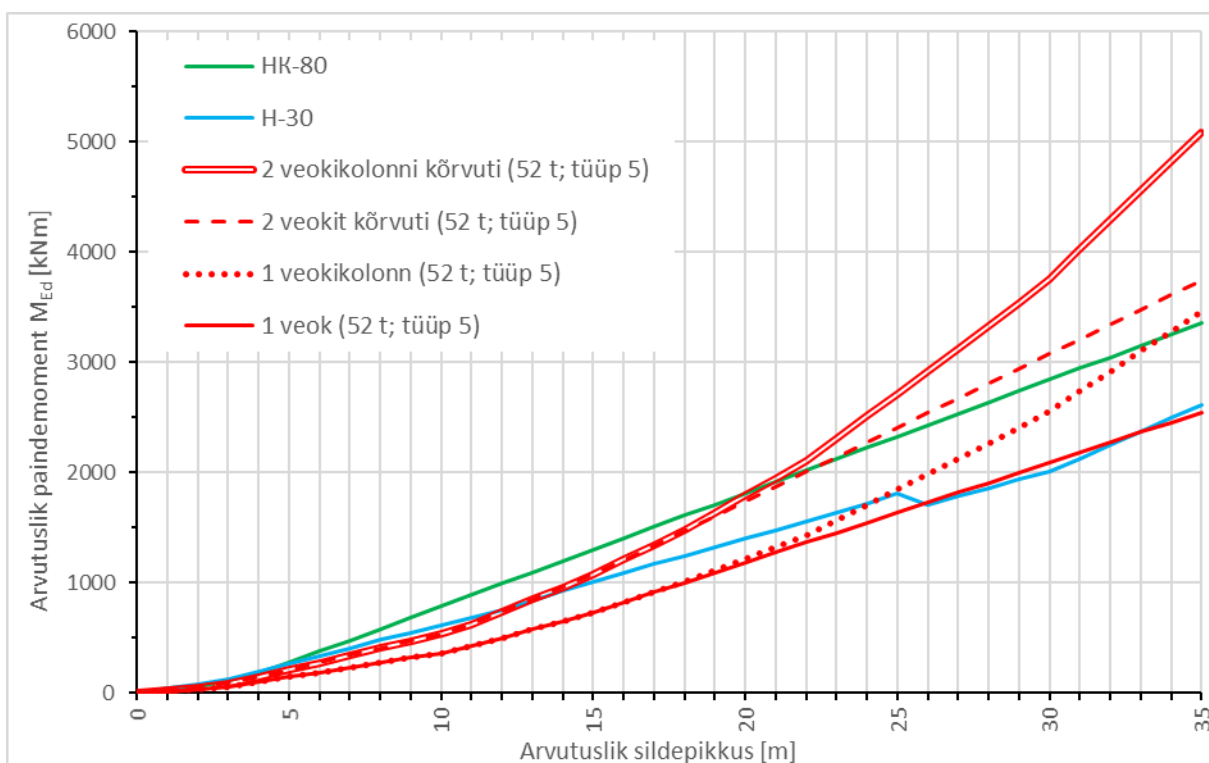
Joonis 120. Lungu sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HK-80/H-30) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



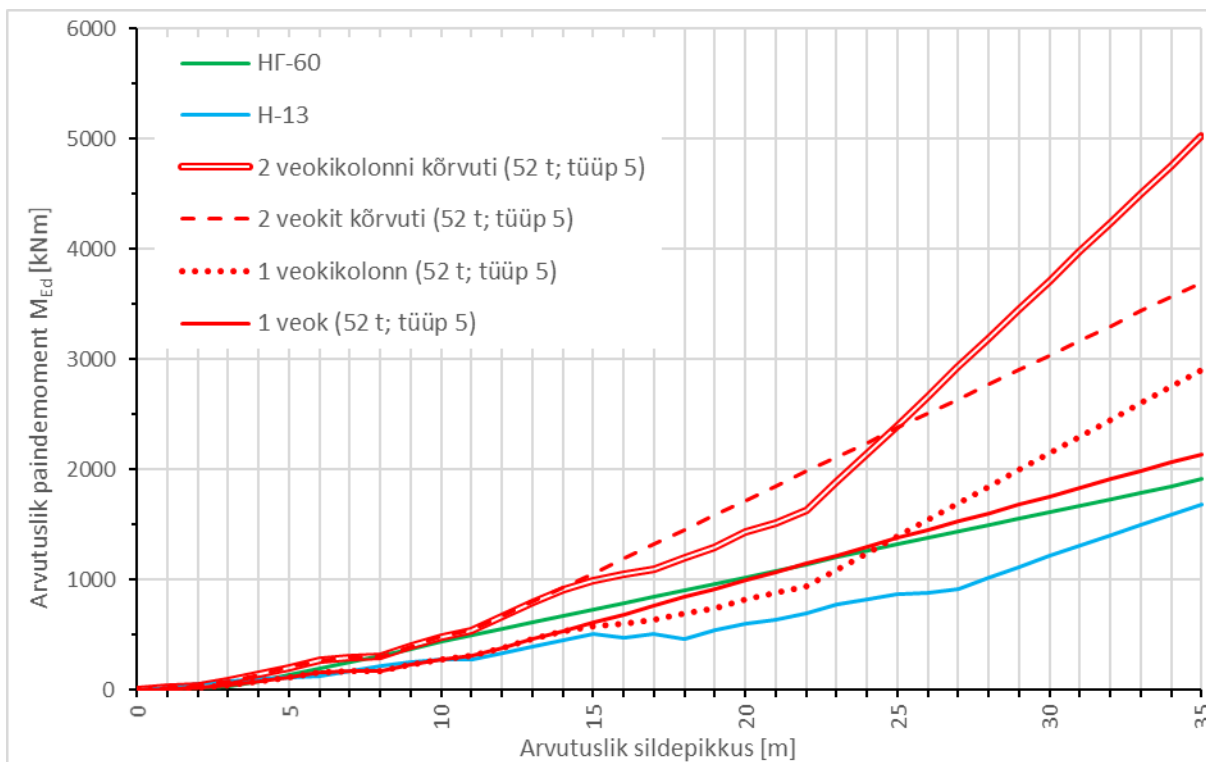
Joonis 121. Türi-Alliku sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HΓ-60/H-13) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



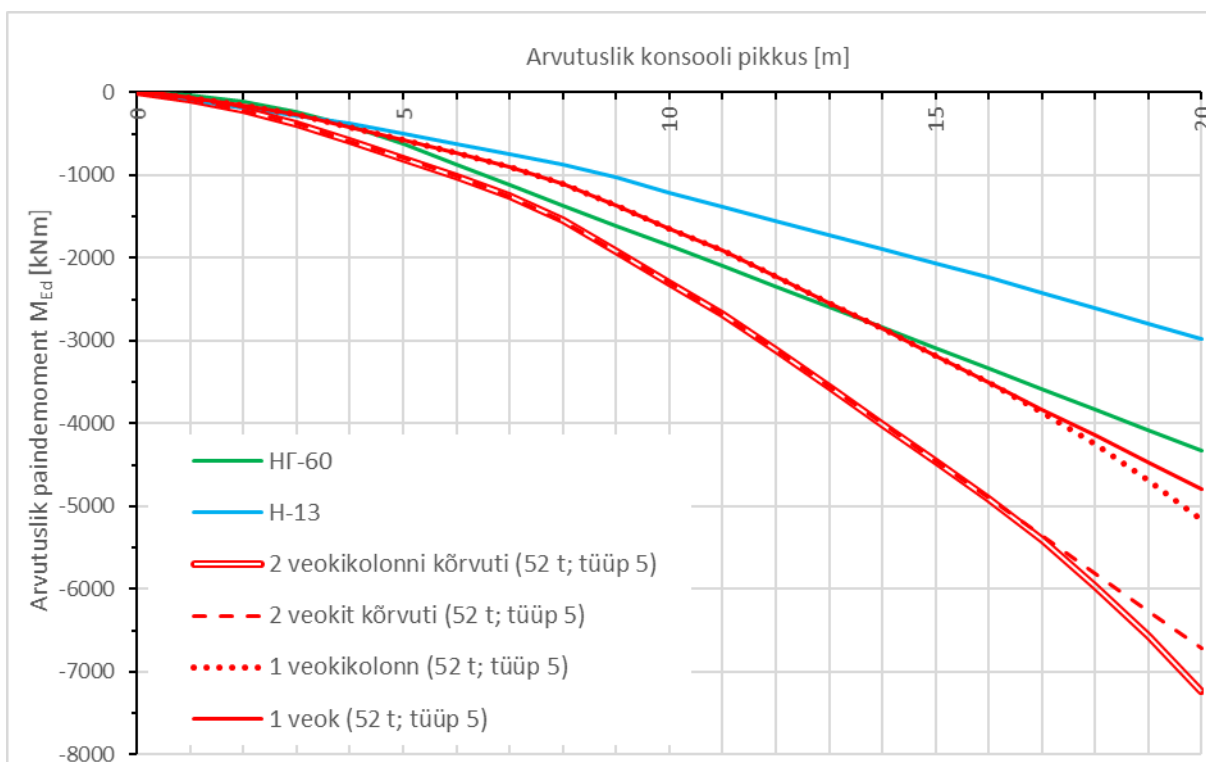
Joonis 122. Vaida III sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HK-80/H-18) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



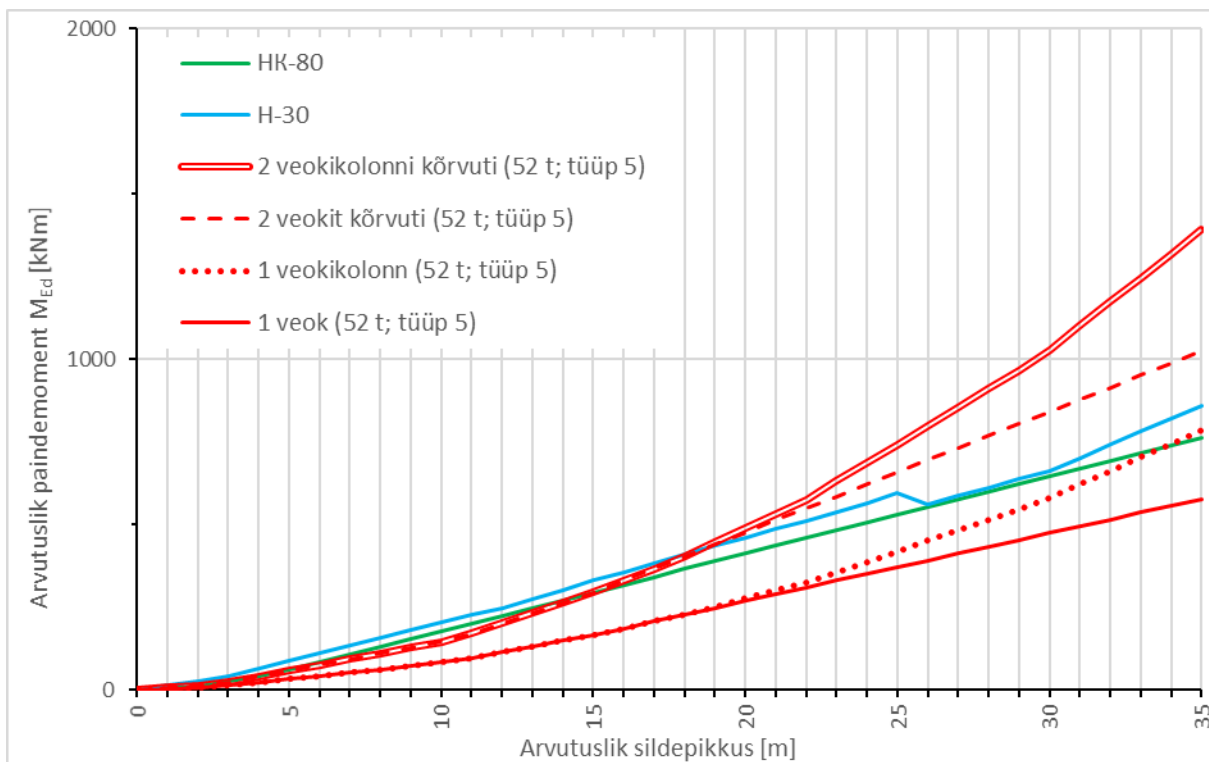
Joonis 123. Jõgisoo II sild (keskmine ava) – arvutuslikud sildeavas paindemomendid projektijärgsetest koormustest (HK-80/H-30) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



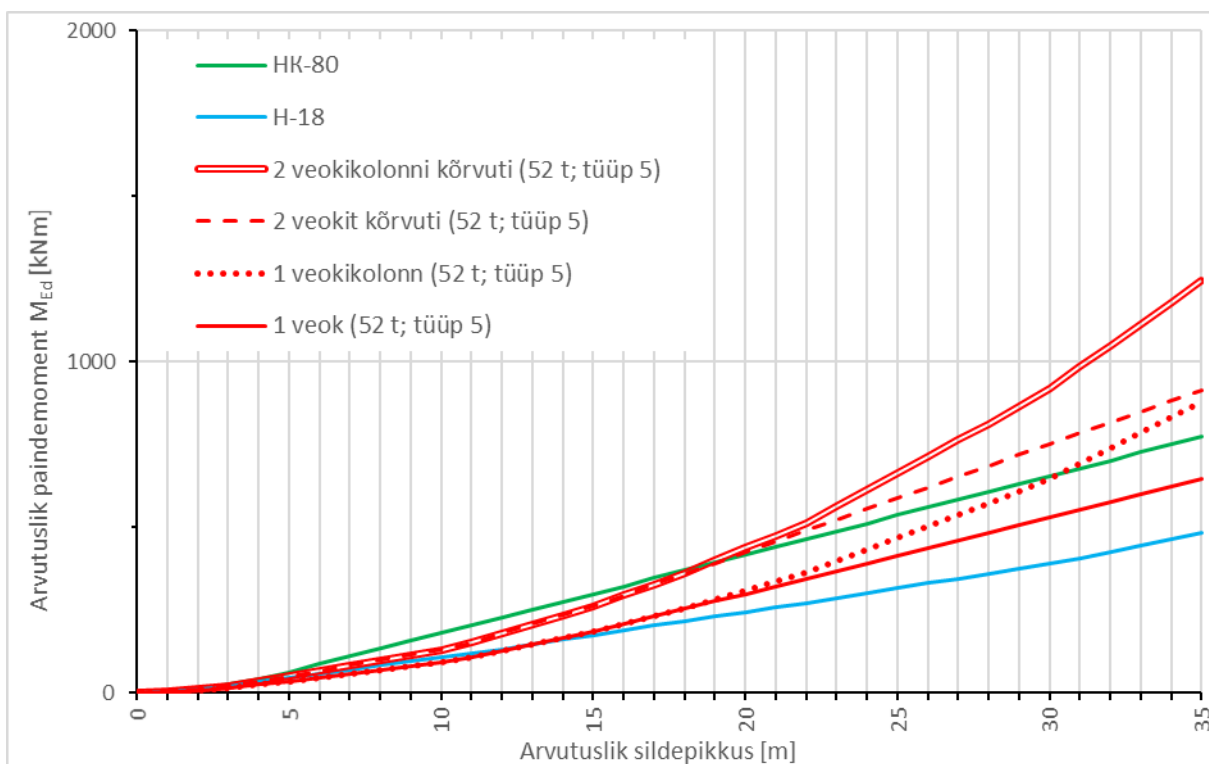
Joonis 124. Piibe sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HF-60/H-13) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



Joonis 125. Piibe sild – arvutuslikud paindemomendid toel projektijärgsetest koormustest (HF-60/H-13) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



Joonis 126. Jõgisoo II sild (äärmine ava) – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HK-80/H-30) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)



Joonis 127. Vodja sild – arvutuslikud paindemomendid sildeavas projektijärgsetest koormustest (HK-80/H-18) ja katsetamisel kasutatud 52 t veokitest (tüüp 5)

4.3. Üleminekutegurid algsete projektkoormuste ja 52 t veoki vahel

Käesoleva jaotise ülesandeks on anda kokkuvõtlik ülevaade eri ajastutel kasutatud liikluskoormuste mõjust sillatekile ja töötada välja üleminekutegurid erinevate koormuste võrdlemiseks. Selleks valiti silla peakandjate sisejõudude võrdlemise meetod, mis aitab välistada eri ajastu standardite metoodilistest iseärasustest tulenevaid arvutustulemusi mõjutavaid erinevusi. Sisejõududest on kasutatud paindemomente, mis on talade ja plaatide üks kõige tähtsam sisejõududega seonduv parameeter.

Lõppeesmärgiks on leida praktikas lihtsalt rakendatav seos 52 t veoki (tüüp 5) ja sildade projekteerimisel kasutatud eriveokite vahel. Metoodika lihtsat kasutatavust kompenseeritakse mõõduka konservatiivsusega, mistõttu täpsemaid arvutusi tehes võidakse sillale saada mõnevõrra suurem kandevõime.

Analüüs baseerub järgmistel eeldustel ja lihtsustustel:

- 1) vaadeldakse ainult lihttala skeemi järgi töötavaid tekikonstruktsioone, kuna see kajastab kõige suuremat hulka Eesti sildadest;
- 2) analüüsis käsitletakse sildepikkusi kuni 25 m (sammuga 1 m);
- 3) eeldatakse, et raskeveokite laiused on põhimõtteliselt võrdsed (v.a. 240 kN teljekoormusega LM3 veokid) – seetõttu ei oma suurt tähtsust, kuidas üksinda sillatekil paiknevad koormused erinevate sillateki peakandjate vahel jagunevad, sest nad teevad seda kõikide koormuste juures sarnaselt;
- 4) veokite rataste koormused on rakendatud vertikaalsete punktkoormustena;
- 5) vaadeldakse tähtsamaid alates 1945. aastast Eestis projekteerimisel kasutatud eriveokeid, mis saavad reeglina dimensioonimisel määravaks ja mida on võrreldud katsetamisel kasutatud veokitega (tabel 58).

Tabel 58. Käesolevas jaotises analüüsitavad koormused

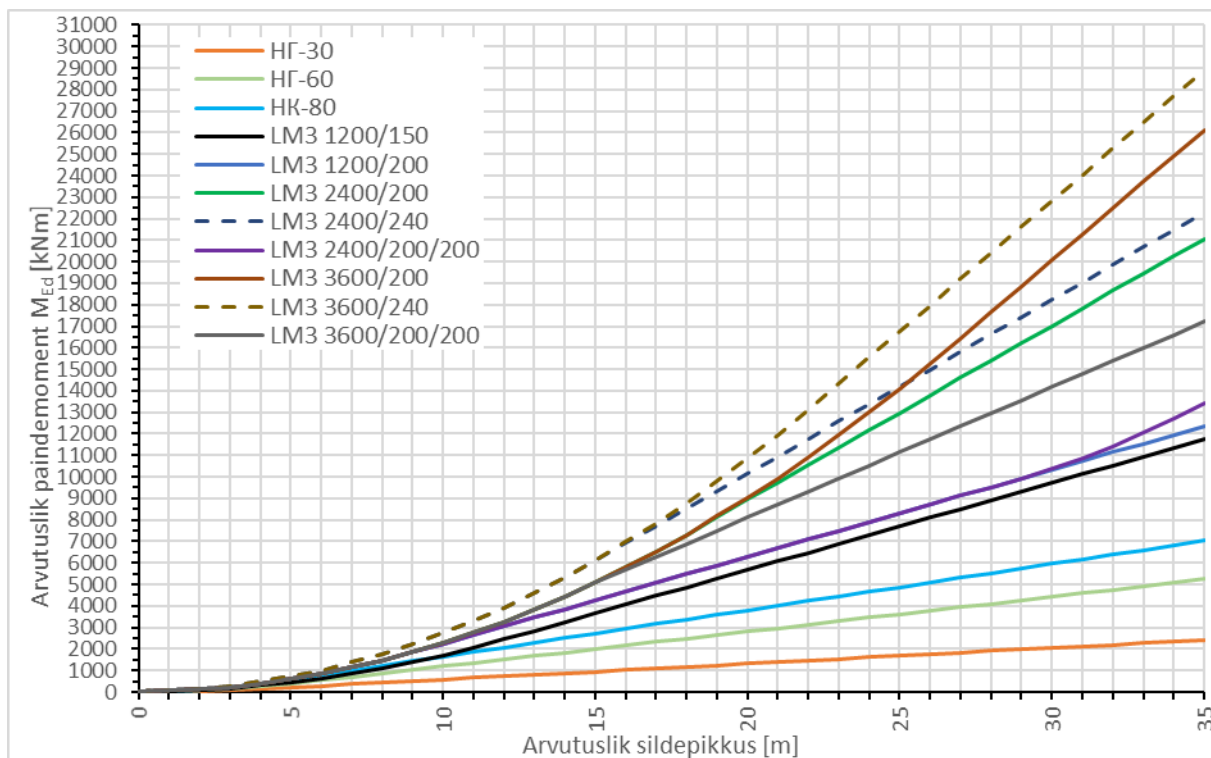
Selgitus	Koormuse tähis	Raskeveokite tähtsamad parameetrid ¹⁾			Osavarutegur (γ) × dünaamikategur (φ)
		Täismass [t]	Pikkus [m]	Laius ¹⁾ [m]	
Eurokoodeksi koormused	LM3 1200/150	122,3	10,65	3,00	1,35
	LM3 1200/200	122,3	7,65	3,00	
	LM3 2400/200	244,6	16,65	3,00	
	LM3 2400/240	244,6	13,65	4,50	
	LM3 2400/200/200	244,6	27,15	3,00	
	LM3 3600/200	367,0	25,65	3,00	
	LM3 3600/240	367,0	21,15	4,50	
NL ajal kasutatud koormused	LM3 3600/200/200	367,0	36,15	3,00	1,00
	HГ-30	30,0	4,00	3,00	
	HГ-60	60,0	5,00	3,30	
Katsetamisel kasutatud koormused	HK-80	80,0	3,80	3,50	1,10 ²⁾
	Tüüp 1	52,0	16,13	2,50	
	Tüüp 2	60,0	16,13	2,50	
	Tüüp 3	52,0	12,95	2,50	
	Tüüp 5	52,0	11,60	2,50	
	Tüüp 6	60,0	7,50	2,60	
Märkused:	Tüüp 7	60,0	5,80	2,60	1,50

1) Mõõdud on siinkohal antud koos rataste/roomikute kokkupuutealaga.
2) Kuni 1962. aastani olid nii koormuse osavarutegurid kui ka dünaamikategurid 1,0.

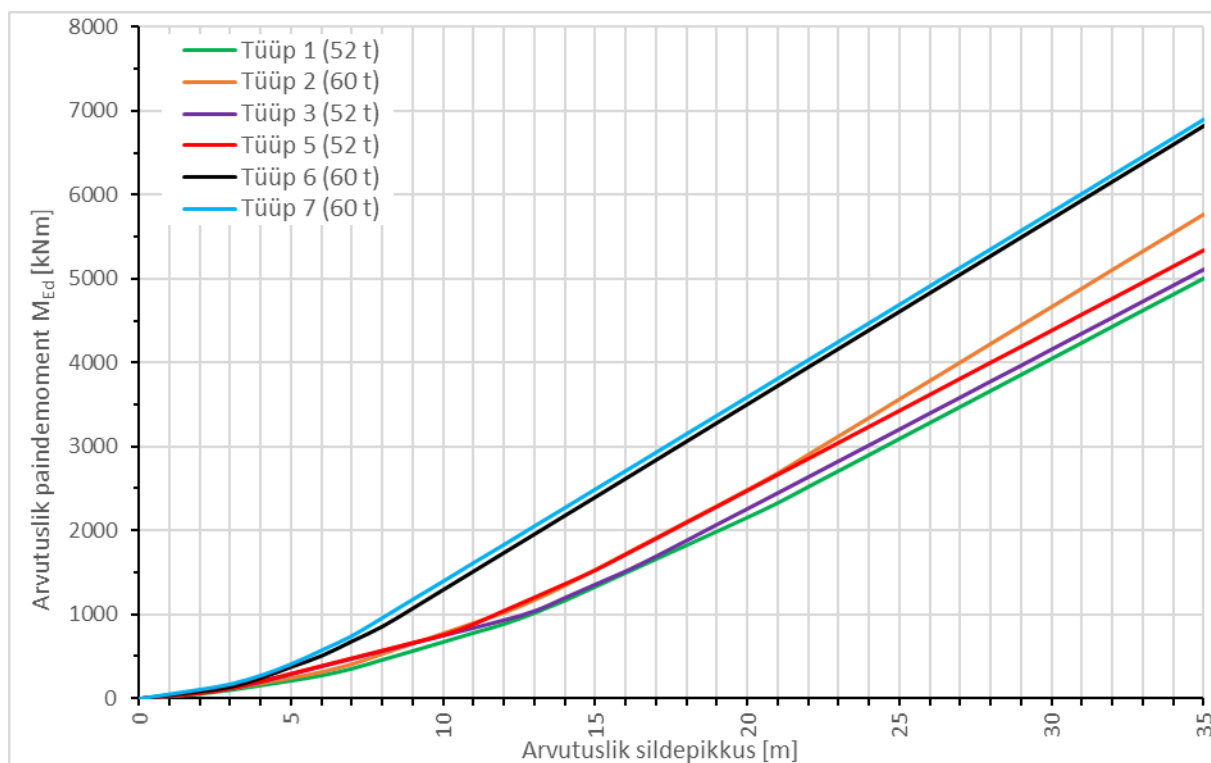
Analüüsi aluseks on [tabelis 59](#) toodud sillateki peakandjate normatiivsed paindemomendid erinevatest raskeveokitest. Tabelis näidatud normatiivsed sisejõud on määratud peakandjate samaaegselt esinevate suurimate sisejõudude summana (teisisõnu – koormuse jagunemist erinevate peakandjate vahel ei ole selles etapis arvesse võetud). Tabelite koostamisel on eeldatud, et korraga paikneb sillal ainult üks raskeveok, mis on silla pikisuunas paigutatud vastava sisejõu suhtes kõige ebasoodsamasse asukohta. Arvutuslikke paindemomente on koormuste kaupa kirjeldatud [joonisel 128...129](#).

Tabel 59. Lihttalade suurim summaarne normatiivne paindemoment erinevate raskeveokite ja silla sildepikkuste korral (korraga paikneb avas ainult üks raskeveok)

Sildepikkus [m]	Normatiivne paindemoment M_{Ek} erinevate raskeveokite ja silla sildepikkuste korral [kNm]																
	Eurokoodeksi koormused								NL ajal kasutatud koormused			Katsetamisel kasutatud koormused					
	LM3 1200/150	LM3 1200/200	LM3 2400/200	LM3 2400/240	LM3 2400/200/200	LM3 3600/200	LM3 3600/240	LM3 3600/200/200	HF-30	HF-60	HK-80	Tüüp 1 (52 t)	Tüüp 2 (60 t)	Tüüp 3 (52 t)	Tüüp 5 (52 t)	Tüüp 6 (60 t)	Tüüp 7 (60 t)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	38	50	50	60	50	50	60	50	9	14	49	19	22	23	23	29	37
2	75	100	100	120	100	100	120	100	35	57	98	38	44	46	46	59	74
3	126	168	168	202	168	168	202	168	79	127	206	69	80	82	82	95	116
4	225	300	300	360	300	300	360	300	140	225	353	106	122	135	139	165	185
5	338	450	450	540	450	450	540	450	213	350	524	143	165	196	200	253	276
6	464	618	618	742	618	618	742	618	287	496	718	185	213	257	261	341	386
7	638	850	850	1020	850	850	1020	850	360	643	912	239	276	318	322	457	500
8	825	1100	1100	1320	1100	1100	1320	1100	434	790	1107	309	357	380	384	575	645
9	1025	1367	1367	1640	1367	1367	1640	1367	507	937	1302	380	438	441	445	718	790
10	1275	1667	1700	2040	1667	1700	2040	1700	581	1084	1498	451	520	502	506	866	934
11	1538	1963	2050	2460	1963	2050	2460	2050	654	1231	1692	523	603	563	593	1012	1082
12	1813	2263	2417	2900	2263	2417	2900	2417	728	1379	1888	593	684	624	700	1160	1226
13	2113	2563	2850	3420	2563	2850	3420	2850	802	1526	2084	681	785	697	804	1307	1373
14	2411	2861	3300	3960	2861	3300	3960	3300	875	1673	2281	780	900	802	912	1454	1519
15	2711	3161	3768	4522	3161	3768	4522	3750	949	1820	2477	889	1026	908	1020	1601	1666
16	3009	3459	4300	5118	3459	4300	5160	4200	1022	1967	2672	999	1152	1014	1146	1748	1812
17	3308	3758	4850	5717	3758	4850	5820	4650	1096	2114	2868	1109	1279	1132	1273	1895	1959
18	3608	4058	5417	6317	4058	5417	6500	5100	1170	2262	3064	1219	1405	1256	1400	2042	2106
19	3908	4358	6017	6917	4358	6050	7260	5550	1243	2409	3260	1328	1532	1383	1525	2190	2251
20	4208	4658	6617	7517	4658	6700	8040	6000	1317	2556	3456	1439	1659	1508	1652	2337	2398
21	4506	4956	7213	8112	4956	7366	8839	6450	1390	2703	3652	1554	1793	1634	1779	2484	2545
22	4806	5256	7812	8712	5256	8100	9720	6900	1464	2850	3848	1682	1940	1761	1905	2631	2693
23	5106	5556	8412	9312	5556	8850	10620	7350	1537	2997	4044	1808	2086	1887	2033	2778	2839
24	5406	5856	9012	9912	5856	9616	11520	7800	1611	3144	4240	1935	2232	2013	2160	2925	2986
25	5706	6156	9612	10512	6156	10450	12420	8250	1685	3292	4437	2063	2380	2140	2286	3073	3133
26	6005	6455	10211	11111	6455	11300	13320	8700	1758	3439	4633	2190	2526	2267	2413	3220	3280
27	6305	6755	10811	11711	6755	12166	14220	9150	1832	3586	4829	2317	2672	2392	2541	3367	3427
28	6605	7055	11411	12311	7055	13066	15120	9600	1905	3733	5025	2444	2820	2520	2668	3514	3573
29	6905	7355	12011	12911	7355	13966	16020	10050	1979	3880	5221	2571	2966	2646	2794	3661	3720
30	7205	7655	12611	13511	7675	14866	16920	10500	2052	4027	5418	2698	3112	2773	2922	3808	3867
31	7504	7954	13209	14108	8042	15764	17820	10950	2126	4174	5613	2825	3259	2900	3050	3955	4015
32	7804	8254	13808	14708	8450	16663	18720	11400	2200	4322	5809	2953	3407	3026	3176	4103	4162
33	8104	8554	14408	15308	8919	17563	19620	11850	2273	4469	6005	3081	3554	3154	3303	4250	4308
34	8404	8854	15008	15908	9432	18463	20520	12300	2347	4616	6202	3208	3700	3281	3431	4397	4455
35	8704	9154	15608	16508	9963	19363	21420	12750	2420	4763	6398	3334	3847	3407	3558	4544	4603



Joonis 128. Alates aastast 1945 projekteerimisel kasutatud eriveokitest tekkivate paindemomentide omavaheline võrdlus, kui kasutada tabelis 58 toodud varutegureid (punktiiriga on näidatud eriveokid, mille laius on suurem ja mille võrdlemine teistega ei ole seetõttu siinkohal asjakohane)



Joonis 129. Käesoleva uurimistöö raames katsetatud veokitüüpidest 1...7 tekkivate paindemomentide omavaheline võrdlus, kui kasutada tabelis 58 toodud varutegureid (NB! 1 veok sillal)

[Joonisel 128](#) on näidatud sisejõud eriveokitest, mida on projekteerimisel kasutatud alates 1945. aastast kuni tänapäevani ning [joonisel 129](#) veokitest, mida kasutati katsetamisel.

Paindemomentide osas saab teha järgmised järeldused:

- Kui jätta kõrvale väiksemad sildepikkused (alla 5 m), kus lisaks koormuse suurusele mängivad paindemomentide määramisel väga tähtsat rolli ka koormuse pikkus ja koormuse kontaktpinna iseloom, siis joonistuvad kuni aastani 2000 projekteerimisel kasutatud jõuvankritest välja selged koormuste vahelised seosed – võrreldes koormusega HK-80 tekitab koormus HF-30 umbes 0,34...0,37 ja HF-60 orienteeruvalt 0,70...0,74 korda väiksemaid arvutuslikke paindemomente.
- Eurokoodeksi eriveokite võrdluses on näha, et mitte alati ei anna täismassilt raskemad veokid suuremaid paindemomente. Eriti on see näha sildepikkuste korral, mis jäävad alla 10...15 m. Raskemad eriveokid on reeglina ka pikemad, mistõttu lühematel silletel ei paikne veokid tervikuna ühes sildeavas ja suure täismassi mõju ei avaldu peakandja avas tekkivas paindemomendis. Nn pikad eriveokid (2400/200/200 ja 3600/200/200) suurimate avamomentide arvutamisel enamasti määravaks ei saa.
- Katsetamisel kasutatud veokitest eristuvad teistest oma suurte paindemomentidega selgelt kaks 60 t kaaluvat kraanat (tüübid 6 ja 7), mis täpsemast analüüsist on välja jäetud, kuna uurimise all on veokid täismassiga 52 t (samuti on tõenäosus, et korraga paiknevad sillal kõrvuti kaks seda tüüpi väga lühikest raskeveokit, suhteliselt väike). Analüüsist jäetakse välja ka kaks kõige pikemat 52-tonnist veokit (tüübid 1 ja 3), kuna nendest tekkivad paindemomendid jäävad raskeveokile tüüp 5 alla. Maanteeametiga kooskõlastatult keskendutakse käesolevas analüüsis raskeveoki tüübile 5, kuna selle pikkus on teiste analoogsete veokitega võrreldes väiksem ja koormuse toime konstruktsioonelementidele reeglina ohtlikum. Tasub veel tähele panna ka asjaolu, et 60 t täismassiga veok tüüp 2 tekitab võrreldes 52 t täismassiga tüübiga 5 suuremaid paindemomente Eesti oludes alles suhteliselt suurte (alates 20 m) sildeavade korral.
- Kõige probleemsemad on need sillad, mille puhul on projektkoormusena kasutatud jõuvankrit HF-30. Nendel sildadel ületavad ka ühest 52 t veokist tekkivad paindemomendid projektkoormusest tekkivaid paindemomente kõikide sildepikkuste korral. Nendele sildadele ei tohiks lubada mitte ühtegi 52 t kaaluvat veokit.

Ülaltoodut arvesse võttes on võimalik määrata üleminekutegureid, mis võimaldavad võrrelda erinevate koormuste mõju sillale. On selge, et kõige täpsem tulemus saadakse ikkagi juhul, kui vaadeldakse konkreetset silda koos seda ületava veokiga, sest mõlemat on võimalik täpselt defineerida ja arvutustes arvesse võtta. Kuid tendentside määratlemiseks tuleb kasutada üldistusi, mille korral lõpphinnangu täpsus küll väheneb, kuid mis on igapäevasel rakendamisel oluliselt lihtsamad.

Siinkohal on välja pakutud meetod, mis võrdleb omavahel erinevatest liikluskoormustest tekkivaid paindemomente. Teisisõnu määratakse projekteerimisel kasutatud eriveokist tekkivad arvutuslikud paindemomendid, mida võrreldakse mõnest teisest raskeveokist (antud juhul tüüp 5) tekkivate vastavate arvutuslike paindemomentidega ning millest lähtuvalt seatakse vaadeldavale raskeveokile täismassi piirang.

Antud arvutusmeetod ei ole võrdsustatav täpse analüüsiga, kus tegelikke silla omadusi ja veoki konfiguratsiooni arvesse võttes on painde- ja põikjõukandevõime määramisel võimalik saavutada täpsem lõpptulemus.

Antud juhul etaloniks valitud raskeveoki tüübist 5 pikemate ja rohkema telgede arvuga veokite korral annab arvutuskäik vea tagavara kasuks.

Kui vaadeldava raskeveoki konfiguratsioon vastab (või on ligilähedane) tüübile 5, siis on veoki lubatav täismass $m_{\max}$ ligikaudselt arvatav järgmiselt:

$$m_{\max} = 52 \times \frac{k_M}{p} \times \frac{\gamma_1 \times \varphi_1}{\gamma_2 \times \varphi_2},$$

kus:

- k_M – silla peakandjate paindemomente arvesse võttev üleminekutegur;
- p – kõrvuti paiknevate veokite arvu arvesse võttev tegur;
- γ_1 – projekteerimisel kasutatud eriveoki koormuse osavarutegur;
- γ_2 – vaadeldava raskeveoki koormuse osavarutegur;
- φ_1 – projekteerimisel kasutatud eriveoki koormuse dünaamikategur;
- φ_2 – vaadeldava raskeveoki koormuse dünaamikategur.

Üleminekutegur k_M sõltub projekteerimisel kasutatud eriveokist ja silla arvutuslikust sildepikkusest. Piisava täpsusega võib üleminekuteguri määrata ka [joonise 130](#) abil. Tegur arvutatakse antud juhul lähtuvalt paindemomentidest ja on avaldatav järgmiselt:

$$k_M = M_1/M_2,$$

kus:

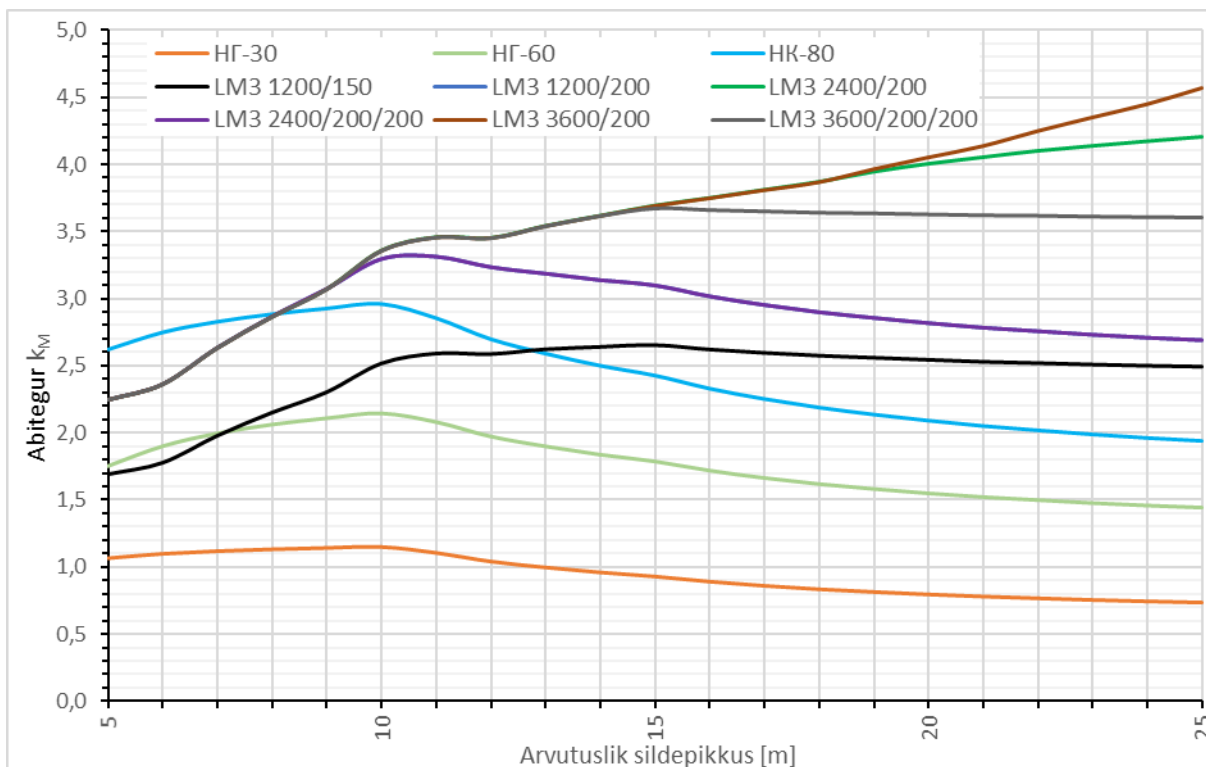
- M_1 – normatiivne paindemoment projekteerimisel kasutatud eriveokist;
- M_2 – normatiivne paindemoment vaadeldavast raskeveokist.

Kõrvuti paiknevate veokite arvu arvesse võttev tegur p arvutatakse põhimõttel, et mitu korda suureneb enimkoormatud peatala paindemoment erinevate veokite arvu korral võrreldes ühe veokiga. Kui veokite arv sillal on 1, siis $p = 1,00$. Mitme kõrvuti paikneva veoki korral on antud tegur igal konkreetsel sillal ka suhteliselt lihtsalt arvatav, kui silla parameetrid täpselt arvesse võtta. Siin on lihtsustatud arvutuste jaoks ühte konkreetset väärtust raske välja tuua, kuna see sõltub silla tüübist ja koormuse jaotusest peatalade vahel. Katsetatud sildade analüüs näitas, et kui lisada võimalikult serva lähedal paikneva veoki kõrvale veel teinegi, siis enimkoormatud tala/paneeli paindemoment suurenes vahemikus 1,15...1,78 korda, olles keskmiselt 1,45. Kõige ekstreemsemaid (st suuremaid) väärtusi ei ole põhjust kasutada, kuna tavaliikluses paiknevad veokid silla põiklõikes mõnevõrra soodsamalt (ehk teineteisest veidi kaugemal ja rohkem tee pikitelje piirkonnas), kui antud uurimistöö analüüsis vaadeldud juhtudel (võimalikult serva lähistel). Seetõttu on mõistlik arvutustes kahe kõrvuti paikneva veoki korral kasutada [tabelis 60](#) toodud väärtuseid: talasildadel $p = 1,4$ ja paneelsildadel $p = 1,6$.

Koormuse osavarutegurid γ jäävad üldjuhul vahemikku 1,00...1,50. Projekteerimisel kasutatud eriveoki osavarutegur sõltub koormuse tüübist ja projekteerimisel aluseks võetud standardist ning on vahemikus $\gamma_1 = 1,00...1,35$ (vt [tabel 61](#)). Vaadeldava raskeveoki korral võib täpsema info puudumisel osavaruteguriks võtta $\gamma_2 = 1,50$. Kui ülesõit on nõ „kontrollitud“ ehk sõiduki liikumiskiirus on väike ja tegelik mass täpselt teada, siis võiks koormuse osavarutegurit vähendada ka kuni väärtuseni 1,10.

Koormuse dünaamikategurid φ on üldjuhul vahemikus 1,00...1,10. Projekteerimisel kasutatud eriveokitel võib teguri φ_1 võtta [tabelist 61](#) ning vaadeldaval raskeveokil $\varphi_2 = 1,00$.

NB! varasemate uurimisandmete põhjal võivad ebasoodsate asjaolude kokkulangemisel dünaamikategurid kasvada kuni väärtuseni 1,50 (harvem ka üle selle), kuid selliseid olukordi peaks vaatlema erijuhtumitena.



Joonis 130. Abiteguri k_M määramine erinevate projektikoormuste korral, kui silda ületab üks raskeveokiga tüüp 5 sarnase konfiguratsiooniga veok

Tabel 60. Kõrvuti paiknevate veokite arvu (2 tk) arvesse võttev tegur, mis on saadud katsetatavate sildade näitel

Peakandja tüüp	Kahe kõrvuti paikneva veoki arvu arvesse võttev tegur p				
	Minimaalne	Maksimaalne	Keskmine	Mediaan	Soovituslik
Talasillad	1,15	1,55	1,35	1,36	1,4
Paneelsillad	1,42	1,78	1,58	1,55	1,6

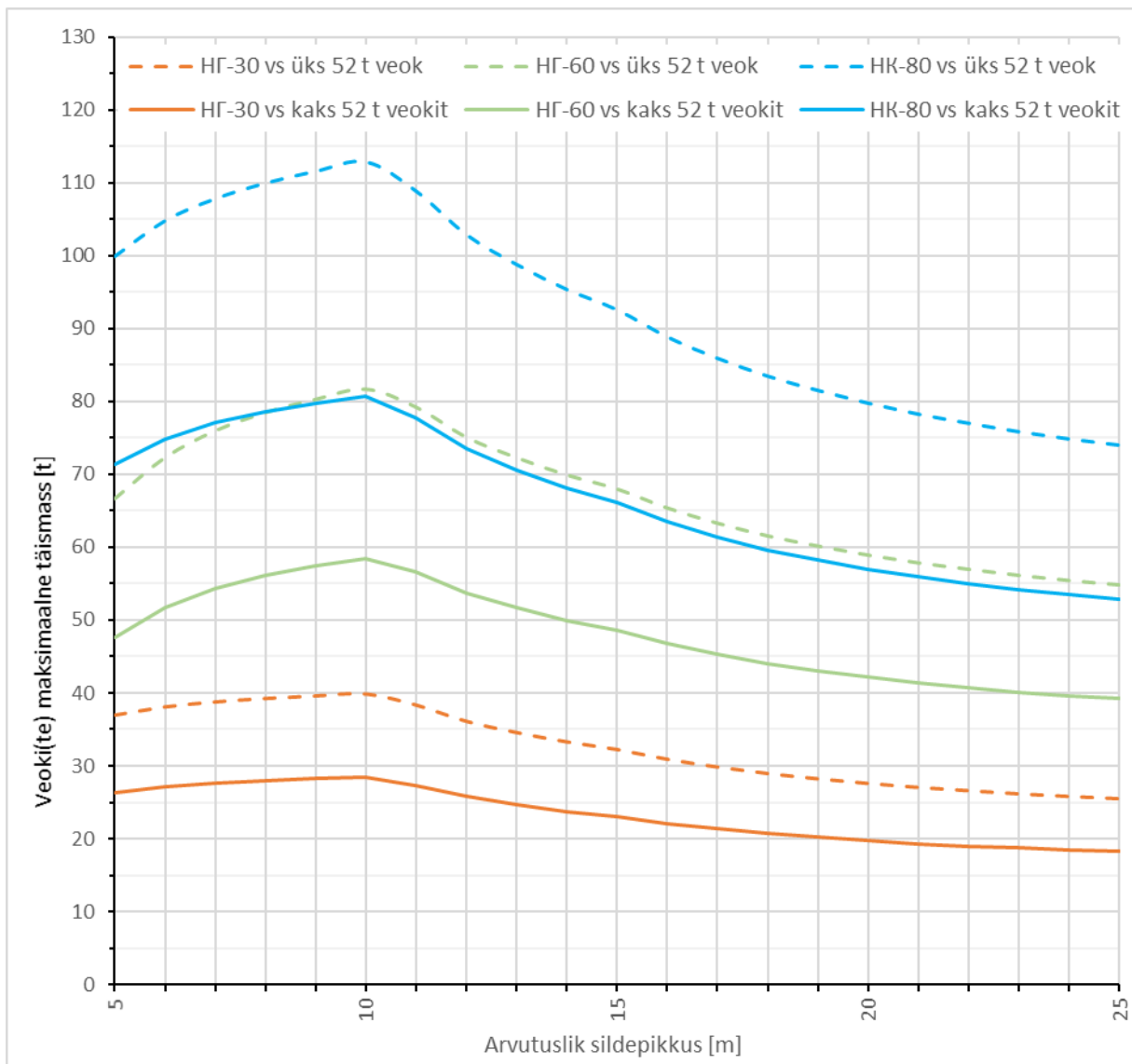
Tabel 61. Projekteerimisel kasutatud eriveokite soovituslikud osavaru- ja dünaamikategurid

Selgitus	Koormus	Osavarutegur γ / dünaamikategur φ				
		1944-1953	1953-1962	1962-1985	1986-2000	2000-...
Eurokoodeksi koormused	Kõik LM3 koormused	-				1,35 / 1,00
NL ajal kasutatud koormused	HF-30	1,00 / 1,00		-		
	HF-60	1,00 / 1,00		1,10 / 1,00	1,00 / 1,10 ¹⁾	-
	HK-80	-	1,00 / 1,00			
Märkused:						
1) Dünaamikategur 1,10 kehtib sildeavadele, mis ületavad 5 m. Kui sildeava on alla 1 m, siis dünaamikategur on 1,30. Vahemikus 1...5 m leitakse dünaamikategur interpoleerimise teel.						

Praktikas huvitavad kasutajaid enim need sillad, mis on ehitatud nõukogude ajal, kuna eurokoodeksite järgi projekteeritud sildadel 52 t veokitega probleeme ei teki. Kui kirjeldada osasid parameetreid kui konstante, on võimalik veelgi lihtsustada ülaltoodud meetodit. Eeldades, et

- koormuse osavarutegurid projekteerimisel kasutatud eriveokitel on kas $\gamma_1 = 1,00$ (HГ-30) või $\gamma_1 = 1,10$ (HГ-60 ja HK-80) ja vaadeldaval veokil $\gamma_2 = 1,50$,
- kõik dünaamikategurid on $\varphi_1 = \varphi_2 = 1,00$ ning
- kõrvuti paiknevate veokite arvu arvesse võttes tegur $p = 1,40$,

siis saab lubatavad sildepikkused 52 t veokite (tüüp 5) jaoks avaldada ka graafilisel kujul ([joonis 131](#)).



Joonis 131. Lihtsala arvutusskeemi järgi töötava talasildade maksimaalsed lubatavad sildepikkused 52 t veokite (tüüp 5) korral, kui $\gamma_1 = 1,00$ (HГ-30) või $\gamma_1 = 1,10$ (HГ-60 ja HK-80), $\gamma_2 = 1,50$, $\varphi_1 = \varphi_2 = 1,00$ ning $p = 1,40$

Arvutusnäide

Arvutada silda ületava veoki maksimaalne täismass, kui

- lihttala arvutusskeemi järgi töötava talasilla arvutuslik sildepikkus on 18 m,
- sild on projekteeritud aastal 1970 koormusele HF-60,
- vaadeldav veok on tüüp 5 (telgede arv: 6, täismass: 52 t, vt [joonis 37](#)).

1) Üleminekuteguri k_M saab määrata [joonise 130](#) abil: $k_M \approx 1,6$.

2) Kõrvuti paiknevate veokite arvust sõltuv tegur:

- kui sillal on 1 veok, siis: $p = 1,0$;
- kui kõrvuti paikneb 2 veokit, siis $p = 1,4$ ([tabel 60](#)).

3) Projektkoormuse HF-60 osavaru- ja dünaamikateguri määramisel tuleb arvesse võtta ka silla projekteerimise aastat, kuna erinevate aastate normid erinesid selles osas. Antud juhul on kasutatud projekteerimisel normi [CH 200-62](#), mille alusel $\gamma_1 = 1,1$, ja $\varphi_1 = 1,0$ ([tabel 61](#)).

4) Vaadeldava veoki korral tuleks rakendada osavarutegurit $\gamma_2 = 1,5$, kuna tegu on eurokoodeksis kirjeldatud nn muu muutuvkoormusega, mistõttu ei ole osavaruteguri 1,35 kasutamine põhjendatud. Samuti võtab see suhteliselt suur koormuse osavarutegur arvesse asjaolu, et veoki teljed ei pruugi olla täpselt samade vahekaugustega ja koormusjaotusega, nagu raskeveoki tüübil 5. Dünaamikateguri võib võtta $\varphi_2 = 1,0$, kuna tavaolukorras sisaldab koormuse osavarutegur juba ka dünaamikateguri komponenti. Dünaamikategurit on põhjust suurendada, kui tee on ebatasane (nt pealesõiduplaadid on tuntavalt vajunud). Siin on täpseid arvväärtusi raske kirjeldada, kuna dünaamikategur on määratav juhtumipõhiselt, kuid üldiselt 1,5-st suuremat väärtust kasutatakse väga harva.

5) Veoki lubatav täismass, kui sillal paikneb 1 veok:

$$m_{\max} = 52 \times \frac{k_M}{p} \times \frac{\gamma_1 \times \varphi_1}{\gamma_2 \times \varphi_2} = 52 \times \frac{1,6}{1,0} \times \frac{1,1 \times 1,0}{1,5 \times 1,0} \approx 61 \text{ t}$$

6) Veokite lubatavad täismassid, kui sillal paikneb 2 veokit kõrvuti:

$$m_{\max} = 52 \times \frac{k_M}{p} \times \frac{\gamma_1 \times \varphi_1}{\gamma_2 \times \varphi_2} = 52 \times \frac{1,6}{1,4} \times \frac{1,1 \times 1,0}{1,5 \times 1,0} \approx 44 \text{ t}$$

Samale tulemusele jõutakse ka [joonist 131](#) kasutades. Esmalt tuleb horisontaalteljel valida väärtuseks 18 m ning liikuda sealt vertikaalselt üles. Kui soovitakse vaadelda kahte 52 tonnist veokit kõrvuti, tuleb vertikaaljoont pikendada kuni roheline pidevjooneni ja kui ühte veokit, siis roheline punktiirjooneni. Liikudes seejärel joonte lõikumispunkti horisontaalselt vasakule, saab vertikaalteljelt lugeda maksimaalse lubatava täismassi väärtuse.

4.4. Sildade seisukord

Kui kahjustused on arenenud piisavalt kaugele, võib silla halb seisukord arvestataval määral vähendada kandevõimet. Käesolevas jaotises on analüüsitud, millistel sildadel tuleks rajatise halva seisukorra tõttu piirata 52 t veokite arvu sillal.

Siinkohal aluseks võetud metoodika ei baseeru laialdaselt kasutataval seisundiindeksil (SI), kuna see on välja töötatud eelkõige sildade võrgutasandi analüüsiks ja antud juhul otseselt rakendatav ei ole. SI iseloomustab silla kui terviku üldist seisukorda, jäädes vahemikku 0...100% (suurem arv näitab paremat seisukorda). SI abil on võimalik hinnata sildu suhteliselt kiiresti ja suures mahus ning tulemused on edukalt kasutatavad sillavõrgu makroanalüüsiks. Kuid SI ei anna läbipaistvat infot sildade kandevõimega seonduvate nüansside kohta. Näiteks on võimalik olukord, kus silla üks peatala on varisemisohlik, kuid kõik teised elemendid (või suurem osa neist) väga heas seisukorras – tervikuna võib juhtuda, et SI on väga kõrge, kuid sillale tuleb rakendada arvestatavaid koormuspiiranguid (äärmuslikul juhul ka liikluseks sulgeda). On ka vastupidiseid näiteid, kus kõik silla elemendid on ühtlaselt keskpärases seisukorras ja SI on seetõttu madal, kuid ühegi elemendi kahjustused ei ole piisavalt ulatuslikud, et vähendada kandevõimet.

Seetõttu on käesolevas aruandes lähenetud probleemile teisiti. Selleks kasutatakse ära SI määramise protsessi esimest etappi, kus hinnatakse igat silda osade (talad, käsipuud, sambad jne) kaupa. Igale elemendile antakse ülevaatus käigus hinne ühest neljani, mida nimetatakse elemendi seisunditaseme määramiseks. Seejuures näitab seisunditase 1 elemendi korrasolekut ja 4 seisukorda, kus elemendi kandevõime on suuremal või vähemal määral hindaja arvates vähenenud (2. ja 3. seisunditaseme korral silla kandevõime vähenenud ei ole).

Andmebaasist selekteeriti välja kõik sillad, millel on vähemalt üks kandevõimet otseselt mõjutav element (peatala, sammas, põiktala jne) ülevaatus käigus määratud seisunditasemesse 4. Seejärel analüüsiti selliseid sildu ükshaaval ja tuvastati kahjustustega lähemalt tutvudes need, mille puhul defektid väga suure tõenäosusega vähendavad silla kui terviku kandevõimet.

Kokku tuvastati 139 silda, millel on vähemalt üks kandevõimega seotud element viimase ülevaatus käigus hinnatud seisunditasemega 4. Neist sildadest:

- 62 juhul tuvastati, et kahjustus on sedavõrd lokaalne, et silla kui terviku kandevõime ei ole vähenenud;
- 61 silla puhul on kahjustused küll ulatuslikumad, kuid arvestatav kandevõime vähenemine tekib ilmselt lähiaastatel;
- 16 silla kahjustused vähendavad arvestatavalt nende kandevõimet.

Sillad, kuhu ei tohiks seisunditaseme 4 tõttu antud hetkel 52 t veokeid peale lubada, on koondatud [tabelisse 62](#). Näiteid³¹ nende sildade kahjustustest on toodud [fotodel 55...70](#).

³¹ Osaliselt on fotod pärit 2015-2018 teostatud ülevaatuselt ja nende autoriteks on Teede Tehnokeskuse AS, Stricto Project OÜ ja Maanteeameti töötajad.

Tabel 62. Sillad, kuhu ei tohiks halva seisukorra tõttu lubada 52 t veokeid

Silla number	Silla nimi	Regioon
54	Saku viadukt	Põhja regioon
57	Valingu viadukt	Põhja regioon
71	Tõdva sild	Põhja regioon
85	Vaida III sild	Põhja regioon
118	Valkla sild	Põhja regioon
171	Valgejõe sild	Ida regioon
231	Türi-Alliku sild	Ida regioon
309	Russalu sild	Põhja regioon
377	Vanamõisa sild	Lääne regioon
442	Ontika sild	Ida regioon
502	Suursild	Lõuna regioon
701	Tori sild	Lääne regioon
715	Oara sild	Lääne regioon
839	Koorvere sild	Lõuna regioon
904	Vana-Roosa sild	Lõuna regioon
997	Soka sild	Lõuna regioon



Foto 55. Saku viadukt



Foto 56. Valingu viadukt



Foto 57. Tõdva sild



Foto 58. Vaida III sild



Foto 59. Valkla sild



Foto 60. Valgejõe sild



Foto 61. Türi-Alliku sild



Foto 62. Russalu sild



Foto 63. Vanamõisa sild



Foto 64. Ontika sild



Foto 65. Suursild



Foto 66. Tori sild



Foto 67. Oara sild



Foto 68. Koorvere sild



Foto 69. Vana-Roosa sild



Foto 70. Soka sild

4.5. Töökindluse ja purunemistõenäosuse analüüs

Järgnevalt on kirjeldatud kokkuvõtlikult sildade töökindlust ja purunemistõenäosust kui ühte silla kandevõimega seotud näitajat (täpsem kirjeldus on [lisas 3](#)). Töökindluse selgitamiseks on vaja eelnevalt täpsustada, et kui silla elemendi kandevõime on otseselt elementide seisukorrast (mitte seisundiindeksist SI), mida on võimalik teatud usaldusväärsusega hinnata, siis sild variseb enamasti koormuste tõttu, mille kohta puudub Eesti kontekstis analüüsitud ning usaldusväärselt töödeldud info. Eelnevast põhjusest tulenevalt on ka keeruline vaadata piirseisundeid tervikuna ja hinnata, kas silla kandevõime või töökindlus on hetke oludele piisav. Sellest tulenevalt põhinevad analüüsid teoreetilistele alustele ja kõik analüüsi käigus saadud tulemused on ligikaudsed.

Süsteemi töökindlus³² on oma olemuselt seotud riskide hindamise ja eri näitajate tõenäosusega seotud muutuse prognoosimisega. Tavapraktikas kasutatakse töökindluse tagamiseks osavarutegureid, mis on aja jooksul pidevalt muutunud. Töökindlus on ajas muutuv suurus juba tänu keskkonna muutustele – hetkel projekteeritakse sildu üldjuhul 100 aastaks, kuid kui vaadata ajas tagasi, siis enam kui 20 aastat tagasi ehitatud sildade teoreetiline kandevõime ei vasta enam hetkel kehtivatele normkoormustele.

Töökindluse analüüs³³ on välja töötatud just selleks, et arvestada ühelt poolt rajatise kandevõimega ja teiselt poolt koormustega. Erinevalt kandevõime varu analüüsimisest on sellesse analüüsi kaasatud ka hindamismetoodika puudustest tulenev määramatus.

Töökindlus on konstruktsiooni või konstruktsiooni osa võime täita projekteerimisel määratud nõudeid, sisaldades ka projekteeritud eluiga. Töökindlust väljendatakse tavaliselt tõenäosusliku suurusena. Märkus: töökindlus hõlmab endas ka konstruktsiooni ohutust, kasutust ja vastupidavust.

Töökindlust võib liigitada töökindluse indeksi β abil, mis arvestab eeldatavat koormuste mõju, kandevõime ja mudeli statistilist muutlikkust. Antud töös on töökindlus defineeritud kõige pealiskaudsemalt läbi kandepiirseisundi, võttes aluseks paindekandevõime.

Nii purunemistõenäosus P_f kui ka töökindluse indeks β on ainult abstraktsed suurused, mis ei pea tingimata kirjeldama tegelikku purunemist, vaid neid kasutatakse tööväärtustena meetodikate kalibreerimiseks ja konstruktsioonide töökindlustasemete võrdlemiseks. Matemaatilises mudelis on töökindluse indeksi väljendatud kui suurust, millega saab iseloomustada kandevõime määramatust, mis on otseselt seotud purunemistõenäosusega: $\beta = -\varphi^{-1}(P_f)$, kus φ on standardse normaaljaotuse kumulatiivne jaotusfunktsioon. Seos purunemistõenäosuse ja töökindluse indeksi vahel on seotud pöördfunktsiooniga, mis on lihtsasti arvutatav.

Nagu eelpool kirjeldatud, siis antud uuringus kasutatakse töökindluse analüüsi täiendava nüansina, mille abil saab rajatise võrrelda ja sellest tulenevalt on neid muutujaid käsitletud kõikidel rajatisel sarnaselt. Täpsustatud uuringu raames on võimalik leida igale sillale täpsem arvutusmudelite määramatus, et selle kaudu juba täpsemalt hinnata rajatise purunemistõenäosust. Täpsustatud uuringu raames saadavad töökindluse hinnangud on väiksema konservatiivsuse tõttu tavaliselt kõrgema väärtusega, kui üldisemal tasemel tehtud uuringud. Kui iga muutujat kirjeldada määramatusega, siis sellega käib alati kaasas jaotusfunktsioon, milleks on antud uuringu raames

³² Inglise keeles: *Reliability*.

³³ Inglise keeles: *Reliability Analysis*.

normaaljaotus ja selle kirjeldamiseks on kaks suurust – keskvärtus μ ja standardhälve σ . Erinevates mudelites kasutatavad väärtused on võetud juhised „Probabilistic Model Code“ [103] ja välja toodud tabelis 63. Lisamärkusena tuleb välja tuua, et neid väärtuseid kasutatakse silla kui kogu süsteemi töökindluse leidmiseks, kus üksikelementide töökindlus ja elementide omavaheline koostöö on arvesse võetud arvutusmudelil. Detailsemal lähenemisel (läheldes ainult üksikelemendi töökindlusest) on võimalik saada täpsemad tulemused.

Tabel 63. Töökindluse analüüsis kasutatud jaotised

Arvutusmudeli tüüp	Jaotus	Normeeritud keskvärtus	Normeeritud variatsiooni-koefitsient
Paindemoment omakaalust	Normaaljaotus	1,0	0,05
Paindemoment raskeveokist	Logaritmiline normaaljaotus	1,0	0,10
Staatileine paindekandevõime	Logaritmiline normaaljaotus	1,2	0,15

Kuna rajatise projekteeritakse kestma kindlaks ajaperioodiks, siis on välja töötatud erinevad töökindluse indeksi sihtväärtused eri juhtumite ja vaatlusperioodide kohta. Standardis EVS-EN 1990 [36] on esimesse töökindlusklassi (RC1) kuuluvate rajatiste kandepiiriseisundi puhul töökindluse 1 aasta minimaalne sihtväärtus 4,2 ja 50 aasta puhul 3,3, mis vastavad purunemistõenäosusele vastavalt 10^{-5} ja 5×10^{-4} . Kuna need suurused on määratud uute rajatiste puhul, siis olemasolevate hindamisel tuleks kasutada teistsuguseid väärtuseid, kuid eurokoodeksis ja „Probabilistic Model Code“ juhises sellist võimalust paraku ei pakuta. Hollandi rahvuslikus standardis NEN 8700 [104] on 15 aasta sihtväärtuseks lubatud kasutada töökindluse indeksit 2,5 (vastab purunemistõenäosusele 0,62%), mille ületamisel peaks sillale teostama remondi. Seda sihtväärtust kasutatakse ka antud töös nii 1 aastase purunemistõenäosuse kui ka pikema perioodi purunemistõenäosuse hindamise sihtväärtusena.

Arvutuste algandmetena on kasutatud kandepiiriseisundi jaotises arvutatud suuruseid ja vastavates juhendites soovitatud parameetreid koos hälvetega. Kõikide sildade puhul on eelduseks võetud sarnased tingimused, et tulemused oleksid omavahel võimalikult sarnase taustsüsteemiga ja sellest tulenevalt paremini võrreldavad. Sarnaste tingimuste eeldamine tähendab seda, et arvutusmudelid, olenemata silla tüübist, olid sama normeeritud määramatusega ja olenemata silla tegelikust asukohast eeldati, et liiklusest tulenev koormus on sillal sama – sillal tekitavad sisejõu omakaalukoormus ja kaks kõrvuti asetsevat 52 tonnist raskeveokit.

Tabelis 64 on välja toodud arvutustes kasutatud keskvärtused ja purunemistõenäosus 1 aasta jooksul. Tulemustest selgub, et ainult Poaka sillal on purunemistõenäosus suurem kui 0,62% ja teistel sildadel on töökindlusega kõik korras. Kui piirväärtuseks võtta standardis EVS-EN 1990 toodud madalaim 1 aasta sihtväärtust 0,0013%, siis 14st sillast vastaks sihtväärtusele ainult 3 silda (Sandra, Vaida III ja Vodja), mis näitab väga selget standardis toodud suuruse konservatiivsust.

Selgitused alljärgnevate tabelite kohta:

- $M_{Em,1}$ – keskmine paindemoment silla omakaalust;
- $M_{Em,2}$ – keskmine paindemoment muutuvkoormusest (kaks 52 t veokit kõrvuti, tüüp 5);
- $M_{Ed,1}$ – arvutuslik paindemoment silla omakaalust;
- $M_{Ed,2}$ – arvutuslik paindemoment muutuvkoormusest (kaks 52 t veokit kõrvuti, tüüp 5);
- $M_{R,mean}$ – keskmine paindekandevõime;
- M_{Rd} – arvutuslik paindekandevõime;
- P_f – purunemistõenäosus.

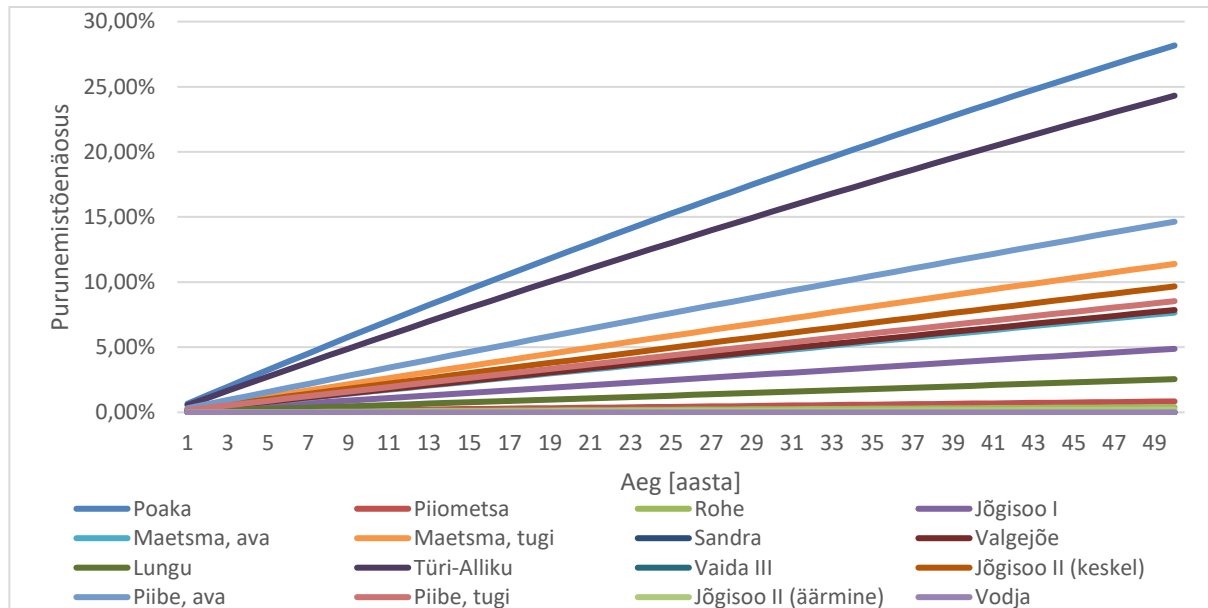
Tabel 64. Paindekontrolli kandepiiriseisundis teostatud purunemistõenäosuse koondtabel

Sild		Paindemoment omakaalust [kNm]		Paindemoment veokist [kNm]		Arvut. painde- kande- võime M_{Rd} [kNm]	Keskm. painde- kande- võime $M_{R,mean}$ [kNm]	Purunemis- tõenäosus P_f 1 aasta jooksul [%]
		$M_{Ed,1}$	$M_{Em,1}$	$M_{Ed,2}$	$M_{Em,2}$			
Poaka sild		572	389	513	316	920	1138	0,66
Piiometsa sild		158	107	260	160	477	590	0,02
Rohe sild		453	308	390	240	1036	1282	0,01
Jõgisoo I sild		3864	2627	2094	1291	5973	7391	0,10
Maetsma sild	ava	1259	856	2643	1629	3689	4565	0,16
	tugi/konsool	2335	1588	3101	1911	4988	6172	0,24
Sandra sild		224	152	167	103	854	1057	0,00
Valgejõe sild		95	64	114	70	197	244	0,16
Lungu sild		887	603	635	391	1603	1984	0,05
Türi-Alliku sild		500	340	557	343	906	1121	0,56
Vaida III sild		354	240	386	238	1214	1502	0,00
Jõgisoo II sild (keskmise ava)		4126	2805	2193	1352	5973	7391	0,20
Piibe sild	ava	333	227	1073	661	1251	1548	0,32
	tugi/konsool	1133	770	1224	754	2224	2752	0,18
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		860	585	381	235	1635	2023	0,00
Vodja sild		38	26	60	37	188	233	0,00

Purunemistõenäosus 1 aasta jooksul on küll hea indikaator sildade võrdlemiseks, kuid otsuste tegemiseks on vajalik hinnata ka purunemistõenäosuse muutust aja jooksul. Tabelis 65 ja joonisel 132 on toodud sildade purunemistõenäosuse muutus aja jooksul. Tabelist on näha, et enamus sildasid (8 tk 14-st) ei vastaks 15 aasta pärast enam purunemistõenäosuse sihtväärtustele ja kõige ebasoodsamas olukorras oleva Poaka silla purunemistõenäosus on peaaegu 10%. Selleks, et hoida sildade purunemiskindlus sihtväärtusest kõrgemal, on nendele sildadele vaja teostada kapitaalremont.

Tabel 65. Uuritud sildade paindekandevõime purunemistõenäosus 15 aasta jooksul

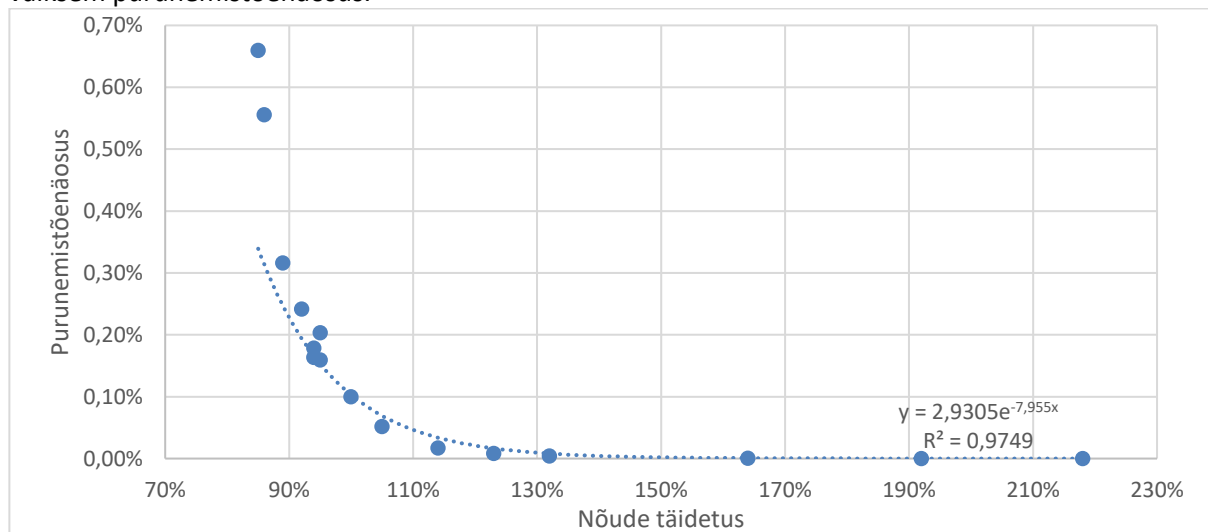
Sild		Purunemis- tõenäosus P_f 15 aasta jooksul [%]	Mitme aasta pärast on piirväärtus ületatud
Poaka sild		9,45	0
Piiometsa sild		0,25	37
Rohe sild		0,12	>50
Jõgisoo I sild		1,49	7
Maetsma sild	ava	2,36	4
	tugi/konsool	3,57	3
Sandra sild		0,00	>50
Valgejõe sild		2,42	4
Lungu sild		0,77	13
Türi-Alliku sild		8,02	2
Vaida III sild		0,00	>50
Jõgisoo II sild (keskmise ava)		3,01	4
Piibe sild	ava	4,64	2
	tugi/konsool	2,64	4
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		0,06	>50
Vodja sild		0,00	>50



Joonis 132. Katsetatud sildade purunemistõenäosuse muutus 50 aasta jooksul

[Joonisel 132](#) on välja toodud sildade purunemistõenäosuste muutumine järgneva 50 a jooksul. Kuna täpsemat informatsiooni ei ole saadaval, siis on purunemistõenäosuse muutused lineaarsed. Jooniselt on näha, et praegu halvemas seisus olevate sildade purunemistõenäosus on 50 aasta pärast juba väga kõrge ja ületab tõenäosuse poolest ka täringu veeretamisel kindla numbri tulemise tõenäosust. See tähendab, et näiteks Poaka sillal piisab juba 4-st halvast eri tingimuse (nt 50% suurema koormuse sattumist nõrgestatud kohta) kokkusattumusest, et sild puruneks paindemomentide tagajärjel.

Kuna kõikides varasemates uuringutes on sildade seisukorda hinnatud läbi kandevõime varu, siis järevalt on omavahel võrreldud töökindluse analüüsi tulemusi ja paindekandevõime nõude täidetuse omavahelisi seoseid. Vastavad tulemused on esitatud ka [joonisel 133](#). Jooniselt on näha, et tulemustel on väga tugev eksponentsiaalne seos, mis tähendab, et sillad, millel on suur kandevõime varu, on ka väiksem purunemistõenäosus.



Joonis 133. Paindekandevõime nõude täidetuse ja purunemistõenäosuse suhe

Tabelis 66 on toodud osavarutegurite väärtused, mis on arvutatud tundlikkustegurite ja töökindluse põhjal. Tabelist on näha, et tundlikkustegurid varieeruvad vähe ja suurused on pigem väiksemapoolsed. Samas on ka näha, et mõnel juhul ei vasta koormuse ja kandevõime hälvete suhe standardis toodud piirväärtusele ehk on madalam, kui soovitatud piirväärtus 0,16.

Kui osavarutegurite arvutuse aluseks kasutada soovituslikke tundlikkustegureid ja standardis toodud 1-aastase töökindluse indeksi sihtväärtust (4,2), siis sellisel juhul peaks kandevõime arvutamiseks kasutama osavarutegurit 1,73, omakaalule osavarutegurit 1,05 ja veokitele 1,08.

Tabel 66. Tundlikkustegurid ja osavarutegurid

Sild		Tundlikkustegurid			Veoki koormuse ja kandevõime standardhälvete suhe σ_E/σ_R	Osavarutegurid		
		α_R	α_G	α_Q		γ_R	γ_G	γ_Q
Poaka sild		0,98	-0,11	-0,16	0,19	1,35	1,08	1,15
Piiometsa sild		0,98	-0,06	-0,16	0,18	1,82	1,08	1,13
Rohe sild		0,99	-0,08	-0,11	0,12	1,95	1,07	1,15
Jõgisoo I sild		0,99	-0,12	-0,10	0,12	1,58	1,07	1,16
Maetsma sild	ava	0,97	-0,06	-0,21	0,24	1,50	1,08	1,13
	tugi/konsool	0,98	-0,08	-0,18	0,21	1,46	1,08	1,14
Sandra sild		1,00	-0,05	-0,06	0,06	3,48	1,08	1,16
Valgejõe sild		0,98	-0,09	-0,17	0,19	1,51	1,08	1,14
Lungu sild		0,99	-0,10	-0,12	0,13	1,67	1,07	1,15
Türi-Alliku sild		0,97	-0,10	-0,18	0,20	1,36	1,07	1,14
Vaida III sild		0,99	-0,05	-0,09	0,11	2,61	1,08	1,15
Jõgisoo II sild (keskmine ava)		0,98	-0,12	-0,11	0,12	1,49	1,07	1,16
Piibe sild	ava	0,96	-0,05	-0,25	0,28	1,41	1,08	1,12
	tugi/konsool	0,98	-0,09	-0,16	0,18	1,50	1,08	1,14
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		0,99	-0,10	-0,07	0,08	2,07	1,07	1,17
Vodja sild		0,99	-0,04	-0,09	0,11	3,05	1,07	1,14

Arvutuste ja analüüsi tulemusena võib kokkuvõttes väita, et lühema perioodi jooksul ei ole sildade purunemistõenäosus suur, kuid pikema perioodi jooksul tuleb vajaliku purunemiskindluse tagamiseks sildu remontima hakata.

Selleks, et sildade töökindlust ja purunemistõenäosust täpsemalt uurida, on esmalt vaja selgeks teha Eestis esinevad liikluskoormused ja koormusjaotused. Seejärel saab hakata teostama igale üksikule sillale detailsemat töökindluse analüüsi, muutes seeläbi otsuste tegemise veelgi ratsionaalsemaks.

4.6. Riskigruppi kuuluvad sillad

Riskigrupi sildadena on käesolevas jaotises käsitletud neid sildu, mille puhul on põhjust kehtestada piirangud 52 tonniste veokite suhtes. Kokku vaadeldi nelja erinevat kriteeriumi piirangute kehtestamiseks. Eelnevates jaotistes teostatud analüüsi arvesse võttes saab teha järgmised järeldused:

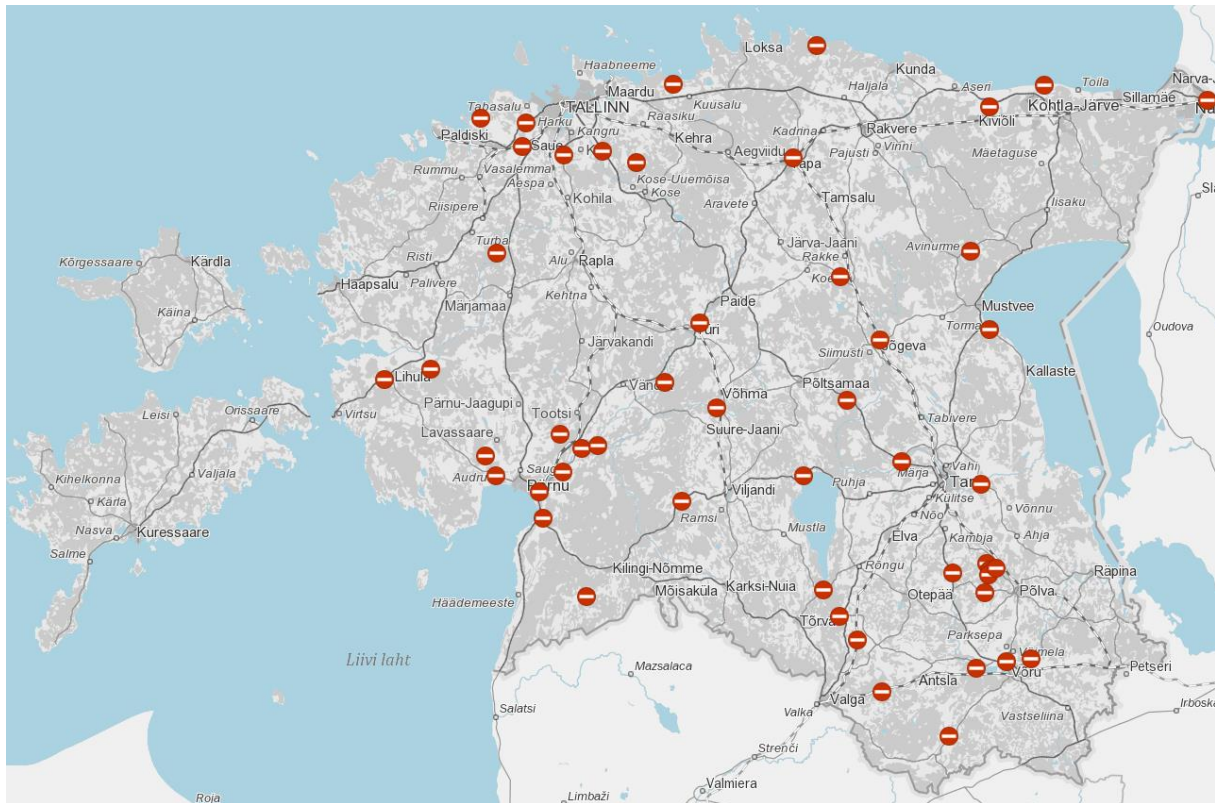
- Kõige probleemsemad (pidades silmas 52 t veokeid) on need sillad, mille puhul on projektkoormusena kasutatud jõuvankrit HF-30. Nendel sildadel ületavad 52 t veokist tekkivad paindemomendid projektkoormusest tekkivaid paindemomente kõikide sildepikkuste korral. Selliseid sildu on riigiteedel kokku 11 ja nendele sildadele ei tohiks lubada mitte ühtegi 52 t kaaluvat veokit.
- Teiseks probleemseks kogumiks on konsoolidega talasillad (kokku 23 tk), mis on kõik projekteeritud koormusele HF-60. Neid sildu tohib ületada ainult üks 52 t veokite kolonn ja kõrvuti need veokid paikneda ei tohi. Siin saab määravaks peatala toel tekkiv paindemoment, mis on ühe kolonni korral lähedane lubatud piirväärtusele.
- Kolmandaks on need sillad (kokku 7 tk), mille puhul ületatakse nn kriitilist sildepikkust (see jääb tüüpkonstruktsioonidel sõltuvalt projektkoormusest ja silla tüübist üldistusi kasutades valdavalt vahemikku 15...24 m). Kriteeriumiks on võetud sildepikkus, kus kaks kõrvuti paiknevat 52 tonniste veokite kolonni tekitavad peatalades projektkoormusega võrreldes suuremaid paindemomente. Üks veokite kolonn nendele sildadele probleeme ei valmista. Neid sildu, mille väikese laiuse tõttu 2 kolonni kõrvuti peale ei mahugi, ei ole eraldi välja toodud.
Eraldi väärivad siinkohal väljatoomist suureavalised (üle 24 m sildeavaga) sillad, mille projekteerimisel on kasutatud jõuvankreid HK-80/HK-80×1,5 ja autokolonne H-30/A-11 (nt Kärevere III sild, Riisipere viadukt, Kärkna sild, Pärnu Uussild jne). Sellistel sildadel ei teki reeglina probleeme 52 tonniste veokitega. Valdavalt on need sillad niivõrd laiad, et projekteerimisel on arvestatud 4-5 autokolonniga, mille korral peakandjate paindemomendid ületavad 52 tonnistest veokitest tekkivaid sisejõude. Paljudele nendest sildadest on varasemalt teostatud ka põhjalik analüüs, mida on siinkohal ka arvestatud. Ainsa erandina on nendest sildadest riskigrupi nimekirjas Narva Sõpruse sild, mille 2005. aastal läbi viidud proovikoormamine näitas, et silla kandevõime ei võimalda piiranguteta 52 t veokite lubamist sillale (sellel sillal kasutati projekteerimisel autokolonne H-18).
- Välja selekteeriti ka sillad, mille korral on halvenenud seisukord vähendanud silla kandevõimet (kokku on neid 16). Ka nendel sildadel ei teki ühe veokikolonni korral kandevõimega probleeme, kuid vältida tuleb kõrvuti paiknevate 52 t veokite kolonnide sattumist sillale.

Kuna osadel sildadel avaldus ka mitu piiravat kriteeriumit, siis kokku on probleemseid sildu 52³⁴ (tabel 67), mis moodustab riigiteedel asuvatest sildadest umbes 5%. Nendest 11 on sellised, kus tuleb täielikult välistada 52 tonniste veokite kasutamine, kuid ülejäänutel on võimalik lubada 52 t veokid sillale ühes kolonnis. Probleemsetest sildadest 9 paiknevad põhimaanteedel.

³⁴ Aruande valmimise hetkel on neist kahel (Saku viadukt ja Vasalemma sild) uue ehitise valmimine pooleli.

Tabel 67. Sillad, kus tuleks kas täielikult või osaliselt piirata 52 tonniste veokite liiklemine

Silla nr.	Silla nimetus	Ehitus-aasta	Liiga väike Projekt-koormus	Konsooli-dega tala	Liiga suur sildepiikkus	Halb seisukord	Selgitus
21	Hüüru sild	1958		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
54	Saku viadukt	1974				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
57	Valingu viadukt	1962				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
71	Tõdva sild	1975				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
72	Vasalemma sild	1957		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
85	Vaida III sild	1958				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
88	Mallavere sild	1951	x				52 t veokite täielik keeld
118	Valkla sild	1975	x			x	52 t veokite täielik keeld
138	Keila Joa sild	1974		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
171	Valgejõe sild	1964				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
173	Piibe sild	1962		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
195	Altja sild	1963		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
231	Türi-Alliku sild	1963				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
309	Russalu sild	1847	x			x	52 t veokite täielik keeld
351	Tuudi sild	1957		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
377	Vanamõisa sild	1825				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
422	Maetsma sild	1959		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
442	Ontika sild	1930				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
451	Kalmistu sild	1995	x				52 t veokite täielik keeld
465	Narva Sõpruse sild	1968		x	x		52 t veokid lubatud ühes kolonnis
469	Pikknurme sild	1956		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
485	Omedu sild	1957		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
502	Suursild	1972				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
532	Kärevere II sild	1950		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
544	Luunja sild	1953		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
600	Oiu sild	1957			x		52 t veokid lubatud ühes kolonnis
619	Puna sild	1955		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
633	Navesti sild	1959			x		52 t veokid lubatud ühes kolonnis
698	Sindi-Lodja sild	1954			x		52 t veokid lubatud ühes kolonnis
700	Kurina sild	1952		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
701	Tori sild	1956			x	x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
715	Oara sild	1963				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
719	Audru sild	1910	x				52 t veokite täielik keeld
731	Suigu sild	1953		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
744	Kurgja sild	2001			x		52 t veokid lubatud ühes kolonnis
747	Jõesuu sild	1959		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
761	Viisireiu sild	1959		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
786	Uulu sild	1938	x	x			52 t veokite täielik keeld
829	Kuke sild	1931	x				52 t veokite täielik keeld
830	Karilatsi sild	1934	x				52 t veokite täielik keeld
831	Alamusti sild	1934	x				52 t veokite täielik keeld
832	Ihamaru sild	1950	x				52 t veokite täielik keeld
837	Sulaoja sild	1930	x				52 t veokite täielik keeld
839	Koorvere sild	1962				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
888	Kirumpää sild	1957		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
890	Kääpa sild	1959		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
898	Sõmerpalu sild	1958		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
904	Vana-Roosa sild	1964				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
976	Pikasilla sild	1959			x		52 t veokid lubatud ühes kolonnis
983	Kuninga sild	1949		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis
997	Soka sild	1974				x	52 t veokid lubatud ühes kolonnis
1004	Lotta sild	1948		x			52 t veokid lubatud ühes kolonnis



Joonis 134. Sillad, kus tuleks kas täielikult või osaliselt piirata 52 tonniste veokite liiklemine [\[112\]](#)

[Joonisele 134](#) on kantud nende sildade skemaatilised asukohad, kus tuleks hetkeseisuga keelata (või piirata) 52 t kaaluvate veokite liiklemine. Täpsem info antud sildade kohta on kantud Maanteeameti kaardirakendusele.

Piirangud puudutavad üheksat põhimaanteedel paiknevat silda:

- Narva sild (tee nr 1/E20, Tallinn–Narva);
- Pikknurme sild (tee nr 2/E263, Tallinn–Tartu–Võru–Luhamaa);
- Kärevere II sild (tee nr 2/E263, Tallinn–Tartu–Võru–Luhamaa);
- Hüüru sild (tee nr 8, Tallinn–Paldiski);
- Tuudi sild (tee nr 10, Risti–Virtsu–Kuivastu–Kuressaare);
- Valingu viadukt (tee nr 11/E265, Tallinna ringtee);
- Saku viadukt (tee nr 11/E265, Tallinna ringtee);
- Oiu sild (tee nr 92, Tartu–Viljandi–Kilingi-Nõmme);
- Puna sild (tee nr 92, Tartu–Viljandi–Kilingi-Nõmme).

4.7. Investeeringute vajadus

Sildu, mille puhul on põhjust kehtestada piirangud 52 tonniste veokite suhtes, on kokku 52. Käesolevas jaotises hinnatakse seda, kui suured peavad orienteeruvalt olema investeeringud, et vastavaid piiranguid ei oleks vaja kasutada. Investeeringuvajaduste põhimõtted tuginevad Maanteeameti dokumendile „Riigiteedel olevate sildade remondiobjektide valiku metoodiline juhend“ [102].

Rahalised vajadused on arvatud tuginedes teeregistris olevatele andmetele. Seejuures on iga välja valitud silla puhul rakendatud järgnevaid põhimõtteid:

- Kui sild ei kuulu nn riskigruppi, siis see sild jääb rahaliste vajaduste arvutusest välja ja selle silla investeeringuvajaduste leidmisel tuleb lähtuda üldpõhimõtetest.
- Kui silla kandevõime ei vasta nõuetele, siis on vaja sild ümber ehitada. Siia alla kuuluvad sillad, mille puhul on projektkoormusena kasutatud jõuvankrit HГ-30, konsoolidega talasillad projektkoormusega HГ-60 või mille sildepikkus ületab soovituslikku piirväärtust. Sellisel juhul on arvestatud silla ümberehituse maksumuseks 2250 eurot tekiplaadi ruutmeetri kohta, mis sisaldab ka pealesõitude rajamist 25 meetri ulatuses kummalegi poole.
- Kui sillal on mõni kandevelement, mille halvast seisundist tulenevalt on silla kandevõime vähenenud ja silla vanus ei lähene 100 aastale, siis teostatakse sillale kapitaalremont maksumusega 1225 eurot tekiplaadi ruutmeetri kohta (arvestusega, et remont teostatakse ainult sillale).
- Kõik maksumused on toodud arvestusega, et tööd teostatakse aastal 2020. Kui töid teostatakse hiljem (n aasta võrra), siis tuleks ehituskulud diskonteerida järgmise valemiga:

$$\text{Ehitusmaksumus aastal } 2020+n = (\text{Ehitusmaksumus aastal } 2020)/(1-\text{diskontomäär})^n$$

Arvutustes on diskontomääraks valitud 4%, mis on võetud varasemate Maanteeameti poolt tellitud tasuvusanalüüside põhjal (nt [101]). Alternatiivse väärtusena võib kasutada ka viimaste aastate ehitushinnaindeksi muutust, mis on kõikunud vahemikus -0,8...+1,7%.

Tabelisse 68 koondatud analüüs näitab, et kui võtta eesmärgiks 52 tonniste veokite lubamine kõikidele riigiteedel asuvatele sildadele, siis see läheb 2020. aasta seisuga maksma orienteeruvalt 43,6 milj eurot (2025. ja 2030. aastal vastavalt 53,4 ja 65,5 milj eurot). Siinkohal tuleks kindlasti arvestada asjaolu, et Maanteeameti strateegia võib remonditavate sildade suhtes olla erinev, kuna eesmärgiks saab olla ka nt silla laiuse või kandevõime suurendamine, mistõttu osade remonti vajavate sildade asemele või kõrvale ehitatakse sel juhul täiesti uus sild (nt Saku viadukt) ning see suurendab mõnevõrra tabelis toodud maksumust.

Investeeringuvajadustest on näha, et kõikide sildade korraga parendamine ei ole varasemate eelarvestrateegiatega kohaselt võimalik ja seetõttu on soovitatud ajastada kõikide sildade parendamine järgmisele 10-le aastale. Sellisel juhul oleks igal aastal vaja investeerida sildade parendamisse lisaks umbes 4,9 miljonit eurot, mis tähendaks praegu kehtiva eelarve juures sildade remondi osa suurendamist umbes kaks korda (v.a aastal 2022).

Tabel 68. Investeeringute vajadus sildadele, kus tuleks piirata 52 tonniste veokite liiklemist

Silla nr.	Silla nimetus	Tekiplaadi pindala [m ²]	Tegevus	Maksumus [eur]		
				Aastal 2020	Aastal 2025	Aastal 2030
21	Hüüru sild	273,6	Ümberehitus	615 600	755 000	925 900
54	Saku viadukt	772,8	Remont	946 700	1 161 100	1 424 000
57	Valingu viadukt	838,1	Remont	1 026 700	1 259 200	1 544 300
71	Tõdva sild	150,0	Remont	183 800	225 400	276 500
72	Vasalemma sild	355,1	Ümberehitus	799 000	979 900	1 201 800
85	Vaida III sild	309,2	Remont	378 800	464 600	569 800
88	Mallavere sild	34,2	Ümberehitus	77 000	94 400	115 800
118	Valkla sild	95,0	Ümberehitus	213 800	262 200	321 600
138	Keila Joa sild	488,3	Ümberehitus	1 098 700	1 347 500	1 652 600
171	Valgejõe sild	124,0	Remont	151 900	186 300	228 500
173	Piibe sild	270,4	Ümberehitus	608 400	746 200	915 100
195	Altja sild	80,5	Ümberehitus	181 100	222 100	272 400
231	Türi-Alliku sild	228,1	Remont	279 400	342 700	420 300
309	Russalu sild	156,2	Ümberehitus	351 500	431 100	528 700
351	Tuudi sild	367,1	Ümberehitus	826 000	1 013 000	1 242 400
377	Vanamõisa sild	420,0	Remont	514 500	631 000	773 900
422	Maetsma sild	303,2	Ümberehitus	682 200	836 700	1 026 100
442	Ontika sild	27,9	Remont	34 200	41 900	51 400
451	Kalmistu sild	151,0	Ümberehitus	339 800	416 700	511 100
465	Narva Sõpruse sild	2835,0	Ümberehitus	6 378 800	7 823 200	9 594 600
469	Pikknurme sild	278,3	Ümberehitus	626 200	768 000	941 900
485	Omedu sild	696,9	Ümberehitus	1 568 000	1 923 000	2 358 500
502	Suursild	509,2	Remont	623 800	765 000	938 300
532	Kärevere II sild	289,4	Ümberehitus	651 200	798 700	979 500
544	Luunja sild	1112,7	Ümberehitus	2 503 600	3 070 500	3 765 800
600	Oiu sild	327,1	Ümberehitus	736 000	902 700	1 107 000
619	Puna sild	307,8	Ümberehitus	692 600	849 400	1 041 800
633	Navesti sild	409,4	Ümberehitus	921 200	1 129 800	1 385 600
698	Sindi-Lodja sild	1957,2	Ümberehitus	4 403 700	5 400 800	6 623 800
700	Kurina sild	283,9	Ümberehitus	638 800	783 400	960 800
701	Tori sild	1060,5	Ümberehitus	2 386 100	2 926 400	3 589 000
715	Oara sild	126,9	Remont	155 500	190 700	233 900
719	Audru sild	320,6	Ümberehitus	721 400	884 700	1 085 100
731	Suigu sild	186,0	Ümberehitus	418 500	513 300	629 500
744	Kurgja sild	385,0	Ümberehitus	866 300	1 062 500	1 303 000
747	Jõesuu sild	800,4	Ümberehitus	1 800 900	2 208 700	2 708 800
761	Viisireiu sild	163,0	Ümberehitus	366 800	449 900	551 700
786	Uulu sild	262,5	Ümberehitus	590 600	724 300	888 300
829	Kuke sild	41,3	Ümberehitus	92 900	113 900	139 700
830	Karilatsi sild	37,2	Ümberehitus	83 700	102 700	125 900
831	Alamusti sild	37,2	Ümberehitus	83 700	102 700	125 900
832	Ihamaru sild	31,7	Ümberehitus	71 300	87 400	107 200
837	Sulaoja sild	28,0	Ümberehitus	63 000	77 300	94 800
839	Koorvere sild	290,7	Remont	356 100	436 700	535 600
888	Kirumpää sild	476,2	Ümberehitus	1 071 500	1 314 100	1 611 700
890	Kääpa sild	482,0	Ümberehitus	1 084 500	1 330 100	1 631 200
898	Sõmerpalu sild	353,6	Ümberehitus	795 600	975 800	1 196 700
904	Vana-Roosa sild	321,1	Remont	393 300	482 400	591 600
976	Pikasila sild	1080,9	Ümberehitus	2 432 000	2 982 700	3 658 100
983	Kuninga sild	78,3	Ümberehitus	176 200	216 100	265 000
997	Soka sild	72,6	Remont	88 900	109 000	133 700
1004	Lotta sild	177,6	Ümberehitus	399 600	490 100	601 100
KOKKU:				43 551 400	53 413 000	65 507 300

KOKKUVÕTE

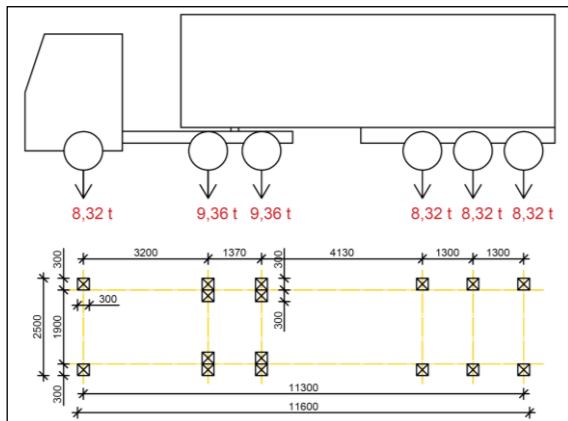
Käesoleva uurimistöö [esimeses peatükis](#) on tehtud kokkuvõtte varasematest uuringutest, mis puudutavad suurendatud massiga veokeid või sildade kandevõimet. Vaadeldud on tähtsamaid Eestis valminud uurimistöid, mis on teostatud ajavahemikus 2010 kuni 2019. Samuti on vaadeldud Läti, Leedu ja Venemaa analoogseid uurimistöid. Peamiselt on Eestis teostatud uuringutes käsitletud vanade sildade sobivust tänapäevastele koormustele ning lisaks on kaalutletud laiendamist ja tugevdamist, viies parendustegevustega projekteeritud kandevõimed vastavusse uute nõuetega. Kajastatud uuringutes on üldiselt leitud, et vanemad sillad suudavad suurendatud koormust enamjaolt vastu võtta. Samas on välja toodud, et kõikide sildade seisukord ei ole uueväärne ja tulenevalt madalast seisundiindeksist on välja toodud rajatised, mis ei ole sobilikud suuremate koormuste vastuvõtmiseks – selliseid rajatisi on nendes uuringutes välja toodud kuni paarsada. Mõnes uuringus on käsitletud ka teisi taristuga seotud toimivusnäidikuid nagu näiteks ohutus, keskkonnasäästlikkus ja investeringute vajadus. Enamuste varasemate uuringute suureks puuduseks tuleb lugeda asjaolu, et hinnangute andmiseks kasutatud seisundiindeks (SI) ei anna informatsiooni kandevõime seisukohalt ja seetõttu ei ole sobilik näidik kirjeldamiseks rajatise puudulikku kandevõimet. SI iseloomustab hästi küll üldiseid tendentse, kuid ei ole sobivaim parameeter otsustamiseks silla (eba)sobiva kandevõime üle. Seetõttu tuleb kriitiliselt suhtuda ka uuringutes väljatoodud investeeringuvajadustesse, kuna need baseeruvad enamasti seisundiindeksite põhjal välja valitud sildadel. Samuti tuleb juhtida tähelepanu asjaolule, et üheski uuringus ei ole arvesse võetud tänapäeval maailmas laialt levinud liikluskoormusega ja kandevõimet vähendavate kahjustusprotsessidega arvestavaid arvutusmudeleid ega hinnatud terviklikult rajatiste töökindlust (kandevõime säilimine ajas) uutes liiklustingimustes.

[Teises peatükis](#) on kirjeldatud Eestis kasutatud liikluskoormuseid alates 1945. aastast, kuna riigiteedel paiknevast orienteeruvalt 1000 sillast on 93% ehitatud sellel perioodil. Peatükk on jaotatud kaheks, kuna aastatel 1945 kuni 2000 kasutati suhteliselt sarnastel alustel baseeruvaid liikluskoormuseid ning alates aastast 2000 on Eestis kasutatud liikluskoormuseid, mis vastavad Euroopa Liidus kasutatavatele. On oluline märkida, et kogu vaadeldava perioodi jooksul on kasutatud erinevaid liikluskoormuseid ja seda nii koormuse iseloomu, paigutuse kui ka koormusmudeli rakendamise reeglite osas. Kokku on antud ülevaade 7 erinevast eeskirjast, mida peale teist maailmasõda on Eestis rakendatud.

[Kolmas peatükk](#) käsitleb antud uuringu praktilist osa, milleks on 14 silla proovikoormamine. Vastavad katsetused viidi läbi ajavahemikus september 2018 kuni juuni 2019. Peamiseks eesmärgiks oli olemasolevatel nõukogudeaegsetel enamlevinud tüüpsildadel teostada reaalsed koormuskatsetused raskeveokitega, mille käigus kontrolliti ja valideeriti vastavaid arvutusmudeleid. Katsetamiseks valiti välja eri konfiguratsioonidega 52- ja 60-tonnise täismassiga raskeveokid (kokku 6 erinevat tüüpi).

[Neljas peatükk](#) hõlmab uurimistöö põhifookust – nii teoreetilist kui ka katsetulemuste analüüsi. Kõigepealt on analüüsitud katsetulemusi, millest lähtuvalt korrigeeriti sildade arvutusmudeleid. Sellele järgnes kontrollarvutuste teostamine kande- ja kasutuspiiriseisundis ning üleminekutegurite leidmine algsete projektikoormuste ja 52 t veoki vahel. Täiendava nüansina toodi sisse ka sildade seisukord ning töökindluse ja purunemistõenäosuse analüüs. Kõige lõpuks on koostatud riskigruppi kuuluvate sildade nimekiri ning hinnatud investeeringuvajadusi piirangute likvideerimiseks. Analüüsi on kaasatud ainult riigiteedel paiknevad sillad, sest teiste sildade osas on teeregister puudulik.

Enim on uuringus tähelepanu pööratud 52-tonnise täismassiga ning 6-teljelistele metsa- ja karjääriveokitele, mis koosnevad 3-teljelisest vedukist koos 3-teljelise poolhaagisega (antud uuringus defineeritud kui tüüp 5, vt [joonis 135](#) ja [foto 71](#)). Selle põhjuseks on asjaolu, et antud veoki pikkus on teiste analoogsete veokitega võrreldes väiksem ja koormuse toime sillakonstruktsioonidele reeglina ohtlikum.



Joonis 135. Raskeveoki tüüp 5 (täismass 52 t)



Foto 71. Raskeveoki tüüp 5 (täismass 52 t)

Uuringu tähtsamad tähelepanekud on järgmised:

1) Katsetulemuste analüüs

• Staatile koormamine

Sildade mõõdetud peatalade läbipainded korreleerusid seisva koormuse korral suhteliselt hästi arvutatutega ([joonis 93](#) ning [tabelid 40...41](#)). Seejuures olid katsetamise käigus mõõdetud maksimaalsed läbipainded (iga silla enimkoormatud tala/paneel) keskmiselt 9% väiksemad kui arvutatud väärtused. Koormamise perioodil suurenesid talade läbipainded enamasti kuni 10% võrra, üksikutel juhtudel ka kuni 20% ([tabel 42](#)). Vaatlusaja lõpuks jäid jäävdeformatsioonid enamasti 10% piiridesse, kuid mõnel juhul ulatusid need ka kuni 20%-ni ([tabel 43](#)).

• Kvaasistaatile koormamine

Keskmiselt olid enimkoormatud peakandjate läbipainded liikuva koormuse korral 18% väiksemad kui arvutusmudel eeldas ning 11% väiksemad võrreldes seisva koormusega ([tabel 45](#)). Lihttalasildade teki siirdekäitumine oli väga sarnane lihttala lineaarse teoreetilise siirdekäitumisega. Mõõdetud siirdekõverate üldkujud langesid hästi kokku teoreetilistega ([joonised 94...111](#)) ning maksimaalsed siirded mõõdeti selliste veokite asukohtade korral, nagu seda eeldasid teoreetilised valemid.

2) Katsetatud sildade kontrollarvutused

• Kontroll kandepiiriseisundis

Kui kaks 52 t veokit (tüüp 5) paigutada sillatekile kõrvuti, siis põikjõukandevõimega sildadel praktiliselt probleeme ei ole. Kuid paindekandevõime osas ei ole kuuel sillal nõuded tagatud, kusjuures puudujääk on vahemikus 5...15% ([tabel 47](#)). Tervikuna võib väita, et kaasaegsete arvutusmeetodite alusel arvutatud kandevõime on üldjuhul tagatud. Esineb küll nõudeid, mis ei ole täidetud, kuid puudujääk ei ole suur ning arvesse tuleks võtta analüüsis kajastatud pehmemdavaid asjaolusid.

- [Kontroll kasutuspiirseisundis](#)

Kahe kõrvuti paikneva 52 t veoki korral esineb ainsana kasutuspiirseisundis tõsisemaid probleeme konsoolidega talasildade puhul, kus tugede piirkonnas esineb mõnede nõuete täitmise osas kuni kahekordne puudujääk ([tabel 50](#)). Antud asjaolu ei vähenda arvestatavalt silla kandevõimet, kuid reeglina lühendab eluiga ja suurendab investeringuvajadusi sillavõrku.

- [Sildade kontroll paindemomentide võrdlemise teel](#)

Kui võtta aluseks 52 t veokite kasutamine, siis vaadeldud tüüpsildadel üldjuhul piiranguid ei ole ([tabel 57](#)), kuigi esineb väikesi kõrvalekaldeid tüüpvalikute kõige pikemate sildepikkuste korral. Katsetatud sildadest esineb ainsana tõsiseltvõetavaid probleeme koormusele HF-60 projekteeritud konsoolsildadega. Nendel sildadel võivad veokid liikuda ainult ühes kolonnis, sest vastasel korral ületavad peatalade arvutuslikud paindemomendid toel lubatavaid väärtuseid.

3) [Üleminekutegurid algsete projektkoormuste ja 52 t veoki vahel](#)

Töötati välja praktikas lihtsalt rakendatav ligikaudne meetod, mis võrdleb omavahel erinevatest liikluskoormustest tekkivaid sisejõudusid (paindemomendid). See võimaldab tüüp 5-ga sarnase konfiguratsiooniga veokite korral hinnata nende maksimaalset lubatavat täismassi. Kõige probleemsemad on siinkohal need sillad, mille puhul on projektkoormusena kasutatud jõuvankrit HF-30, sest nendele sildadele ei tohiks lubada mitte ühtegi 52 t kaaluvat veokit.

4) [Sildade seisukord](#)

Kokku tuvastati riigiteedel 139 silda, millel on vähemalt üks kandevõimega seotud element viimase ülevaatuse käigus hinnatud madalaima seisunditasemega 4 (ehk elemendi kandevõime on suuremal või vähemal määral hindaja arvates vähenenud). Nendest 16 silla ([tabel 62](#)) kahjustused vähendavad arvestatavalt nende kandevõimet ning nendel sildadel tuleb piirata 52 tonniste veokite kasutamist.

5) [Töökindluse ja purunemistõenäosuse analüüs](#)

Kui vaadelda purunemistõenäosust 1 aasta jooksul ([tabel 64](#)), siis katsetatud sildadest on ainult Poaka sillal purunemistõenäosus napilt piirväärtusest suurem ja teistel sildadel on töökindlusega kõik korras. [Tabelist 65](#) on näha, et enamuse sildasid (8 tk 14-st) ei vastaks 15 aasta pärast enam purunemistõenäosuse sihtväärtustele. Kokkuvõttes võib väita, et lühema perioodi jooksul ei ole sildade purunemistõenäosus suur, kuid pikema perioodi jooksul tuleb vajaliku purunemiskindluse tagamiseks sildu remontima hakata.

6) [Riskigruppi kuuluvad sillad](#)

Võttes arvesse eespool kirjeldatud kriteeriume, valiti välja sillad, mille puhul tuleb kas täielikult või osaliselt piirata 52 t veokite kasutamine. Kokku on probleemseid sildu 52 ([tabel 67](#) ja [joonis 134](#)), mis moodustab riigiteede sildadest umbes 5%. Nendest 11 (1%) on sellised, kus tuleb täielikult välistada 52 tonniste veokite kasutamine, kuid ülejäänutel on võimalik lubada 52 t veokid sillale ühes kolonnis. Probleemsetest sildadest 9 paiknevad põhimaanteedel.

7) [Investeeringute vajadus](#)

Kui võtta eesmärgiks 52 tonniste veokite lubamine kõikidele riigiteedel asuvatele sildadele, siis see läheb 2020. aasta seisuga maksma orienteeruvalt 43,6 milj eurot (2025. ja 2030. aastal vastavalt 53,4 ja 65,5 milj eurot), vt [tabel 68](#).

Eraldi tasub mainida ka seda, et sildadel mängib märkimisväärset rolli veoki pikkus ja mitte alati ei saa veoki kogumass määravaks. Näiteks vaadeldi uuringus teiste veokite hulgas ka 60 t täismassiga veokeid, millel on seitse telge (3-teljeline veduk koos 4-teljelise täishaagisega) ja esimese ning viimase telje vahekaugus 15,83 m (tüüp 2). Selgus, et kuni sildepikkusteni 9 m tekitab 52 t veok tüüp 5 isegi kuni veerandi võrra suuremaid peatalade paindemomente, kui 60 t tüüp 2 ning raskem veok hakkas suuremaid paindemomente tekitama alles sildepikkustel üle 21 m. Ka teine näide iseloomustab hästi veoki pikkuse tähtsust – kui tüüp 5 veoki esimese ja viimase telje vahekaugust suurendada 1,35 m võrra 12,65 meetrini (tüüp 3), siis vähenevad paindemomendid peatalades kuni 15%, kuigi veoki täismass on sama. Täiendava telje lisamine ilma veoki pikkuse suurendamiseta ei vähenda suurematel sildepikkustel arvestatavalt koormustulemite mõju sillakonstruktsioonidele.

Sildade projekteerimisel kasutatakse mitmeid varutegureid, mis võtavad muuhulgas arvesse ka osalisi kõrvalekaldeid normväärtustest. Enamasti jäävad need varutegurid vahemikku 1,1...1,5, kuid paraku on korduvalt fikseeritud ka ülekoormatud raskeveokeid, mille tegelik mass ületab 80 tonni (nt [foto 72](#)). Eriti ebasoodne olukord võib tekkida siis, kui tee ebatasasuste tõttu lisandub tegelikule massile ka dünaamilistest löökidest tulenev lisategur. On küll suhteliselt väike tõenäosus, et kaks ülekoormatud veokit satuvad ühte sildeavasse kõrvuti. Kuid kui selline olukord peaks reaalselt tekkima, siis võib väga suure tõenäosusega riskigrupis olev sild ka variseda. Seega peaks kehtestatavad massipiirangud olema mõistlikult konservatiivsed, sest ei ole võimalik täielikult tagada massipiirangutest kinnipidamist. Illustreerimise eesmärgil on [fotol 73](#) näidatud Türi-Alliku silla katsetamisel kasutatud 55 tonnise tegeliku massiga veok, mille poolhaagis oli katsetamisel pooltühi ja võimaldanuks veokile laadida ka tunduvalt suurema koorma.



Foto 72. 2018. a Sanga viaduktil iBWIM mõõtmiste käigus fikseeritud veok tegeliku massiga 82,8 t (sisaldab ka dünaamikategurit)



Foto 73. 55 t tegeliku massiga veok Türi-Alliku silla katsetamisel, mille poolhaagis oli pooltühi

Seetõttu tuleb kindlasti arvestada asjaoluga, et uuringu tulemused on rakendatavad ainult siis, kui teedel ei liikle arvestatavalt ülekaalulisi veokeid.

Analüüsitulemuste põhjal võib väita, et põhimõtteliselt on võimalik peaaegu kõikidele riigiteedel paiknevatele sildadele lubada 52-tonniseid veokeid, kuid 52 sillal tuleb rakendada kas osalist või täielikku piirangut antud veokite suhtes. Lisaks remondile või ümberehitusele võiks kaaluda ka leevendavate meetmete rakendamist koormustulemite vähendamiseks (piirkiiruse alandamine ja tee ebatasasuste likvideerimine dünaamilise efekti vähendamiseks; väikese liiklussagedusega kõrvalistel sildadel võiks meetmena kaaluda ka liikumisgabariidi vähendamist selliselt, et 2 raskeveokit korraga kõrvuti ei mahu jne).

SUMMARY

The aim of this research is to conduct load tests with trucks on the most common Soviet-time bridges and with that, check and validate the corresponding calculation models. The research included bridges on national roads (approx. 1000 bridges), but the results can also be used on the bridges of local roads, because the entity of bridges over Estonia is the same.

The final report includes:

- overview of previous similar researches ([Chapter 1](#));
- overview of traffic loads used in the design of bridges on national roads in Estonia ([Chapter 2](#));
- the results of load tests on 14 bridges ([Chapter 3](#));
- analysis on which is the effect of 52-ton vehicles on Estonian bridges ([Chapter 4](#)).

In this research, the focus is on 52-ton and 6-axcel forest and mining trucks, that consist of a 3-axcel cab and a 3-axcel semi-trailer (in this research defined as type 5, see [Figure 135](#) and [Photo 71](#)). The reason for this type of truck is that it is shorter than other similar trucks and thus its' effect on structural elements is usually bigger.

Based on the results of the load-tests, the calculations and the analysis (including the condition, reliability etc.), criteria was chosen, that will determine possible mass restrictions:

- The most problematic (bearing in mind 52-ton trucks) are those bridges, where vehicle type HF-30 was used in the design. On those bridges, no 52-ton trucks should be allowed.
- The second problematic group of bridges are those with overhanging beams (cantilever ends) that have been designed to vehicle type HF-60. Trucks can cross these bridges in one convoy and they cannot be on the bridge side by side.
- The third group of bridges are those, which exceed the so-called critical length (for typical structures and depending on the design loads and type of bridge, it is generally between 15 and 24 m). One convoy of trucks will generally not cause a problem, but they cannot be on the bridge side by side.
- Also, the bridges, where bad condition has reduced the carrying capacity, were singled out. Similarly, for these bridges, one convoy of trucks is not a problem, but having 52-ton truck convoys side-by-side on these bridges should be avoided.

Taking into consideration the before mentioned criteria, the bridges that must either have a complete or partial ban for 52-ton trucks, were singled out. In a total, there are 52 problematic bridges ([Table 67](#) and [Figure 134](#)) and they make up 5% of the total amount of bridges on national roads. 11 of them (1%) are such, where 52-ton trucks must be completely banned, but on the others, one convoy of trucks may be allowed at a time. Out of the problematic bridges, 9 are situated on main roads.

If the objective would be to allow 52-ton vehicles on all bridges on national roads, then in 2020 it would cost approximately 43,6 million euros (in 2025 and 2030 accordingly 53,4 and 65,5 million euros).

KASUTATUD KIRJANDUS

[1]	Council Directive 96/53/EC of 25 July 1996 laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic (1996).
[2]	Directive (EU) 2015/719 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorised dimensions in national and international traffic and the maximum authorised weights in international traffic (2015).
[3]	Effects of adapting the rules on weights and dimensions of heavy commercial vehicles as established within Directive 96/53/EC (European Commission, 2008).
[4]	Report on 60-t vehicles (Conference of European Directors of Roads, 2007).
[5]	Conditions for efficient road transport in Europe (Conference of European Directors of Roads, 2017).
[6]	Ülekaaluliste (52 t) veoste võimalike marsruutide kaardistamine riigimaanteedel (Maanteeamet, 2010).
[7]	Puidutranspordi makromajanduslik uuring (Tallinna Tehnikakõrgkool, 2010).
[8]	Töötlemata ümarpuidu veoks eriveosena vajaliku muldkehade läbikülumise ilmastikutingimuste ja erinevate teede kandevõime seose uuring (AS Teede Tehnokeskus, 2011).
[9]	Riigimaanteed ja sildade tugevdamise maksumuse hindamine tulenevalt 52 t veoste aastaringse liikumise võimalusest (Ramboll Eesti AS, 2011).
[10]	Tallinn-Narva mnt asuva Loobu silla katsekoormamine (Tallinna Tehnikaülikool, 2013).
[11]	Vana Särevere silla koormuskatsetused ja teaduslikud analüüsid ning hüdroisoleerivate betoonide ja betoon-pinna hüdrofoobsete pinnakaitsevahendite teaduslik uuring. Lõpparuanne. Osa 1 (Tallinna Tehnikaülikool, 2015).
[12]	Nõukoguaegsete tüüpsildade kandevõime viimine vastavusse euronõuetega ja võimalike tugevdamise meetodite analüüs (Tallinna Tehnikaülikool, 2016).
[13]	Eestis toimunud BMS-uuringute analüüs. Tulemuste kasutamine sildade halduse planeerimisel (A. Papp, 2012).
[14]	Eestis ehitatud nõukoguaegsete raudbetoonaladest tüüpsildade laiendamise ja kandevõime analüüs (T. Liigmann, 2015).
[15]	Nõukoguaegsete tüüpsildade kandevõime viimine vastavusse euronõuetega ja võimalike tugevdamise ning laiendamise meetodite analüüs (E. Reinsalu, 2017).
[16]	Levinuimad nõukoguaegsed sillatüübid Eestis ja nende sobivus tänapäevastele koormusmodelitele (M. Juul, 2018).
[17]	Simple Classification Method for the Bridge Capacity Rating (A. Paeglitis, 2010).
[18]	Ekspluatācijā esošu tiltu nestspējas novērtēšana slodzes modelis LM3 (Latvijas Valsts Celi, 2017).
[19]	Maksimalūs leidžiami transporto priemonių matmenys, leidžiamos ašies (ašių) apkrovos, leidžiamos bendrosios masės (Lietuvos Respublikos Susisiekimo Ministro, 2002).
[20]	Dėl Didžiausiųjų leidžiamų naudojamų keliais transporto priemonių ar jų junginių techninių parametrų patvirtinimo (Lietuvos Respublikos Susisiekimo Ministro, 2017).
[21]	A Guide to Oversize and Heavy Transport through Klaipeda Port. Final report (Klaipeda University, 2011).
[22]	Гармонизация расчетных моделей автомобильных нагрузок России и Евросоюза на мосты массового применения (Н. Илюшин, 2011).
[23]	Sildade normatiivsed koormused 1930-1997 (J. Linno, 1997).
[24]	Start teekonnal tänapäevaste projekteerimismidendi (R. Oras, Ehitaja 2012 veebruar).
[25]	Kasuta eurokoodekseid õigesti (M. Kiisa, Ehitaja 2015 juuni).
[26]	Eesti Vabariigi maanteeeadus (avaldamismärge: RT 1992, 1, 1).
[27]	Teeseadus (vastu võetud 17.02.1999, avaldamismärge: RT I 1999, 26, 377).
[28]	Ehituseadustik (vastu võetud 11.02.2015; avaldamismärge: RT I, 05.03.2015, 1).
[29]	Normatiivdokumentide rakendamine ehitiste projekteerimisel (Ehitusministeeriumi 11.11.1991 määrus nr 1).
[30]	Tee projekteerimise normid ja nõuded (teede- ja sideministri 28.09.1999 määrus nr 55; avaldamismärge: RTL 2000, 23, 303).
[31]	Tee projekteerimise normid (majandus- ja taristuministri 05.08.2015 määrus nr 106; avaldamismärge: RT I, 07.08.2015, 14).
[32]	Ehitise auditi tegemise kord (majandus- ja taristuministri 24.09.2015 määrus nr 116; avaldamismärge: RT I, 25.09.2015, 9).
[33]	Riigimaanteedel asuvate sildade, viaduktide, truupide ja tunnelite projekteerimismõuete täpsustamine (Maanteeameti peadirektori 29.02.2008 käskkiri nr 55).
[34]	Riigiteedel asuvate sildade, viaduktide, truupide, tunnelite ja ökoduktide konstruktsioonidele mõjuvate liikluskoormuste täpsustamise juhised (Maanteeameti peadirektori 18.01.2018 käskkiri nr 1-2/18/018).
[35]	EVS-EN 206:2014+A1:2016 Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus (2016).
[36]	EVS-EN 1990:2002+NA:2002 Eurokoodeks: Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused (2002).
[37]	EVS-EN 1990:2002/A1:2006+NA:2009 Eurokoodeks: Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused. Muudatus A1. Lisa A2: Rakendamine sildade puhul (2010).
[38]	EVS-EN 1990:2002/A1:2006/AC:2010 Eurokoodeks: Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused. Muudatus A1. Lisa A2: Rakendamine sildade puhul (2013).
[39]	EVS-EN 1991-1-1:2002+NA:2002 Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktsioonide koormused. Osa 1-1: Üldkoormused. Mahukaalud, omakaalud, hoonete kasuskoormused (2002).
[40]	EVS-EN 1991-1-1:2002/AC:2009 Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktsioonide koormused. Osa 1-1: Üldkoormused. Mahukaalud, omakaalud, hoonete kasuskoormused (2010).
[41]	EVS-EN 1991-2:2004+NA:2007 Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktsioonide koormused. Osa 2: Sildade liikluskoormused (2007).
[42]	EVS-EN 1991-2:2004/AC:2010 Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktsioonide koormused. Osa 2: Sildade liikluskoormused (2011).

[43]	EVS-EN 1992-1-1:2005+A1:2015+NA:2015 Eurokoodeks 2: Betoonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldreeglid ja reeglid hoonetele (2015).
[44]	EVS-EN 1992-2:2005+NA:2008 Eurokoodeks 2: Betoonstruktsioonide projekteerimine. Osa 2: Betoonsillad. Arvutus- ja detailiseerimisreeglid (2008).
[45]	EVS-EN 12504-2:2012 Konstruktsiooni betooni katsetamine. Osa 2: Mittepurustav katsetamine. Põrkearvu määramine (2013).
[46]	EVS-EN 12504-4:2004 Testing concrete – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity (2004).
[47]	EVS-EN 13791:2007 Betooni survetugevuse hindamine konstruktsioonides ja valmistoodetes (2010)s.
[48]	EVS-EN 14630:2006 Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method (2006).
[49]	EVS-EN ISO 16859-1:2015 Metallic materials – Leeb hardness test – Part 1: Test method (2015).
[50]	EVS-ISO 13822:2011 Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused. Olemasolevate konstruktsioonide seisukorra hindamine (2012).
[51]	EPN-ENV 1.3A Projekteerimise alused. Koormused. Osa 3 Sildade liikluskoormused. Üldeeskirjad, maantee- ja jalteesildade liikluskoormused (1998).
[52]	ISO 1920-7:2004 Testing of concrete – Part 7: Non-destructive tests on hardened concrete (2004).
[53]	CEN/TR 17172:2018 Validation testing program on chloride penetration and carbonation standardized test methods (2018).
[54]	RILEM TC 154-EMC Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete (2000).
[55]	ГОСТ 2775-44 Нагрузки временные вертикальные для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах (1944).
[56]	ГОСТ 5781-61 Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций (1961).
[57]	ГОСТ 5781-75 Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций (1978).
[58]	ГОСТ 5781-82 Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций (2005).
[59]	ГОСТ Р 52748-2007 Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения (2008).
[60]	ГОСТ 33390-2015 Дороги автомобильные общего пользования. Мосты. Нагрузки и воздействия (2016).
[61]	Правила и указания по проектированию железобетонных, металлических, бетонных и каменных искусственных сооружений на автомобильных дорогах, Гшосдор МВД СССР (1948).
[62]	Н 106-53 Нормы подвижных вертикальных нагрузок для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах (1953).
[63]	НитУ 128-55 Нормы и технические условия проектирования автомобильных дорог (1955).
[64]	СН 200-62 Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб (1962).
[65]	СНиП II-Д.8-54 Мосты и трубы (1954).
[66]	СНиП II-Д.7-62 Мосты и трубы (1963).
[67]	СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы (1985).
[68]	СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы (2005).
[69]	СНиП 3.06.07-86 Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний (1987).
[70]	СП 35.13330.2011 Мосты и трубы (2011).
[71]	СП 79.13330.2012 Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний (2012).
[72]	ОДН 218.0.032-2003 Временное руководство по определению грузоподъемности мостовых сооружений на автомобильных дорогах (2003).
[73]	ОДМ 218.4.025-2016 Рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Общая часть (2016).
[74]	ОДМ 218.4.026-2016 Рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Бетонные и железобетонные конструкции (2016).
[75]	ОДМ 218.4.027-2016 Рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Металлические и сталежелезобетонные конструкции (2016).
[76]	ОДМ 218.4.028-2016 Рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Опорные части, опоры и фундаменты (2016).
[77]	ОДМ 218.4.029-2016 Рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Определение грузоподъемности конструкций деревянных мостов (2016).
[78]	Raudbetoonsildade projekteerimise metoodilised juhendid. Autoteede sildade gabariidid ja koormused, raud- ja pingebetoonist talasildade, raamsildade ja kaarsildade arvutamine ja konstrueerimine (Tallinna Polütehniline Instituut, 1970).
[79]	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 56 (1958).
[80]	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 56 – дополнения (1962).
[81]	Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.503-12. Унифицированные сборные пролетные строения из предварительно напряженного железобетона для мостов и путепроводов на автомобильных и городских дорогах. Выпуск 19 (1975).
[82]	Сборник типовых проектов железобетонных и каменных искусственных сооружений. Выпуск 6 (1947).
[83]	Железобетонные сборные плитные мосты пролетами 3,0 и 6,0 м, типовый проект № 5-04-145 (1962).
[84]	Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.503-29. Сборные железобетонные плитные мосты пролетами 6 и 9 м на свайных опорах (1973).
[85]	Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.503-12. Унифицированные сборные пролетные строения из предварительно напряженного железобетона для мостов и путепроводов на автомобильных и городских дорогах. Выпуск 16 (1973).

[86]	Автомобильная дорога Таллин-Пярну-Икла. Участок Канамаа-Ээсмая. Мост через реку Кейлу, правый ход (ГИПРОДОРНИИ Ленинградский филиал, заказ 403, 1980).
[87]	T4 Tallinn-Pärnu mnt. Jõgisoo-1 ja -2 silla (km. 23,678) rekonstrueerimine. Tööprojekt (VPn Projektbüroo, töö nr 03.01.2000, 2000).
[88]	T-100 Avinurme – Tudulinna (km 5,170) Maetsma silla projekt (1959).
[89]	Riiklik Teeregister.
[90]	Teede Tehnokeskus AS sildade register.
[91]	Maainfo kaardirakendus.
[92]	Google Maps kaardirakendus.
[93]	EVS-EN 206:2014+A1:2016/AC:2019 Betooni. Spetsifitseerimine, tootmine ja vastavus (2019).
[94]	CEN/TR 17172:2018 Validation testing program on chloride penetration and carbonation standardized test methods (2018).
[95]	CEN/TR 17310:2019 Carbonation and CO ₂ uptake in concrete (2019).
[96]	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 31 (1955).
[97]	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 167 (1962).
[98]	Автомобильная дорога Таллин-Пярну-Икла. Участок Канамаа-Ээсмая. Мост через реку Кейлу, левый ход (ГИПРОДОРНИИ Ленинградский филиал, заказ 403, 1980).
[99]	Sõidukite masside ja teljekoormuste seire (AS Viacon Eesti, Tallinna Tehnikakõrgkool, Skepast&Puhkim OÜ, 2018).
[100]	Sildade toimivuse hindamine ja arenguvõimalused Eestis (M. Matteus, 2019).
[101]	Saaremaa püsiühenduse finants- ja sotsiaalmajandusliku mõjuhinnangu ajakohastamine (AS PricewaterhouseCoopers Advisors, 2018).
[102]	Riigiteedel olevate sildade remondiobjektide valiku metoodiline juhend (Maanteeamet, 2017).
[103]	Probabilistic Model Code (JCSS, 2001).
[104]	NEN 8700 – Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwster bij verbouw en afkeuren (Normcommissie 351001, 2011).
[105]	Structural Engineering Documents (SED) 5. Introduction to Safety and Reliability of Structures (J. Schneider, 1997).
[106]	ISO 2394:2015 General principles on reliability for structures (2015).
[107]	Procedures for reliability assessment of existing bridges (Z. Šavor, M. Šavor Novak, 2015).
[108]	Reliability and life-cycle analysis of deteriorating systems (M. Sánchez-Silva, G.-A. Klutke, 2016).
[109]	Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken (E. Basler, 1961).
[110]	Probability-based structural code (C.A. Cornell, 1969).
[111]	The new approximate calculation method for the first order reliability (A. M. Hasofer, N. C. Lind, 1974).
[112]	Maanteeameti kaardirakendus.
[113]	The dynamic amplification factor of the bridges in Latvia (I. Paeglite, A. Paeglitis, 2013).
[114]	Dynamic amplification factor for bridges with span length from 10 to 35 meters (I. Paeglite, A. Paeglitis, J. Smirnovs 2013).
[115]	Evaluation of the increased dynamic effects on the highway bridge superstructure (I. Paeglite, J. Smirnovs, A. Paeglitis, 2018).
[116]	Dynamic fracture criteria evaluation of bridge structural steel (A. Žiliukas, M. Gintalas, 2011).
[117]	Load testing and model updating of a single span composite steel-concrete railway bridge (D. Bacinskasa, Z. Kamaitis, D. Jatulis, A. Kilikevicius, 2013).
[118]	An analysis of footbridge vibration parameters (J. Skeivalas, M. Jurevicius, A. Kilikevicius, V. Turla, 2015).
[119]	Field testing and dynamic analysis of old continuous truss steel bridge (A. Kilikevicius, D. Bačinskas, M. Jurevičius, K. Kilikeviciene, A. Fursenko, J. Jakaitis, E. Toločka, 2018).
[120]	The Narva Bridge inspection and assessment of the bridge carrying capacity (Kaunas Transport and Road Research Institute, 2005).
[121]	ENV 1991-3:1995 Eurocode 1: Basis of design and actions on structures - Part 3: Traffic loads on bridges (1995).
[122]	EN 1991-2:2003 Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges (2003).
[123]	НСП ЕН 1991-2-2011 ЕВРОКОД 1: Воздействия на сооружения – Часть 2: Транспортные нагрузки на мосты (2011).
[124]	Пояснительная записка к Национальному Стандарту Российской Федерации НСП 1991-2-2011 Еврокод 1: Воздействия на сооружения – Часть 2: «Транспортные нагрузки на мосты» (2011).
[125]	Методика загрузки поверхностей влияния временной подвижной нагрузкой LM1 (Н.В. Илюшин, 2012).
[126]	Мы идем своим путем (О.В. Скворцов, 2015).
[127]	Детализация концепции и методики формирования нормативных и расчётных вертикальных временных нагрузок на автодорожные и городские мостовые сооружения Российской Федерации (П. Саламахин, Р. Мамутов, 2017).
[128]	Оценка несущей способности железобетонных пролетных строений мостов, усиленных композитными материалами (Д. Смердов, 2010).
[129]	Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 2. Натурные исследования усиления железобетонных конструкций композитами, возникающие проблемы и пути их решения (И. Овчинников, Ш. Валиев, И. Овчинников, В. Зиновьев, А. Умиров, 2012).
[130]	Совершенствование методики оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композиционными материалами (А. Неровных, 2013).
[131]	Прогнозирование срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов (Д. Шестовицкий, 2017).
[132]	Satiksmes slodzes modeļi Latvijas autoceļu tiltiem ar laidumu garumiem līdz 30 metriem (A. Paeglitis, 2012).
[133]	Slodzes modeļa LM3 izstrāde (SIA "Projekts 3", 2016).

LISAD

Lisa nr	Pealkiri	Märkused
Lisa 1	Katsetatud sildade kirjeldused	Sisaldub lõpparuandes
Lisa 2	Fotod sildade katsetamisest	Sisaldub lõpparuandes
Lisa 3	Sildade töökindluse ja purunemistõenäosuse analüüs	Sisaldub lõpparuandes
Lisa A-1	Poaka silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa A-2	Poaka silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa A-3	Poaka silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa B-1	Piiometsa silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa B-2	Piiometsa silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa B-3	Piiometsa silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa C-1	Rohe silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa C-2	Rohe silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa C-3	Rohe silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa D-1	Jõgisoo I silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa D-2	Jõgisoo I silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa D-3	Jõgisoo I silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa E-1	Maetsma silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa E-2	Maetsma silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa E-3	Maetsma silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa F-1	Sandra silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa F-2	Sandra silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa F-3	Sandra silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa G-1	Valgejõe silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa G-2	Valgejõe silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa G-3	Valgejõe silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa H-1	Lungu silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa H-2	Lungu silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa H-3	Lungu silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa I-1	Türi-Alliku silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa I-2	Türi-Alliku silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa I-3	Türi-Alliku silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa J-1	Vaida III silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa J-2	Vaida III silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa J-3	Vaida III silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa K-1	Jõgisoo II silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa K-2	Jõgisoo II silla keskmise ava katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa K-3	Jõgisoo II silla keskmise ava katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa L-1	Piibe silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa L-2	Piibe silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa L-3	Piibe silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa M-1	Jõgisoo II silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa M-2	Jõgisoo II silla äärmise ava katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa M-3	Jõgisoo II silla äärmise ava katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument
Lisa N-1	Vodja silla tehnilise seisukorra hinnang	Eraldi dokument
Lisa N-2	Vodja silla katsetamise programm	Eraldi dokument
Lisa N-3	Vodja silla katsekoormamise arvutuste aruanne	Eraldi dokument

LISA 1. KATSETATUD SILDADE KIRJELDUSED

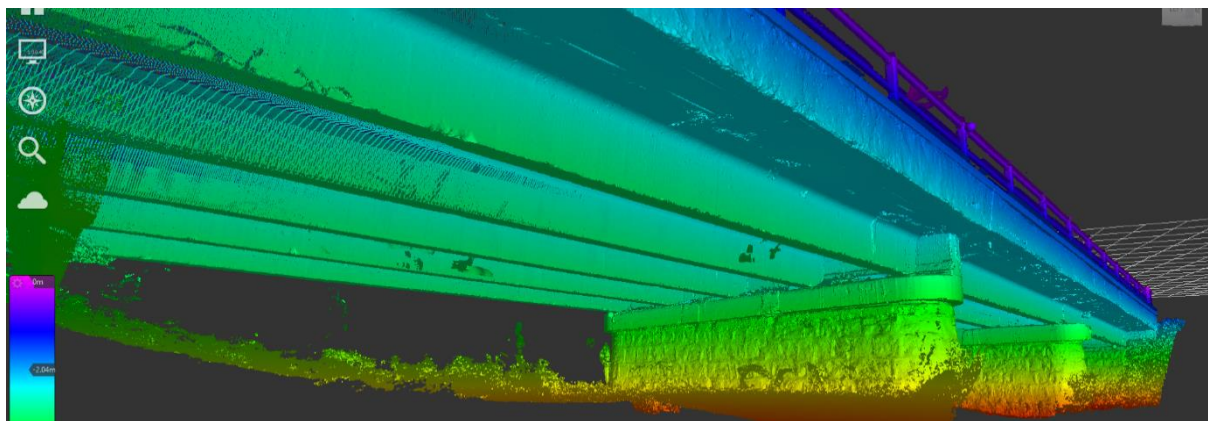
1) Poaka sild

Tabel 1. Poaka silla üldandmed [\[89\]](#), [\[90\]](#)

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Poaka
Silla nr:	252
Ehitusaasta:	1965
Renoveerimise aasta:	2000
SI (hindamise aasta):	54% (2016. a)
AKÖL:	364 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-13/HГ-60
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav lihttala, raudbetoon
Avade arv:	3
Sõidutee gabariit:	7,0 m
Silla kogulaius:	8,9 m
Silla kogupikkus:	40,0 m
Tüüpprojekt:	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 56 – дополнения (1962) [80]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: - servatalad erinevad tüüpkataloogis toodust; - remondi käigus on muudetud katendi paksust.

Tabel 2. Poaka silla asukoht [\[89\]](#), [\[91\]](#), [\[92\]](#)

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	15208 Kirna - Poaka
Silla kaugus teel:	0,313 km
Ületatav takistus:	Pärnu jõgi
Maakond:	Järva maakond
Maanteeameti regioon:	Ida
Silla koordinaadid:	X:6523872.2 Y:585614.1
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Poaka silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punkt pilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Poaka sild)



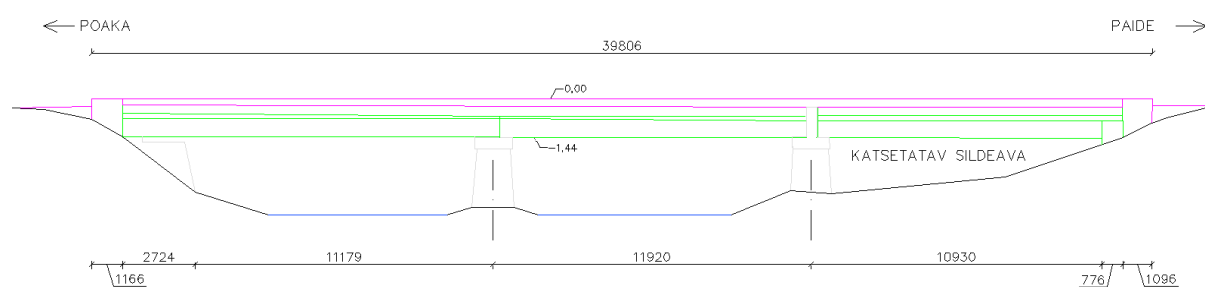
Foto 2. Vaade küljelt (Poaka sild)



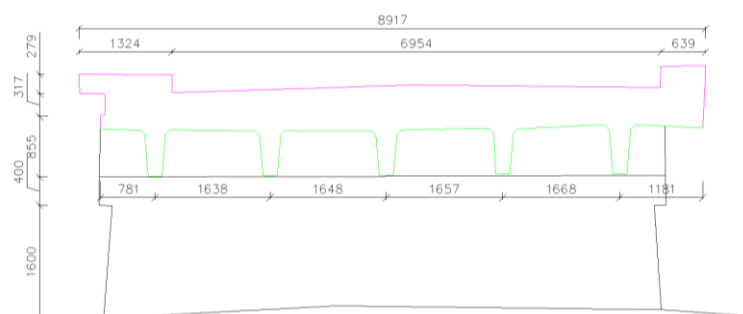
Foto 3. Vaade alt (Poaka sild)



Foto 4. Vaade pealt (Poaka sild)



Joonis 2. Poaka silla külgvaade



Joonis 3. Poaka silla ristlõige

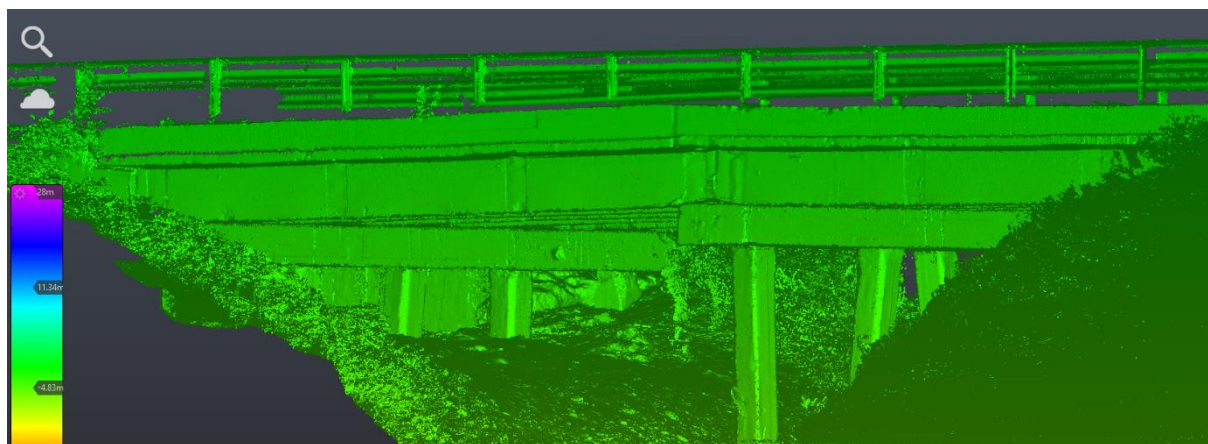
2) Piiometsa sild

Tabel 1. Piiometsa silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Piiometsa
Silla nr:	235
Ehitusaasta:	1963
Renoveerimise aasta:	1998
SI (hindamise aasta):	68% (2015. a)
AKÖL:	216 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-13/HГ-60
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav lihttala, raudbetoon
Avade arv:	2
Sõidutee gabariit:	7,7 m
Silla kogulaius:	8,4 m
Silla kogupikkus:	17,4 m
Tüüpprojekt:	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 56 (1958) [79]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: • kõnniteeblokid puuduvad; • remondi käigus on muudetud katendi paksust ja lisandunud on servaprussid.

Tabel 2. Piiometsa silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	15129 Paide - Roovere - Kuimetsa
Silla kaugus teel:	10,592 km
Ületatav takistus:	Lintsi jõgi
Maakond:	Järva maakond
Maanteeameti regioon:	Ida
Silla koordinaadid:	X:6528126 Y:578898.2
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Piiometsa silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punkt pilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Piimetsa sild)



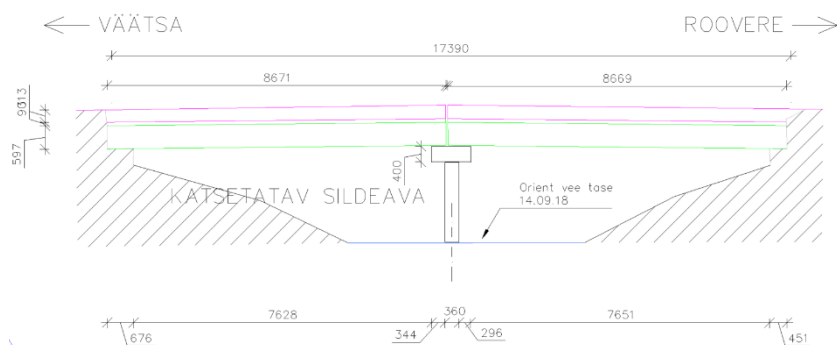
Foto 2. Vaade küljelt (Piimetsa sild)



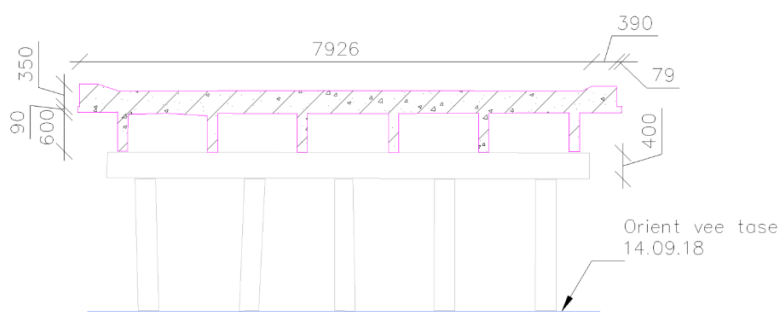
Foto 3. Vaade alt (Piimetsa sild)



Foto 4. Vaade pealt (Piimetsa sild)



Joonis 2. Piimetsa silla külgvaade



Joonis 3. Piimetsa silla ristlõige

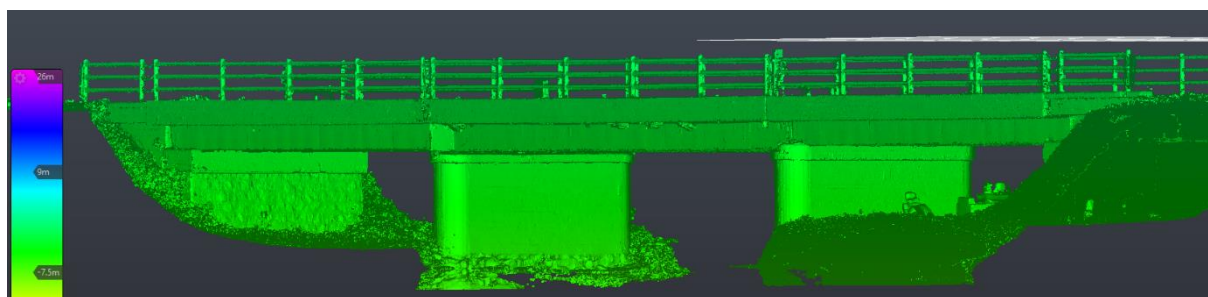
3) Rohe sild

Tabel 1. Rohe silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Rohe
Silla nr:	503
Ehitusaasta:	1969
Renoveerimise aasta:	-
SI (hindamise aasta):	53% (2016. a)
AKÖL:	169 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-18/HK-80
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav lihttala, raudbetoon
Avade arv:	3
Sõidutee gabariit:	6,0 m
Silla kogulaius:	6,9 m
Silla kogupikkus:	37,0 m
Tüüpprojekt:	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 56 – дополнения (1962) [80]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: • talade ülemise vöö laius on 130 cm asemel tehtud 168 cm; • sillal on kasutatud 4 peatala; • talad on põiksuunas järeldpingestatud (ülemisest vööst); • kõnniteeblokid puuduvad ja on asendatud servaprussidega; • muudetud on katendi paksust.

Tabel 2. Rohe silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	14145 Vaimastvere - Laiuse
Silla kaugus teel:	5,792 km
Ületatav takistus:	Pedja jõgi
Maakond:	Jõgeva maakond
Maanteeameti regioon:	Ida
Silla koordinaadid:	X:6522885.3 Y:637230.4
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Rohe silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punktipilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Rohe sild)



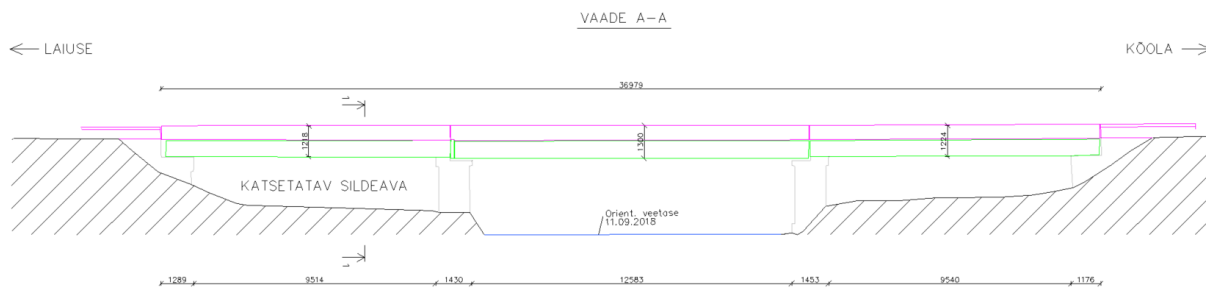
Foto 2. Vaade küljelt (Rohe sild)



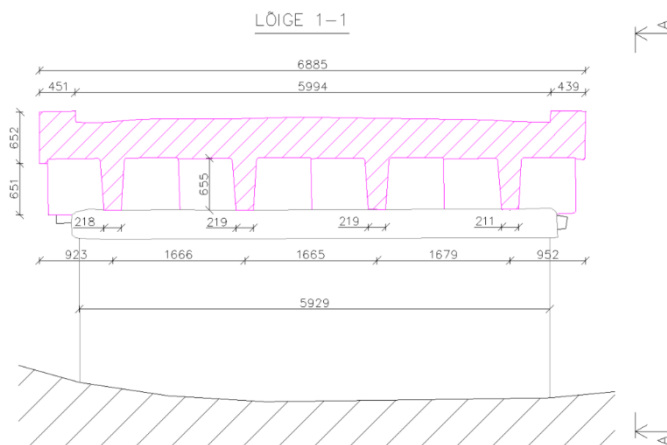
Foto 3. Vaade alt (Rohe sild)



Foto 4. Vaade pealt (Rohe sild)



Joonis 2. Rohe silla külgvaade



Joonis 3. Rohe silla ristlõige

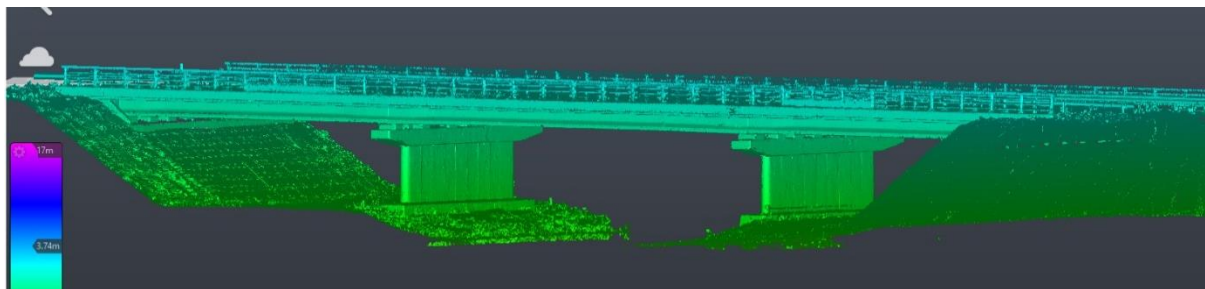
4) Jõgisoo I sild

Tabel 1. Jõgisoo I silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Jõgisoo I
Silla nr:	14
Ehitusaasta:	1983
Renoveerimise aasta:	2000
SI (hindamise aasta):	87% (2015. a)
AKÖL:	15848 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-30/HK-80
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav lihttala, raudbetoon
Avade arv:	3
Sõidutee gabariit:	12,0 m
Silla kogulaius:	14,8 m
Silla kogupikkus:	60,3 m
Tüüpprojekt:	Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.503-12. Унифицированные сборные пролетные строения из предварительно напряженного железобетона для мостов и путепроводов на автомобильных и городских дорогах. Выпуск 19 (1975) [81]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: • antud tüüpprojekti järgi on ehitatud ainult keskmine sildeava; • kõnniteeblokid puuduvad; • remondi käigus on muudetud katendi paksust ja lisandunud on servaprussid; • keskmises avas on loobutud spetsiaalsetest servataladest.

Tabel 2. Jõgisoo I silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	4 Tallinn - Pärnu - Ikla
Silla kaugus teel:	23,699 km
Ületatav takistus:	Keila jõgi
Maakond:	Harju
Maanteeameti regioon:	Põhja
Silla koordinaadid:	X:6570725 Y:529726.8
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Jõgisoo I silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punkt pilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Jõgisoo I sild)



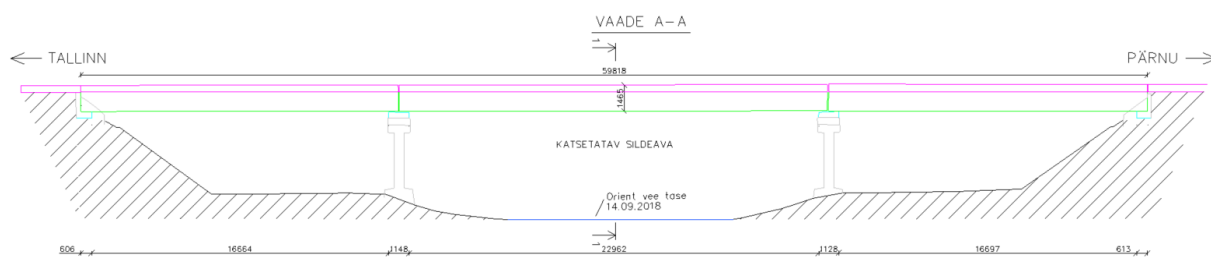
Foto 2. Vaade küljelt (Jõgisoo I sild)



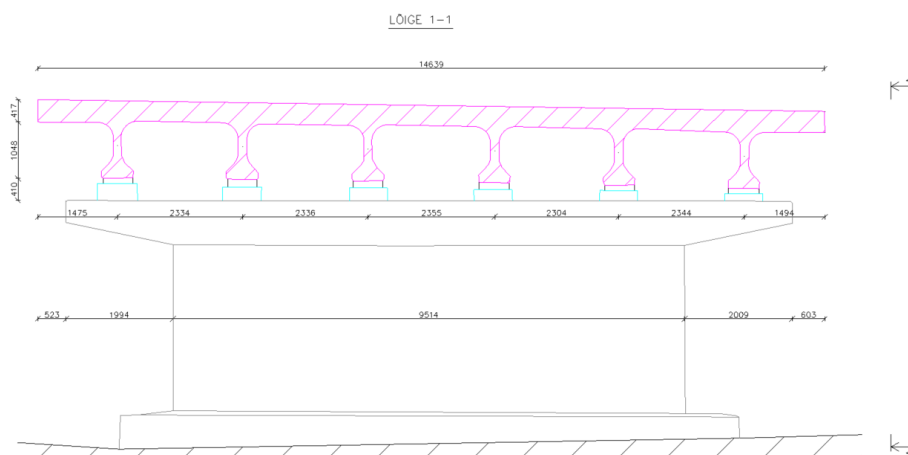
Foto 3. Vaade alt (Jõgisoo I sild)



Foto 4. Vaade pealt (Jõgisoo I sild)



Joonis 2. Jõgisoo I silla külgvaade



Joonis 3. Jõgisoo I silla ristlõige

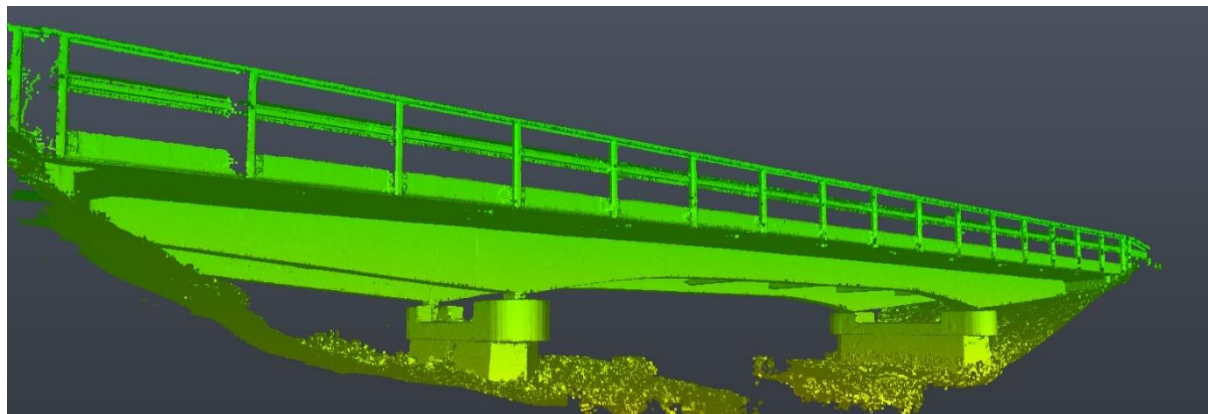
5) Maetsma sild

Tabel 1. Maetsma silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Maetsma
Silla nr:	422
Ehitusaasta:	1959
Renoveerimise aasta:	2001
SI (hindamise aasta):	83% (2015. a)
AKÖL:	721 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-10/HГ-60
Sillateki konstruktsioon:	Konsoolidega tala, raudbetoon
Avade arv:	3
Sõidutee gabariit:	9,0 m
Silla kogulaius:	9,3 m
Silla kogupikkus:	32,2 m
Tüüpprojekt:	Сборник типовых проектов железобетонных и каменных искусственных сооружений. Выпуск 6 (1947) [82]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: - keskmise sildeava pikkus ei ole standardne; - kõnniteeblokid puuduvad; - remondi käigus on muudetud katendi paksust ja lisandunud on servaprussid.

Tabel 2. Maetsma silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	35 lisaku - Tudulinna - Avinurme
Silla kaugus teel:	28,484 km
Ületatav takistus:	Avijõgi
Maakond:	Ida-Viru
Maanteeameti regioon:	Ida
Silla koordinaadid:	X:6543517.3 Y:666557.3
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Maetsma silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punkt pilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Maetsma sild)



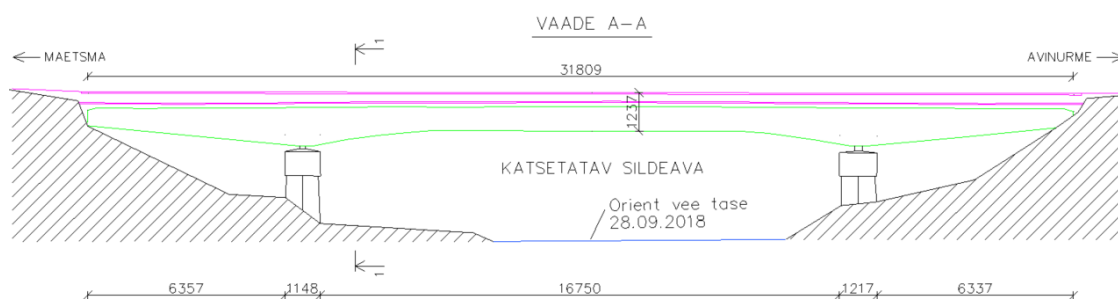
Foto 2. Vaade küljelt (Maetsma sild)



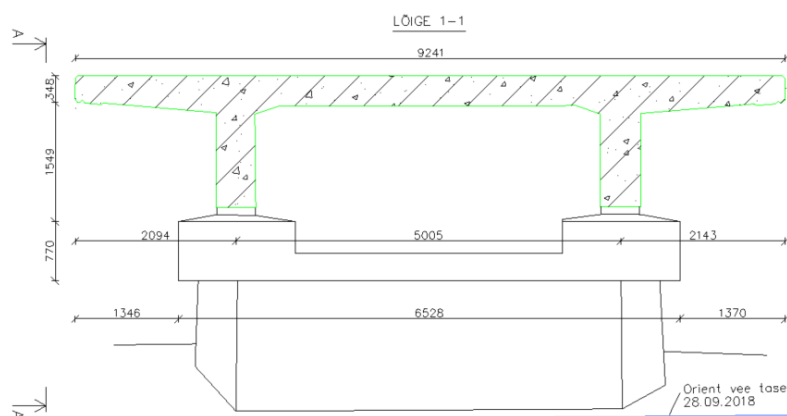
Foto 3. Vaade alt (Maetsma sild)



Foto 4. Vaade pealt (Maetsma sild)



Joonis 2. Maetsma silla külgvaade



Joonis 3. Maetsma silla ristlõige

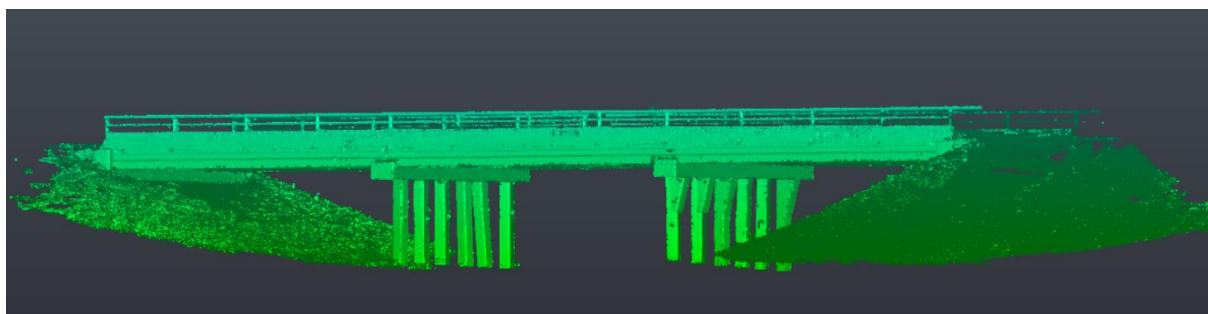
6) Sandra sild

Tabel 1. Sandra silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Sandra
Silla nr:	640
Ehitusaasta:	1983
Renoveerimise aasta:	-
SI (hindamise aasta):	65% (2015. a)
AKÖL:	44 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-30/HK-80
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav õõnespaneel, raudbetoon
Avade arv:	3
Sõidutee gabariit:	7,1 m
Silla kogulaius:	7,6 m
Silla kogupikkus:	36,1 m
Tüüpprojekt:	Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.503-12. Унифицированные сборные пролетные строения из предварительно напряженного железобетона для мостов и путепроводов на автомобильных и городских дорогах. Выпуск 16 (1973) [85]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: • ristlõikes on kasutatud ainult 7 paneeli; • kõnniteeblokid puuduvad ja on asendatud servaprussidega; • muudetud on katendi paksust.

Tabel 2. Sandra silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	24128 Kildu - Oksa - Tõramaa
Silla kaugus teel:	19,533 km
Ületatav takistus:	Raudna jõgi
Maakond:	Viljandi
Maanteeameti regioon:	Lääne
Silla koordinaadid:	X:6478362.5 Y:564724.5
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Sandra silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punkt pilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Sandra sild)



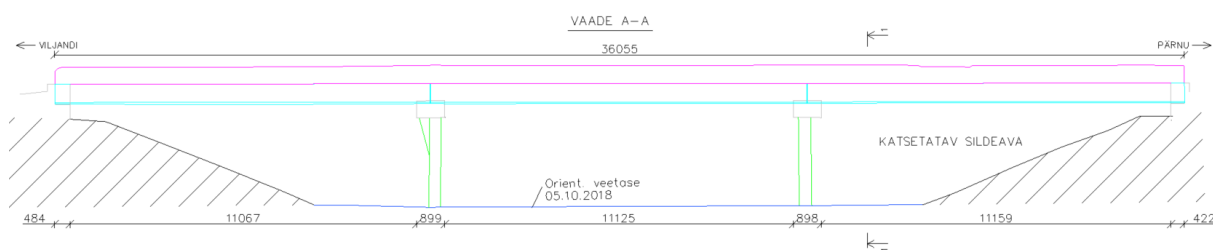
Foto 2. Vaade küljelt (Sandra sild)



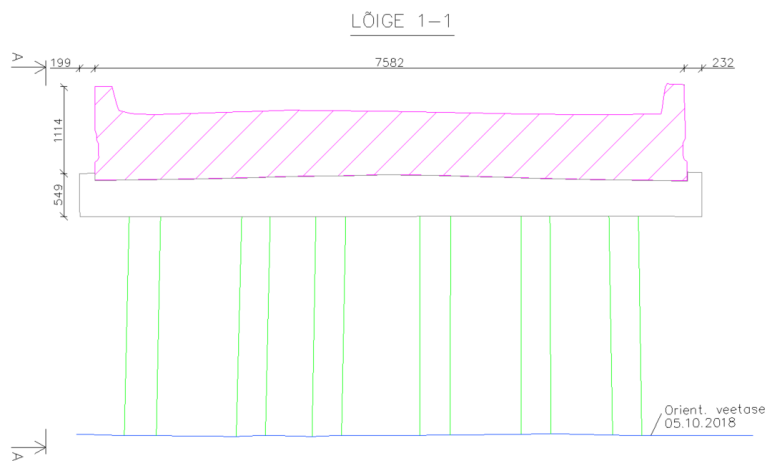
Foto 3. Vaade alt (Sandra sild)



Foto 4. Vaade pealt (Sandra sild)



Joonis 2. Sandra silla külgvaade



Joonis 3. Sandra silla ristlõige

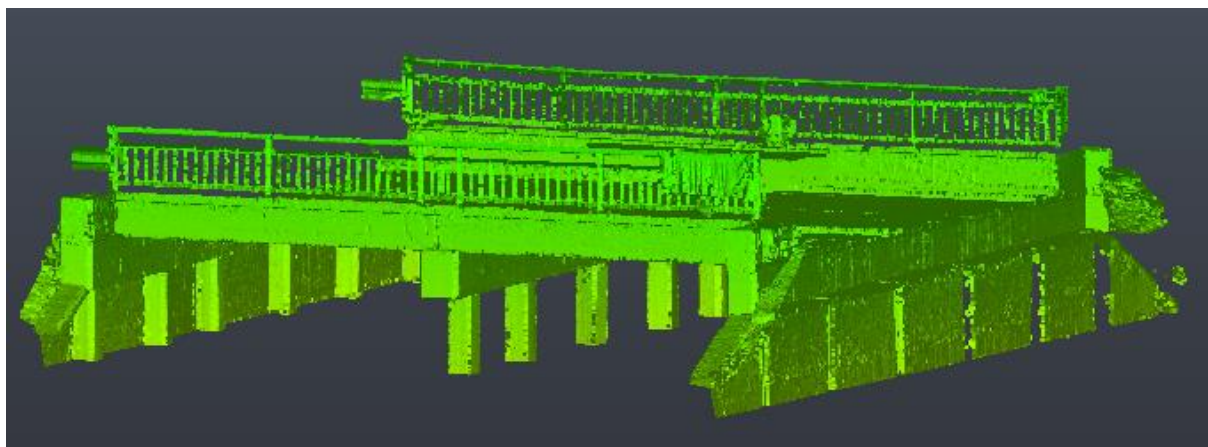
7) Valgejõe sild

Tabel 1. Valgejõe silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Valgejõe
Silla nr:	171
Ehitusaasta:	1964
Renoveerimise aasta:	-
SI (hindamise aasta):	65% (2016. a)
AKÖL:	1265 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-18/HK-80
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav plaatsild, raudbetoon
Avade arv:	2
Sõidutee gabariit:	10,0 m
Silla kogulaius:	10,2 m
Silla kogupikkus:	12,4 m
Tüüpprojekt:	Железобетонные сборные плитные мосты пролетами 3,0 и 6,0 м, типового проекта № 5-04-145 (1962) [83]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: • paneeli alumise pinna armatuur erineb projektijärgsest; • muudetud on katendi paksust.

Tabel 2. Valgejõe silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	24 Tapa - Loobu
Silla kaugus teel:	2,279 km
Ületatav takistus:	Valgejõe jõgi
Maakond:	Lääne-Viru
Maanteeameti regioon:	Ida
Silla koordinaadid:	X:6572066 Y:612254.9
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Valgejõe silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punktipilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Valgejõe sild)



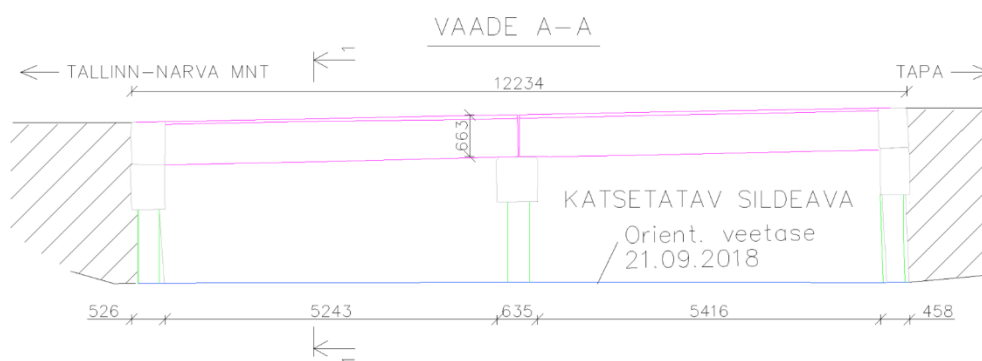
Foto 2. Vaade küljelt (Valgejõe sild)



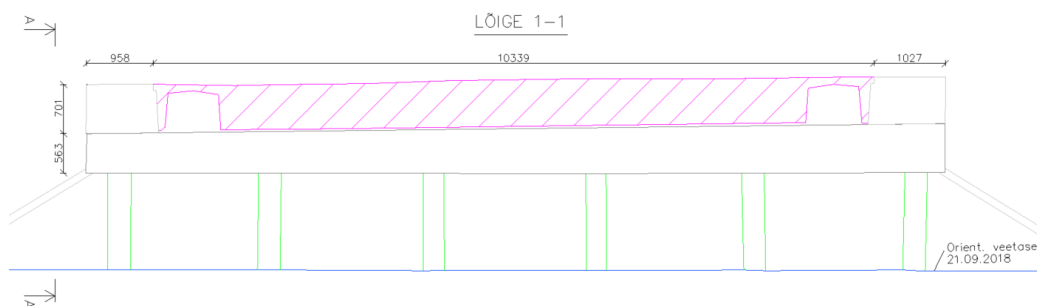
Foto 3. Vaade alt (Valgejõe sild)



Foto 4. Vaade pealt (Valgejõe sild)



Joonis 2. Valgejõe silla külgvaade



Joonis 3. Valgejõe silla ristlõige

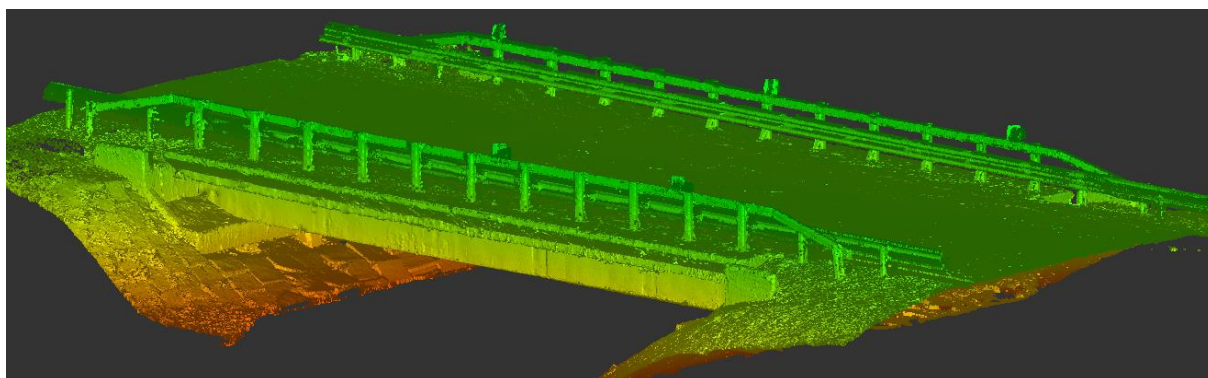
8) Lungu sild

Tabel 1. Lungu silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Lungu
Silla nr:	306
Ehitusaasta:	1969
Renoveerimise aasta:	-
SI (hindamise aasta):	79% (2010. a)
AKÖL:	54 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-30/HK-80
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav tala, raudbetoon
Avade arv:	1
Sõidutee gabariit:	7,0 m
Silla kogulaius:	8,7 m
Silla kogupikkus:	16,5 m
Tüüpprojekt:	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 167 (1962) [97]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: • standardsed kõnniteeblokid puuduvad ja on asendatud betoonist prussidega; • remondi käigus on muudetud katendi paksust.

Tabel 2. Lungu silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	20156 Kärü - Kädva
Silla kaugus teel:	4,328 km
Ületatav takistus:	Kärü jõgi
Maakond:	Rapla
Maanteeameti regioon:	Põhja
Silla koordinaadid:	X:6524643.8 Y:567459.1
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Lungu silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punktipilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Lungu sild)



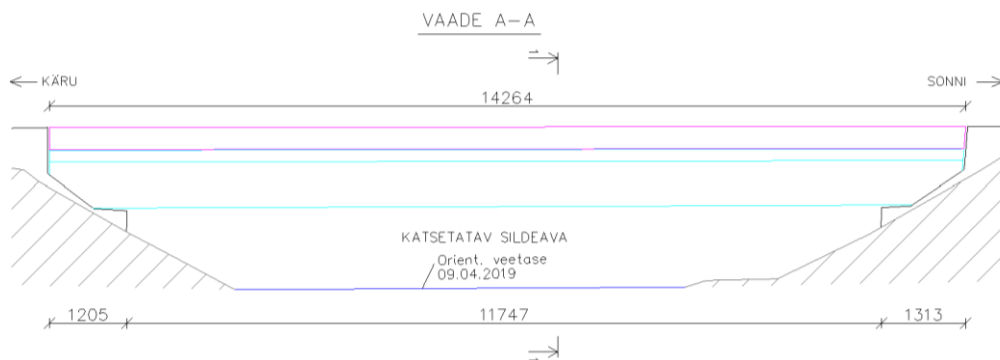
Foto 2. Vaade küljelt (Lungu sild)



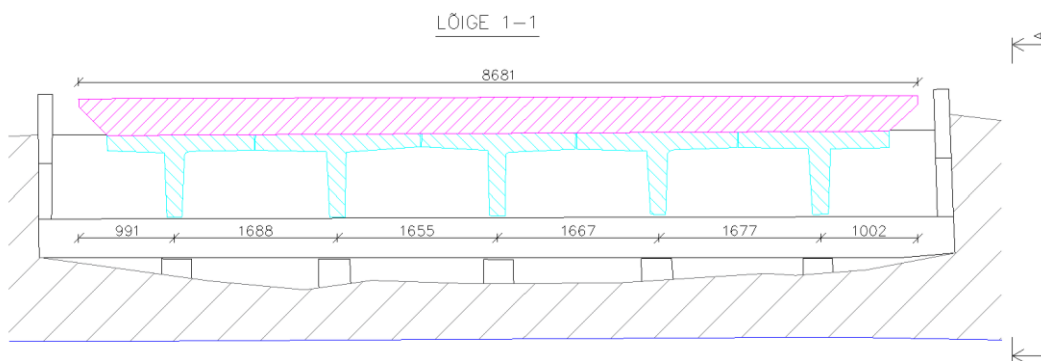
Foto 3. Vaade alt (Lungu sild)



Foto 4. Vaade pealt (Lungu sild)



Joonis 2. Lungu silla külgvaade



Joonis 3. Lungu silla ristlõige

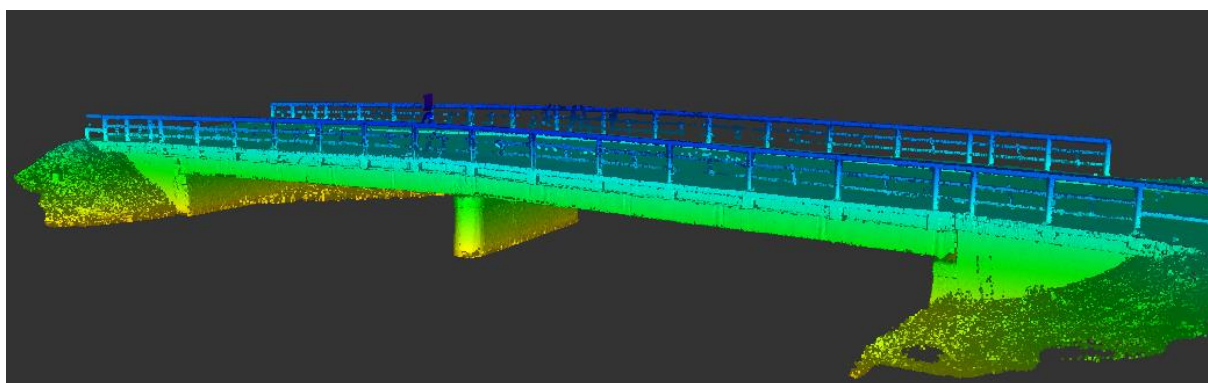
9) Türi-Alliku sild

Tabel 1. Türi-Alliku silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Türi-Alliku
Silla nr:	231
Ehitusaasta:	1963
Renoveerimise aasta:	-
SI (hindamise aasta):	83% (2016. a)
AKÖL:	443 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-13/HГ-60
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav tala, raudbetoon
Avade arv:	2
Sõidutee gabariit:	6,0 m
Silla kogulaius:	8,1 m
Silla kogupikkus:	35,7 m
Tüüpprojekt:	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 56 (1958) [79]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: • remondi käigus on muudetud katendi paksust.

Tabel 2. Türi-Alliku silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	15106 Taikse - Tori - Türi-Alliku
Silla kaugus teel:	6,052 km
Ületatav takistus:	Pärnu jõgi
Maakond:	Järva
Maanteeameti regioon:	Ida
Silla koordinaadid:	X:6521428.8 Y:583812.6
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Türi-Alliku silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punkt pilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Türi-Alliku sild)



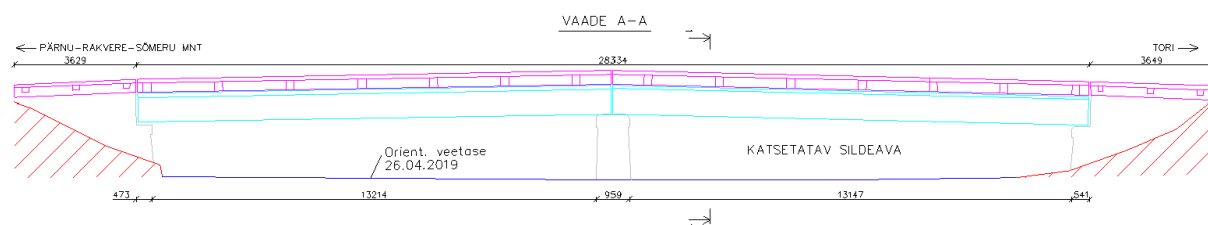
Foto 2. Vaade küljelt (Türi-Alliku sild)



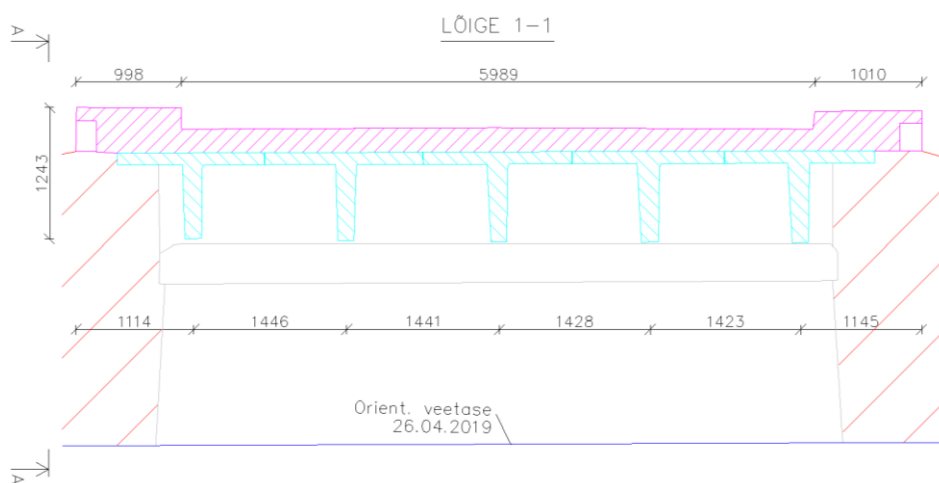
Foto 3. Vaade alt (Türi-Alliku sild)



Foto 4. Vaade pealt (Türi-Alliku sild)



Joonis 2. Türi-Alliku silla külgvaade



Joonis 3. Türi-Alliku silla ristlõige

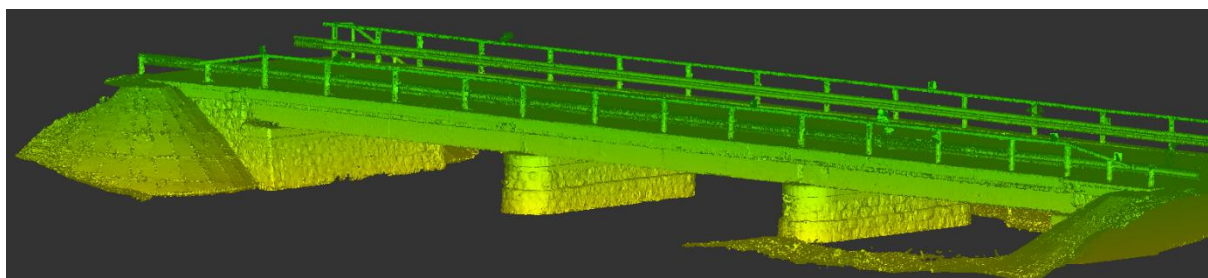
10) Vaida III sild

Tabel 1. Vaida III silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Vaida III
Silla nr:	85
Ehitusaasta:	1958
Renoveerimise aasta:	2000
SI (hindamise aasta):	94% (2016. a)
AKÖL:	302 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-18/HK-80
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav lihttala, raudbetoon
Avade arv:	3
Sõidutee gabariit:	7,2 m
Silla kogulaius:	8,6 m
Silla kogupikkus:	45,3 m
Tüüpprojekt:	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 56 (1958) [79]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: - kuna sild on ehitatud vana silla sammastele, siis on talad tüüpkataloogiga võrreldes mõnevõrra lühemad (katsetatavas sildeavas 2 m lühem); - kõnniteeblokid puuduvad; - remondi käigus on muudetud katendi paksust ja lisandunud on servaprussid.

Tabel 2. Vaida III silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	11114 Jüri - Vaida
Silla kaugus teel:	7,676 km
Ületatav takistus:	Pirita jõgi
Maakond:	Harju
Maanteeameti regioon:	Põhja
Silla koordinaadid:	X:6573992 Y:554131.7
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Vaida III silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punkt pilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Vaida III sild)



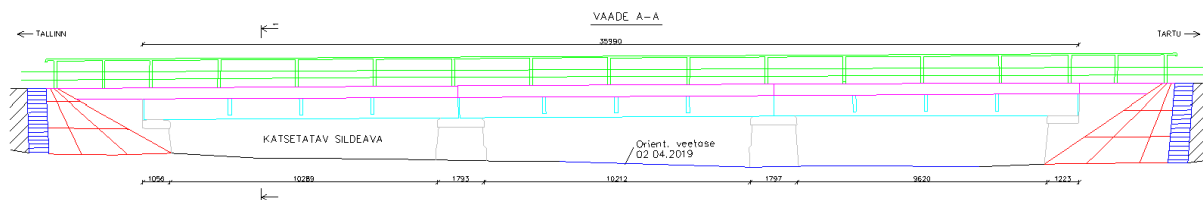
Foto 2. Vaade küljelt (Vaida III sild)



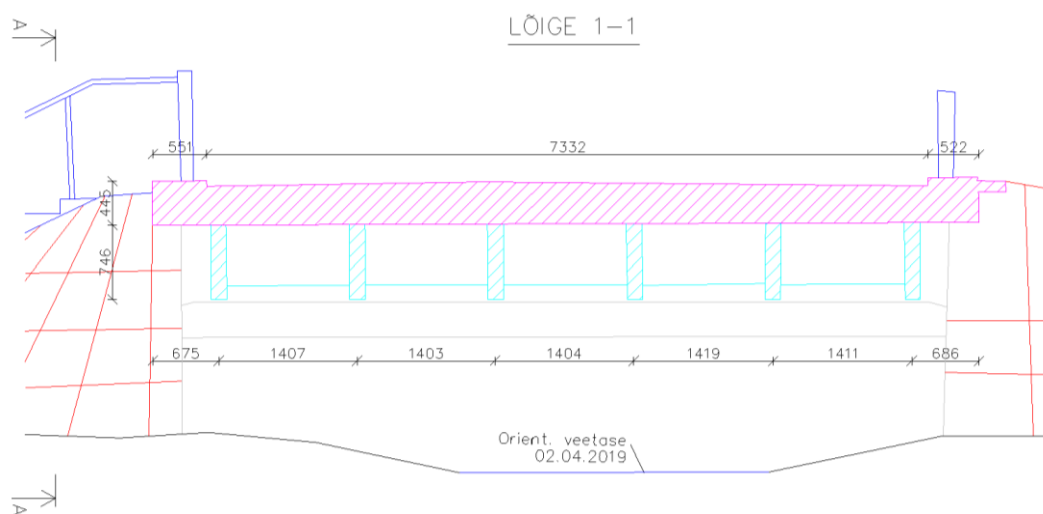
Foto 3. Vaade alt (Vaida III sild)



Foto 4. Vaade pealt (Vaida III sild)



Joonis 2. Vaida III silla külgvaade



Joonis 3. Vaida III silla ristlõige

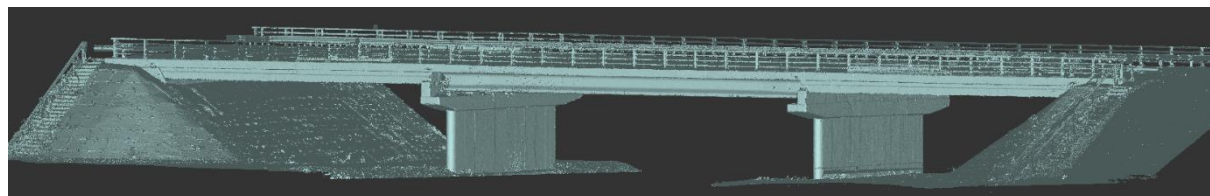
11) Jõgisoo II sild (keskmise ava)

Tabel 1. Jõgisoo II (keskmise ava) silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Jõgisoo II
Silla nr:	19
Ehitusaasta:	1982
Renoveerimise aasta:	2000
SI (hindamise aasta):	86% (2015. a)
AKÖL:	15848 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-30/HK-80
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav lihttala + õõnespaneel, raudbetoon
Avade arv:	3
Sõidutee gabariit:	10,8 m
Silla kogulaius:	14,8 m
Silla kogupikkus:	66,6 m
Tüüpprojekt:	Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.503-12. Унифицированные сборные пролетные строения из предварительно напряженного железобетона для мостов и путепроводов на автомобильных и городских дорогах. Выпуск 19 (1975) [81]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: • antud tüüpprojekti järgi on ehitatud ainult keskmine sildeava; • kõnniteeblokid puuduvad; • remondi käigus on muudetud katendi paksust ja lisandunud on servaprussid; • keskmises avas on loobutud spetsiaalsetest servataladest.

Tabel 2. Jõgisoo II silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	4 Tallinn - Pärnu - Ikla
Silla kaugus teel:	23,699 km
Ületatav takistus:	Keila jõgi
Maakond:	Harju
Maanteeameti regioon:	Põhja
Silla koordinaadid:	X:6570718.1 Y:529746.4
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Jõgisoo II silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punktipilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Jõgisoo II sild)



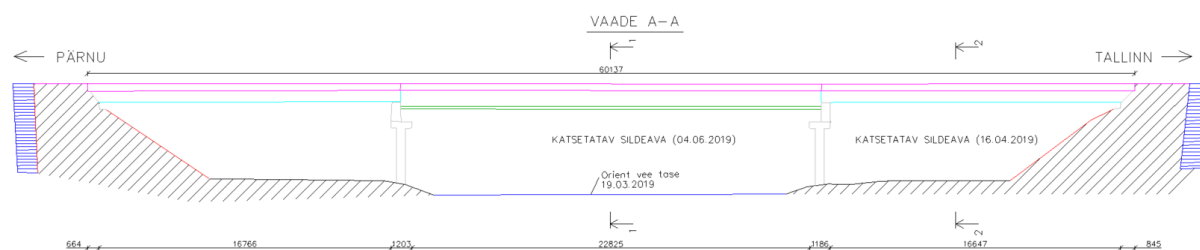
Foto 2. Vaade küljelt (Jõgisoo II sild)



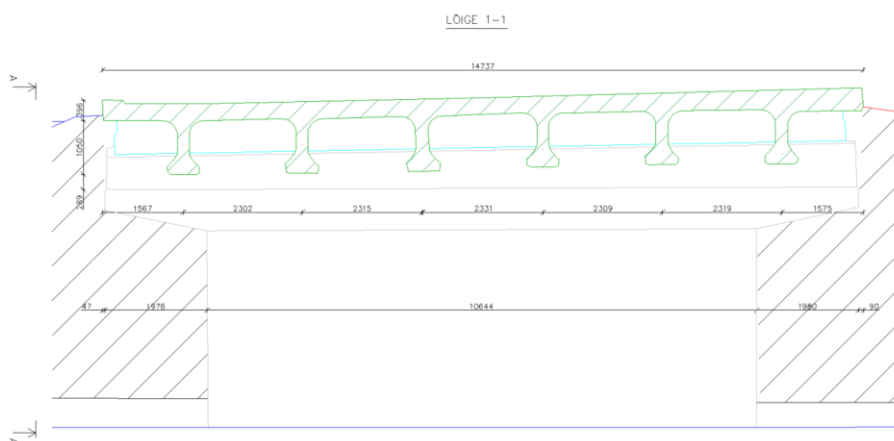
Foto 3. Vaade alt (Jõgisoo II sild)



Foto 4. Vaade pealt (Jõgisoo II sild)



Joonis 2. Jõgisoo II silla külgvaade



Joonis 3. Jõgisoo II silla (keskmise ava) ristlõige

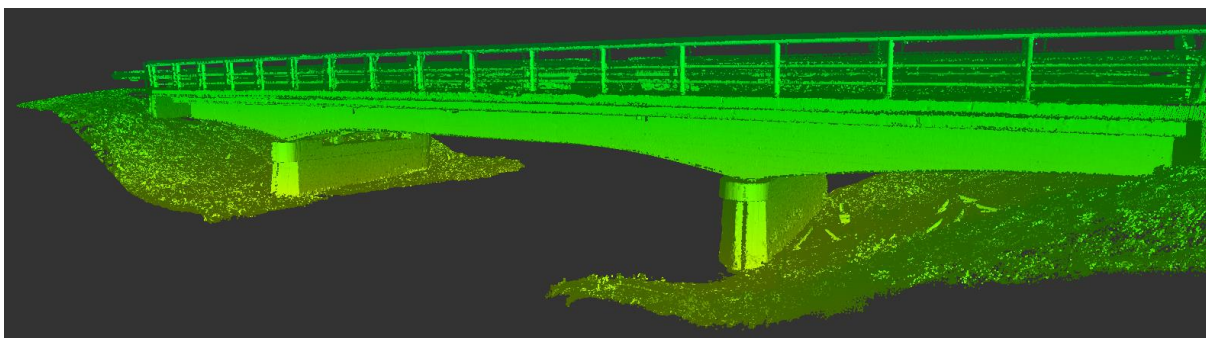
12) Piibe sild

Tabel 1. Piibe silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Piibe
Silla nr:	173
Ehitusaasta:	1962
Renoveerimise aasta:	-
SI (hindamise aasta):	76% (2016. a)
AKÖL:	793 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-13/HΓ-60
Sillateki konstruktsioon:	Konsoolidega tala, monoliitne raudbetoon
Avade arv:	3
Sõidutee gabariit:	7,0 m
Silla kogulaius:	8,9 m
Silla kogupikkus:	30,4 m

Tabel 2. Piibe silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	39 Tartu - Jõgeva - Aravete
Silla kaugus teel:	71,250 km
Ületatav takistus:	Põltsamaa jõgi
Maakond:	Lääne-Viru
Maanteeameti regioon:	Ida
Silla koordinaadid:	X:6535573.2 Y:626609.5
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Piibe silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punkt pilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Piibe sild)



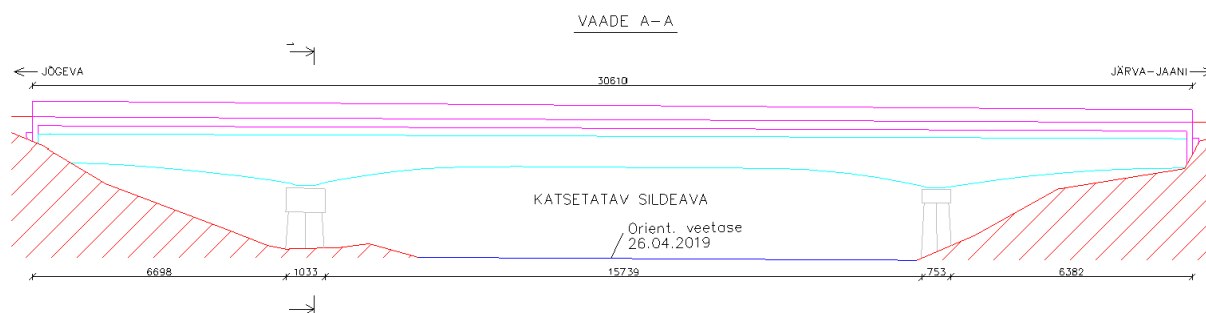
Foto 2. Vaade küljelt (Piibe sild)



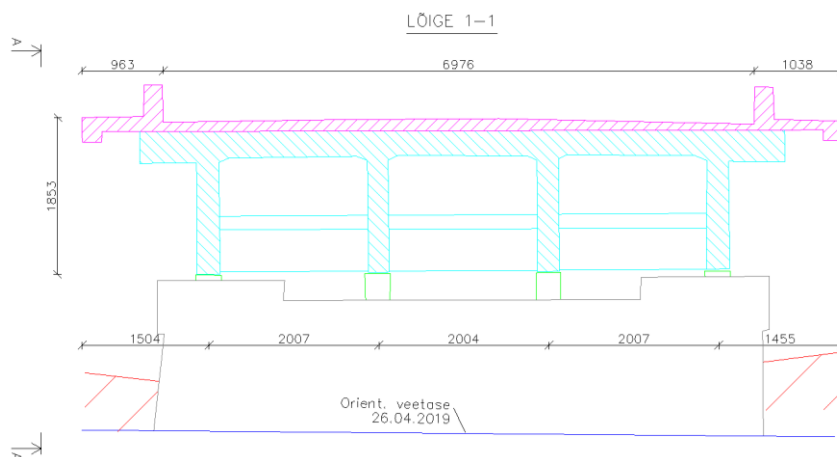
Foto 3. Vaade alt (Piibe sild)



Foto 4. Vaade pealt (Piibe sild)



Joonis 2. Piibe silla külgvaade



Joonis 3. Piibe silla ristlõige

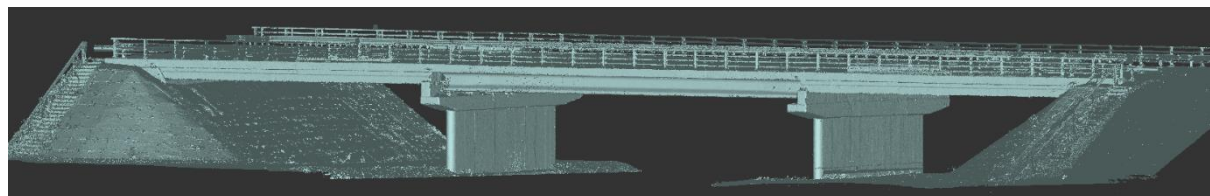
13) Jõgisoo II sild (äärmine ava)

Tabel 1. Jõgisoo II (äärmine ava) silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Jõgisoo II
Silla nr:	19
Ehitusaasta:	1982
Renoveerimise aasta:	2000
SI (hindamise aasta):	86% (2015. a)
AKÖL:	15848 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-30/HK-80
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav lihttala + õõnespaneel, raudbetoon
Avade arv:	3
Sõidutee gabariit:	10,8 m
Silla kogulaius:	14,8 m
Silla kogupikkus:	66,6 m
Tüüpprojekt:	Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.503-12. Унифицированные сборные пролетные строения из предварительно напряженного железобетона для мостов и путепроводов на автомобильных и городских дорогах. Выпуск 16 (1973) [85]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: • antud tüüpprojekti järgi on ehitatud kaks äärmist sildeava; • kõnniteeblokid puuduvad; • remondi käigus on muudetud katendi paksust ja lisandunud on servaprussid; • paneeli alumise pinna armatuur erineb projektijärgsest.

Tabel 2. Jõgisoo II silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	4 Tallinn - Pärnu - Ikla
Silla kaugus teel:	23,699 km
Ületatav takistus:	Keila jõgi
Maakond:	Harju
Maanteeameti regioon:	Põhja
Silla koordinaadid:	X:6570718.1 Y:529746.4
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Jõgisoo II silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punktipilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Jõgisoo II sild)



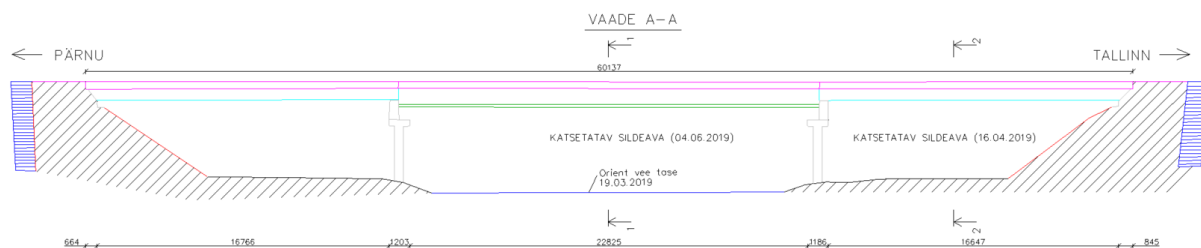
Foto 2. Vaade küljelt (Jõgisoo II sild)



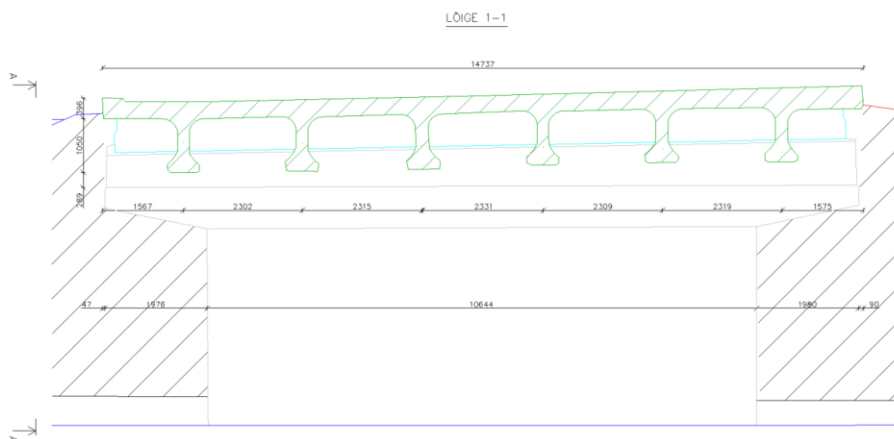
Foto 3. Vaade alt (Jõgisoo II sild)



Foto 4. Vaade pealt (Jõgisoo II sild)



Joonis 2. Jõgisoo II silla külgvaade



Joonis 3. Jõgisoo II silla (keskmise ava) ristlõige

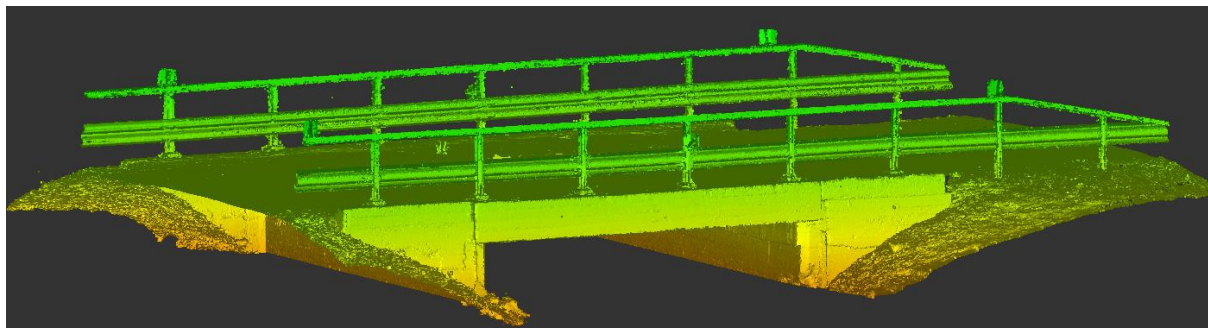
14) Vodja sild

Tabel 1. Vodja silla üldandmed [89], [90]

Näitaja	Väärtus
Silla nimi:	Vodja
Silla nr:	241
Ehitusaasta:	1966
Renoveerimise aasta:	-
SI (hindamise aasta):	84% (2017. a)
AKÖL:	568 autot ööpäevas
Normatiivne kandevõime:	H-18/HK-80
Sillateki konstruktsioon:	Monteeritav plaat, raudbetoon
Avade arv:	1
Sõidutee gabariit:	6,9 m
Silla kogulaius:	7,8 m
Silla kogupikkus:	10,5 m
Tüüpprojekt:	Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 31 (1955) [96]
Erinevus tüüpprojektist:	Sild on ehitatud tüüpkataloogi järgi, kuid tehtud on järgmisi muudatusi: - sild on tehtud 0,4 m pikem võrreldes tüüpkataloogiga; - vähesel määral on ehitamise käigus muudetud servaprussi kuju (servapruss on ilma külginna „siselõiketa“); - remondi käigus on muudetud katendi paksust.

Tabel 2. Vodja silla asukoht [89], [91], [92]

Näitaja	Väärtus
Tee nr ja nimetus:	15157 Vodja - Esna
Silla kaugus teel:	0,27 km
Ületatav takistus:	Vodja jõgi
Maakond:	Järva
Maanteeameti regioon:	Ida
Silla koordinaadid:	X:6534486.3 Y:594664.4
Link kaardile:	LINK KAARDILE (Google Maps) LINK KAARDILE (maainfo kaardirakendus)



Joonis 1. Väljavõte Vodja silla laserskaneerimise teel koostatud mudelist (punktipilv)



Foto 1. Vaade küljelt (Vodja sild)



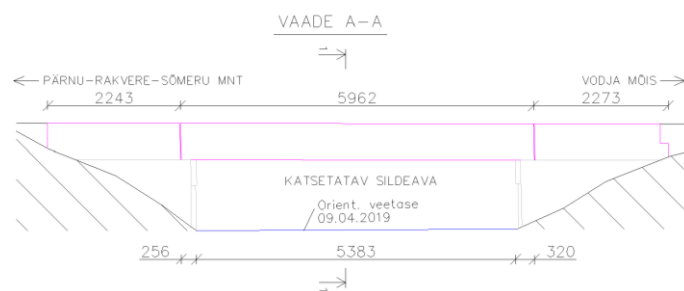
Foto 2. Vaade küljelt (Vodja sild)



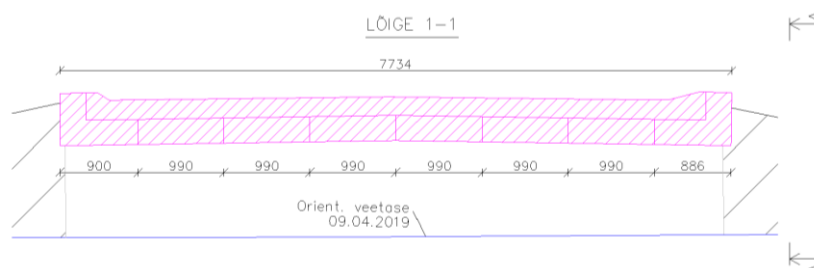
Foto 3. Vaade alt (Vodja sild)



Foto 4. Vaade pealt (Vodja sild)



Joonis 2. Vodja silla külgvaade



Joonis 3. Vodja silla ristlõige

LISA 2. FOTOD SILDADE KATSETAMISTEST

1) Poaka sild

Poaka silla katsetamine toimus 18.09.2018.

Ilm katsetamise ajal: +16°C, pilves, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas A-2.



Foto 1. Poaka silla katsetamine



Foto 2. Poaka silla katsetamine



Foto 3. Poaka silla katsetamine



Foto 4. Poaka silla katsetamine



Foto 5. Poaka silla katsetamine



Foto 6. Poaka silla katsetamine

2) Piiometsa sild

Piiometsa silla katsetamine toimus 25.09.2018.

Ilm katsetamise ajal: +9°C, pilvitu, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas B-2.



Foto 1. Piiometsa silla katsetamine



Foto 2. Piiometsa silla katsetamine



Foto 3. Piiometsa silla katsetamine



Foto 4. Piiometsa silla katsetamine



Foto 5. Piiometsa silla katsetamine



Foto 6. Piiometsa silla katsetamine

3) Rohe sild

Rohe silla katsetamine toimus 02.10.2018.

Ilm katsetamise ajal: +9°C, pilves, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas C-2.



Foto 1. Rohe silla katsetamine



Foto 2. Rohe silla katsetamine



Foto 3. Rohe silla katsetamine



Foto 4. Rohe silla katsetamine



Foto 5. Rohe silla katsetamine



Foto 6. Rohe silla katsetamine

4) Jõgisoo I sild

Jõgisoo I silla katsetamine toimus 09.10.2018.

Ilm katsetamise ajal: +11°C, pilves, uduvihm.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas D-2.



Foto 1. Jõgisoo I silla katsetamine



Foto 2. Jõgisoo I silla katsetamine



Foto 3. Jõgisoo I silla katsetamine



Foto 4. Jõgisoo I silla katsetamine



Foto 5. Jõgisoo I silla katsetamine



Foto 6. Jõgisoo I silla katsetamine

5) Maetsma sild

Maetsma silla katsetamine toimus 16.10.2018.

Ilm katsetamise ajal: +13°C, pilvitu, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas E-2.



Foto 1. Maetsma silla katsetamine



Foto 2. Maetsma silla katsetamine



Foto 3. Maetsma silla katsetamine



Foto 4. Maetsma silla katsetamine



Foto 5. Maetsma silla katsetamine



Foto 6. Maetsma silla katsetamine

6) Sandra sild

Sandra silla katsetamine toimus 30.10.2018.

Ilm katsetamise ajal: +1°C, pilves, sajuta, lumine.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas F-2.



Foto 1. Sandra silla katsetamine



Foto 2. Sandra silla katsetamine



Foto 3. Sandra silla katsetamine



Foto 4. Sandra silla katsetamine



Foto 5. Sandra silla katsetamine



Foto 6. Sandra silla katsetamine

7) Valgejõe sild

Valgejõe silla katsetamine toimus 23.10.2018.

Ilm katsetamise ajal: +5°C, pilves, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas G-2.



Foto 1. Valgejõe silla katsetamine



Foto 2. Valgejõe silla katsetamine



Foto 3. Valgejõe silla katsetamine



Foto 4. Valgejõe silla katsetamine



Foto 5. Valgejõe silla katsetamine



Foto 6. Valgejõe silla katsetamine

8) Lungu sild

Lungu silla katsetamine toimus 07.05.2019.

Ilm katsetamise ajal: +10°C, pilves, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas H-2.



Foto 1. Lungu silla katsetamine



Foto 2. Lungu silla katsetamine



Foto 3. Lungu silla katsetamine

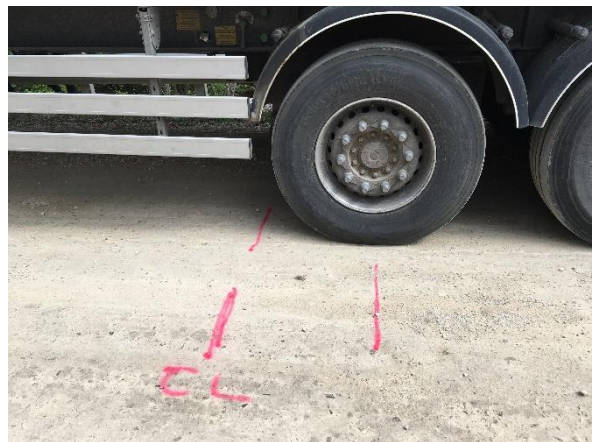


Foto 4. Lungu silla katsetamine



Foto 5. Lungu silla katsetamine



Foto 6. Lungu silla katsetamine

9) Türi-Alliku sild

Türi-Alliku silla katsetamine toimus 14.05.2019.

Ilm katsetamise ajal: +8°C, vähese pilvisusega, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas I-2.



Foto 1. Türi-Alliku silla katsetamine



Foto 2. Türi-Alliku silla katsetamine



Foto 3. Türi-Alliku silla katsetamine



Foto 4. Türi-Alliku silla katsetamine



Foto 5. Türi-Alliku silla katsetamine



Foto 6. Türi-Alliku silla katsetamine

10) Vaida III sild

Vaida III silla katsetamine toimus 23.04.2019.

Ilm katsetamise ajal: +19°C, pilvitu, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas J-2.



Foto 1. Vaida III silla katsetamine



Foto 2. Vaida III silla katsetamine



Foto 3. Vaida III silla katsetamine



Foto 4. Vaida III silla katsetamine



Foto 5. Vaida III silla katsetamine



Foto 6. Vaida III silla katsetamine

11) Jõgisoo II sild (keskmise ava)

Jõgisoo II silla keskmise ava katsetamine toimus 04.06.2019.

Ilm katsetamise ajal: +24°C, pilvitu, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas K-2.



Foto 1. Jõgisoo II silla (keskmise ava) katsetamine



Foto 2. Jõgisoo II silla (keskmise ava) katsetamine



Foto 3. Jõgisoo II silla (keskmise ava) katsetamine



Foto 4. Jõgisoo II silla (keskmise ava) katsetamine



Foto 5. Jõgisoo II silla (keskmise ava) katsetamine

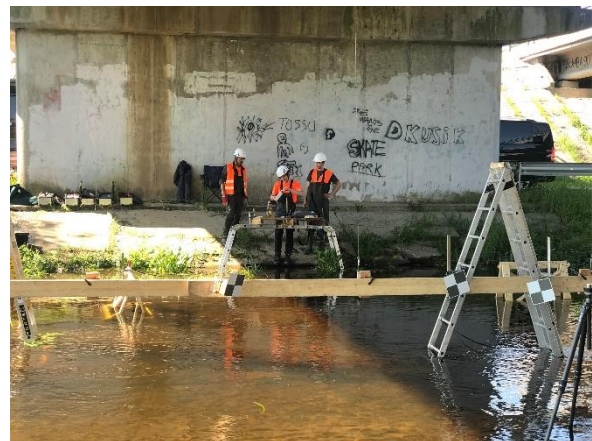


Foto 6. Jõgisoo II silla (keskmise ava) katsetamine

12) Piibe sild

Piibe silla katsetamine toimus 21.05.2019.

Ilm katsetamise ajal: +20°C, pilves, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas L-2.



Foto 1. Piibe silla katsetamine



Foto 2. Piibe silla katsetamine



Foto 3. Piibe silla katsetamine



Foto 4. Piibe silla katsetamine



Foto 5. Piibe silla katsetamine



Foto 6. Piibe silla katsetamine

13) Jõgisoo II sild (äärmine ava)

Jõgisoo II silla äärmise ava katsetamine toimus 16.04.2019.

Ilm katsetamise ajal: +10°C, pilvitu, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas M-2.



Foto 1. Jõgisoo II silla (äärmine ava) katsetamine



Foto 2. Jõgisoo II silla (äärmine ava) katsetamine



Foto 3. Jõgisoo II silla (äärmine ava) katsetamine



Foto 4. Jõgisoo II silla (äärmine ava) katsetamine



Foto 5. Jõgisoo II silla (äärmine ava) katsetamine

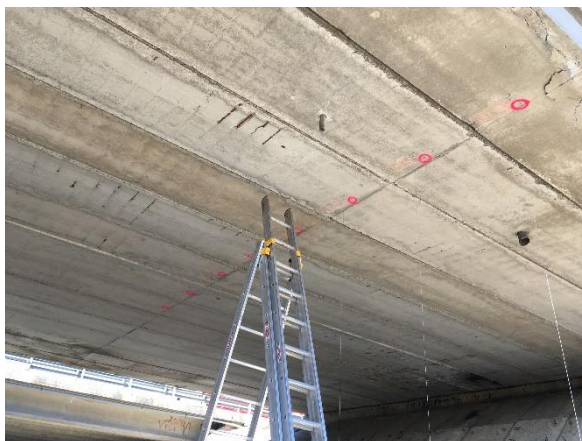


Foto 6. Jõgisoo II silla (äärmine ava) katsetamine

14) Vodja sild

Vodja silla katsetamine toimus 30.04.2019.

Ilm katsetamise ajal: +11°C, pilves, sajuta.

Katsetamisega seotud protseduuridega on täpsemalt võimalik tutvuda lisas N-2.



Foto 1. Vodja silla katsetamine



Foto 2. Vodja silla katsetamine



Foto 3. Vodja silla katsetamine



Foto 4. Vodja silla katsetamine



Foto 5. Vodja silla katsetamine



Foto 6. Vodja silla katsetamine

LISA 3. SILDADE TÖÖKINDLUSE JA PURUNEMISTÕENÄOSUSE ANALÜÜS

Uuritud sildade töökindluse ja purunemistõenäosuse analüüs

Järgnevas peatükis on kirjeldatud lähemalt sildade töökindlust ja purunemistõenäosust kui ühte silla kandevõimega seotud näitajat. Töökindluse selgitamiseks on vaja eelnevalt täpsustada, et kui silla elemendi kandevõime oleneb otseselt elementide seisukorrast (mitte seisundiindeksist SI), mida on võimalik teatud usaldusväärsusega hinnata, siis sild variseb enamasti koormuste tõttu, mille kohta puudub Eesti kontekstis analüüsitud ning usaldusväärselt töödeldud info. Eelnevast põhjusest tulenevalt on ka keeruline vaadata piirseisundeid tervikuna ja hinnata, kas silla kandevõime või töökindlus on hetke oludele piisav. Sellest tulenevalt põhinevad analüüsid teoreetilistele alustele ja kõik analüüsi käigus saadud tulemused on ligikaudsed.

Töökindluse ja purunemistõenäosuse taust

Olemasoleva rajatise ohutus on pigem otsuse tegemise kui teaduse küsimus. Töökindluse teooria aitab muuta otsuse tegemise ratsionaalsemaks. [\[105\]](#)

Süsteemi töökindlus (inglise keeles *Reliability*) võeti inseneerias esmakordselt kasutusele tööstuses ja see on oma olemuselt seotud riskide hindamise ja eri näitajate tõenäosusega seotud muutuse prognoosimisega. Tavapraktikas kasutatakse töökindluse tagamiseks osavarutegureid, mis on aja jooksul pidevalt muutunud. Osavarutegurid ja seeläbi ka töökindlus on uute rajatiste projekteerimisel vajalikud selleks, et ühest küljest tagada ehitatud rajatise majandusliku otstarbekuse tasakaal ja teisest küljest tagada rajatise ohutus kogu projekteeritud eluea jooksul. Töökindlus on ajas muutuv suurus juba tänu keskkonna muutustele – hetkel projekteeritakse sildu üldjuhul 100 aastaks [\[36\]](#), kuid kui vaadata ajas tagasi, siis enam kui 20 aastat tagasi ehitatud sildade teoreetiline kandevõime ei vasta enam hetkel kehtivatele normkoormustele.

Töökindluse analüüs (inglise keeles *Reliability Analysis*) on välja töötatud just selleks, et arvestada ühelt poolt rajatise kandevõimega ja teiselt poolt koormustega. Erinevalt kandevõime varu analüüsimisest on sellesse analüüsi kaasatud ka hindamismetoodika puudustest tulenev määramatus.

Standardis ISO 2394 [\[106\]](#) on välja toodud erinevad definitsioonid, mis on seotud konstruktsioonide töökindlusega. Sama standard on olnud üheks aluseks ka eurokoodeksites kasutatud definitsioonides.

Töökindluse definitsioon [\[106\]](#), [\[36\]](#): konstruktsiooni või konstruktsiooni osa võime täita projekteerimisel määratud nõudeid, sisaldades ka projekteeritud eluiga. Töökindlust väljendatakse tavaliselt tõenäosusliku suurusena. Töökindlus hõlmab endas ka konstruktsiooni ohutust, kasutust ja vastupidavust.

Projekteerimisel arvestatakse erinevate muutujate määramatusega ning selleks kasutatakse osavarutegureid nii koormustele kui ka vastupanule. Kuna need osavarutegurid on välja töötatud „standardolukordade“ jaoks, siis olemasolevate rajatiste hindamisel annab nende kasutamine tihti liiga konservatiivse tulemuse. Seetõttu oleks vajalik uurida rajatise ja nendel liikuvaid koormuseid põhjalikumalt, et teada saada nende täpsem kandevõime ja seeläbi ka töökindlus.

Käesolevas peatükis kasutatavad tähised:

- α – muutuja tundlikkustegur;
- γ – osavarutegur;
- β – töökindluse indeks;
- φ – standardse normaaljaotuse kumulatiivne jaotusfunktsioon;
- μ – keskväärtus;
- σ – standardhälve;
- P_f – purunemise tõenäosus;
- P_{nf} – mitte purunemise tõenäosus;
- $Prob(.)$ – tõenäosus;
- R – konstruktsiooni vastupanu;
- E või S – koormustest tulenev sisejõud;
- G – konstruktsiooni piiriseisund;
- F – materjali omadust kirjeldav suurus;
- M – arvutusmudeli määramatusega arvestav tegur;
- D – mõõtmete ja kogusega seotud suurus;
- P – materjali omaduse mõõdetud suurus;
- T – keskväärtuse ja standardhällbega arvestav üleminekutegur;
- U – normeerimistegur.

Töökindluse defineerimine

EVS-EN 1990 [36] Lisas B on tutvustatud töökindluse tagamist ja töökindluse indeksit ning Lisas C on kirjeldatud töökindluse analüüsi aluseid. Töökindluse liigitus võib toimuda indeksi β abil, mis arvestab aktsepteeritud või eeldatavat koormuste mõju ning kandevõime ja mudeli statistilist muutlikkust. Antud töös on töökindlus defineeritud kõige pealiskaudsemalt läbi kandepiiriseisundi, võttes aluseks paindekandevõime.

Iga konstruktsioonidega kokku puutuv insener peaks teadma, et olenemata arvutusmodelite valikust säilitab konstruktsioon oma kandevõime, kui välistest koormustest tulenevad sisejõud on väiksemad, kui konstruktsiooni materjali omadustest ja mõõtmetest tulenev vastupanu. Valemina märgitakse seda standardites järgnevalt (valem 1):

$$R \geq E, \quad (\text{valem 1})$$

kus R tähistab konstruktsiooni vastupanu ja E (mõnel juhul tähistatakse seda ka S tähega) koormustest tulenevat sisejõudu (vaata [joonis 1](#)).

Jooniselt on näha, et mõlemal juhul (nii kandevõimel kui ka välisest koormusest tuleneval sisejõul) on kasutusel osavarutegurid ehk normatiivset väärtust on muudetud mingil kokkulepitud määral. Täpse väärtuse määramisel tuleb arvestada ka asjaoludega, et näiteks tala mõõtmed ei ole konstantsed, armatuuri kogus muutub, töötav armatuur ei asu täpselt ühel kõrgusel, autod liiklevad erineva kiiruse ja massiga jne. Sellest tulenevalt on ka need väärtused juba normeeritud ehk kõik arvutustes kasutatud väärtused on tagatud 95% tõenäosusega. Kuna rajatise projekteerimisega kaasneb palju määramatust, siis sellest tulenevalt ei ole võimalik määrata rajatise täielikku ohutustaset ehk öelda, et rajatise kandevõime on täielikult tagatud, vaid on võimalik öelda, et koormustest põhjustatud sisejõud jäävad kindla aja jooksul väiksemaks rajatise vastupanust. Sellist ohutust saab omakorda väljendada tõenäosusliku suurusena (valem 2):

$$P_f + P_{nf} = 1, \quad (\text{valem 2})$$

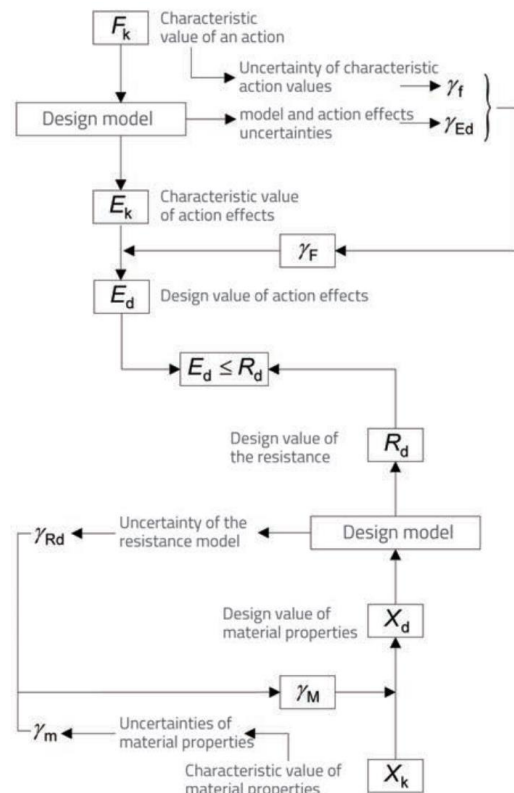
kus P_f tähistab mingi olukorra esinemistõenäosust ja P_{nf} tõenäosust, et sellist olukorda ei esine.

Kuna olukorra esinemise ehk purunemise tõenäosust on lihtsam määrata, siis elemendi või rajatise töökindlust väljendatakse järgnevalt (valem 3):

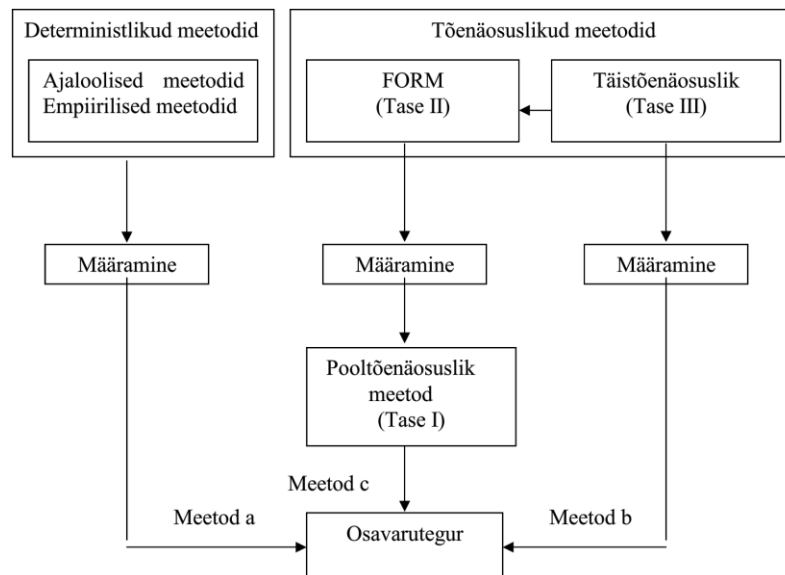
$$\text{töökindlus} = 1 - P_f, \quad (\text{valem 3})$$

kus *töökindlus* tähistab tõenäosust, et midagi ei juhtu. Vastavalt standardile EVS-EN 1990 ja üldisele levinud praktikale kasutatakse erinevate piiriseisundite töökindluse hindamiseks töökindluse indeksit β .

Standardis EVS-EN 1990 on märkusena välja toodud, et nii purunemistõenäosus kui ka töökindluse indeks on ainult abstraktsed suurused, mis ei pea tingimata kirjeldama tegelikku purunemist. Neid kasutatakse hoopis tööväärtustena meetodite kalibreerimiseks ja konstruktsioonide töökindlustasemete võrdlemiseks. Eurokoodeksites toodud töökindlusmeetodite arvutusmodelid põhinevad peamiselt meetoditel a ja c ning neid kasutatakse näiteks eurokoodeksite edasiarendamisel (joonis 2).



Joonis 1. Rajatise lineaar-elastsel projekteerimisel kasutatavad kandepiiriseisundi muutujad ja osavarutegurid [107]

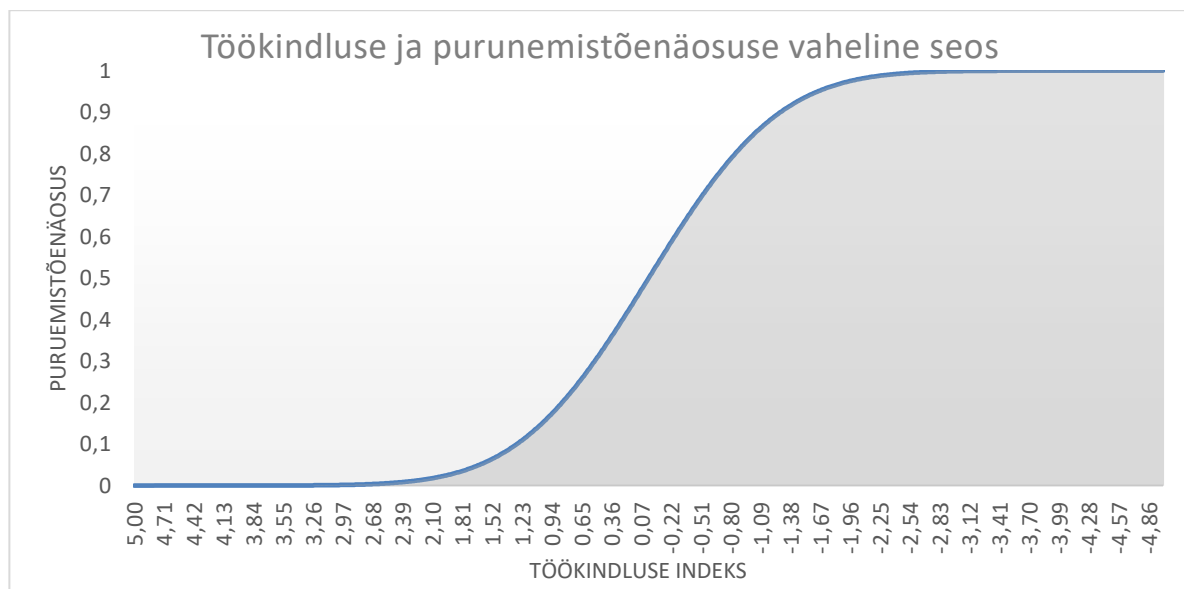


Joonis 2. Töökindlusmeetodite ülevaade [36]

Matemaatilises mudelis on töökindluse indeksit väljendatud kui suurust, millega saab iseloomustada kandevõime määramatust, mis on otseselt seotud purunemistõenäosusega (valem 4):

$$\beta = -\varphi^{-1}(P_f), \quad (\text{valem 4})$$

kus φ on standardse normaaljaotuse kumulatiivne jaotusfunktsioon.



Joonis 3. Töökindluse indeksi ja purunemistõenäosuse vaheline seos

Seos purunemistõenäosuse ja töökindluse indeksi vahel on seotud pöördfunktsiooniga, mis on lihtsasti arvutatav – tulemus on esitatud graafikuna [joonisel 3](#). Sellelt on näha, et mida väiksemaks muutub töökindluse indeks, seda suuremaks muutub purunemistõenäosus ja vastupidi. Kui töökindluse indeks on võrdne 0-ga, siis on purunemistõenäosus 0,5. Tõenäosuse mõistes on see võrdeline tõenäosusega, et mündi viskamisel tuleb kull (või kiri).

Töökindluse analüüsis kasutatavad muutujad ja nende arvutusmodelid

Töökindluse analüüs põhineb kõige tavalisematel muutujatel, mida on võimalik jaotada kolme eri rühma [105]:

- keskkonnaga seotud muutujad, mida ei ole võimalik projekteerijal kontrollida (sinna rühma kuuluvad näiteks maavärinad või tuule kiirus);
- konstruktsiooniga seotud muutujad, mis muutuvad ainult tänu kahjustusprotsessidele;
- kasutusega seotud muutujad, mida on võimalik kontrollida või mõõta (antud töö raames on selleks valitud 52 tonnised veokid).

Põhimuutujatest on antud töös keskendutud konstruktsiooni ja kasutusega seotud muutujatele, mida kasutatakse kõige üldisemal tasemel. Sellegipoolest on vajalik selgitada, millest põhimuutujad koosnevad.

Vastupanu (R) on kõige lihtsam kirjeldada valemiga 7:

$$R = M \times F \times D, \quad (\text{valem 7})$$

kus R tähistab vastupanu, M on arvutusmodeli määramatusega arvestav tegur, F materjali omadus ning D mõõtmete ja kogusega seotud suurus.

Arvutusmodeli määramatus (M) tuleneb asjaolust, et teoreetiline mudel ei jäljenda tegelikku olukorda, vaid selle abil on võimalik piisava täpsusega kirjeldada käitumist ja selle teguriga väljendataksegi „piisavust“. Näiteks betoontala puhul on paindekandevõime arvutusmodelid täpsemad kui põikjõukandevõime omad.

Materjali omaduste (F) kirjeldamiseks on vajalik lisaks mõõdetud väärtusele (P) tuua välja ka selle määramatus, mida väljendatakse ülekandeteguriga (T), mis koosneb tavaliselt kahest muutujast (keskväärtus ja standardhälve). Selline väljendus on vajalik kahel põhjusel – ühelt poolt ei ole materjalid kogu konstruktsiooni ulatuses homogeensed ja teisalt kaasneb materjali omaduse mõõtmisega määramatus. Sellest tulenevalt väljendatakse materjali omadust omakorda järgmise valemiga (valem 8):

$$F = P \times T. \quad (\text{valem 8})$$

Mõõtmete ja kogusega seotud suurused (D) väljendatakse tavaliselt keskväärtusena eeldusel, et tolerantsid jäävad lubatud piiridesse. Samas tuleb tähelepanu juhtida, et variatsioonikoefitsient ($CoV = \frac{\mu}{\sigma}$) on väiksemate mõõtmetega elementidel suurem.

Kasutusega seotud muutujad on need, mis põhjustavad konstruktsioonidele sisejõude, deformatsioone ja muid lühema- või pikemaajalisi muutuseid. Antud töö raames on uuritud 52 t raskeveoki poolt tekitatud paindemomente talas. Kui tüüpiliselt kirjeldatakse peamist koormust ekstreemumitega jaotuste järgi, siis antud töös on lihtsuse huvides ja järgimaks Cornelli töökindluse indeksi arvutusmetoodikat eeldatud, et veoki koormused varieeruvad normaaljaotuse järgi. Kuna koormusmudel on otseselt seotud juhusliku või mittejuhusliku muutujaga, siis seda väljendatakse valemiga 9:

$$E = \varphi(E_0, W), \quad (\text{valem 9})$$

kus E_0 on juhuslik muutuja, mis on tihti ajast või asukohast sõltuv ja otseselt seotud sisejõudu tekitava nähtusega ning tuleks käsitleda konstruktsioonist eraldiseisvalt. W on juhuslike või mittejuhuslike muutujate kogum, mis võib olla seotud konstruktsiooni materjali omadustega ja on tihti ajast sõltumatu. Koormusmudel võib sisaldada ka konstruktsiooniga seotud muutujat nagu näiteks omakaal. φ tähistab funktsiooni, mis kirjeldab kahe muutuja vahelist seost.

Töökindluse analüüsis kasutatud arvutusmodelite määramatus

Nagu eelpool kirjeldatud, siis antud uuringus kasutatakse töökindluse analüüsi täiendava nüansina, mille abil saab rajatise võrrelda ja sellest tulenevalt on neid muutujaid käsitletud kõikidel rajatisel sarnaselt. Täpsustatud uuringu raames on võimalik leida igale sillale täpsem arvutusmodelite määramatus, et selle kaudu juba täpsemalt rajatise purunemisetõenäosust hinnata. Täpsustatud uuringu raames saadavad töökindluse hinnangud on väiksema konservatiivsuse tõttu tavaliselt kõrgema väärtusega, kui üldisemal tasemel tehtud uuringud. Kui iga muutujat kirjeldada määramatusega, siis sellega käib alati kaasas jaotusfunktsioon, milleks on antud uuringu raames normaaljaotus ja selle kirjeldamiseks on kaks suurust – keskvärtus μ ja standardhälve σ . Erinevate arvutusmodelite väärtused on võetud juhise „Probabilistic Model Code“ [103] ja välja toodud tabelis 1.

Tabelis toodud väärtused on leitud kriitilistele kohtadele arvestusega, et eri mudelite vahel võib olla korrelatsioon ja see on juba projekteerija poolt kasutatud arvutusmodelites sisse arvestatud. Sarnaselt täpsemate mudelitega on igal muutujal oma normeeritud keskvärtus ja hälve.

Tabel 1. Töökindluse analüüsis kasutatud jaotised [103]

Arvutusmodeli tüüp	Jaotus	Normeeritud keskvärtus	Normeeritud variatsiooni-koefitsient
Paindemoment omakaalust	Normaaljaotus	1,0	0,05
Paindemoment raskeveokist	Logaritmiline normaaljaotus	1,0	0,10
Staatiline paindekandevõime	Logaritmiline normaaljaotus	1,2	0,15

Lisamärkusena tuleb välja tuua, et antud väärtuseid kasutatakse silla kui kogu süsteemi töökindluse leidmiseks, kus üksikelementide töökindlus ja elementide omavaheline koostöö on arvesse võetud arvutusmodelis, seega detailsemal lähenemisel (läheldes ainult üksikelemendi töökindlusest) on võimalik saada täpsemad tulemused.

Töökindluse sihtvärtus

Kuna rajatise projekteeritakse kestma kindlaks ajaperioodiks, siis on välja töötatud erinevad töökindluse indeksi sihtväärtused eri juhtumite ja vaatlusperioodide kohta. EVS-EN 1990 lisas B on esimesse töökindlusklassi (RC1) kuuluvate rajatiste kandepiiriseundi puhul töökindluse 1 aasta minimaalne sihtvärtus 4,2 ja 50 aasta puhul 3,3, mis vastavad purunemistõenäosusele vastavalt 10^{-5} ja 5×10^{-4} . Kuna need suurused on määratud uute rajatiste puhul, siis olemasolevate hindamisel tuleks kasutada teistsuguseid väärtuseid, kuid eurokoodeksis EVS-EN 1990 [36] ja juhendis „Probabilistic Model Code“ [103] juhises sellist võimalust paraku ei pakuta.

Hollandi rahvuslikus standardis NEN 8700 [104] on 15 aasta sihtväärtuseks lubatud kasutada töökindluse indeksit 2,5 (vastab purunemistõenäosusele 0,62%), mille ületamisel peaks sillale teostama remondi. Seda sihtväärtust kasutatakse ka antud töös nii 1 aastase kui ka pikema perioodi purunemistõenäosuse hindamise sihtväärtusena.

Töökindluse indeksi leidmine vastavalt Cornelli valemile

E. Basler [109] ja C.A. Cornell [110] olid esimesed, kes hakkasid kasutama töökindluse indeksi definitsiooni ja tõid välja selle üldise kuju vastavalt valemile 6. Valem eri arvutusmodeli piirtingimuse määramiseks on $\beta \geq \beta_0$, kus β_0 on standardites toodud piirväärtus. Töökindluse indeksi täpsemal lahti kirjutamisel saame keskväärtuseks ja hälbeks järgnevad muutujad (valemid 10 ja 11):

$$\mu_G = \mu_R - \mu_{E, \text{omakaal}} - \mu_{E, 52 \text{ t veok}}, \quad (\text{valem 10})$$

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{E, \text{omakaal}}^2 + \sigma_{E, 52 \text{ t veok}}^2}. \quad (\text{valem 11})$$

Selleks, et näha kumb muutuja annab purunemise tõenäosusele rohkem kaalu, leitakse tundlikkuskäitajad (α) kõikidele mudelitele (valemid 12 kuni 14):

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{E, \text{omakaal}}^2 + \sigma_{E, 52 \text{ t veok}}^2}}, \quad (\text{valem 12})$$

$$\alpha_{E, \text{omakaal}} = \frac{\sigma_{E, \text{omakaal}}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{E, \text{omakaal}}^2 + \sigma_{E, 52 \text{ t veok}}^2}}, \quad (\text{valem 13})$$

$$\alpha_{E, 52 \text{ t veok}} = \frac{\sigma_{E, 52 \text{ t veok}}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{E, \text{omakaal}}^2 + \sigma_{E, 52 \text{ t veok}}^2}}. \quad (\text{valem 14})$$

Kusjuures normaaljaotise puhul on $\alpha_R^2 + \alpha_{E, \text{omakaal}}^2 + \alpha_{E, 52 \text{ t veok}}^2 = 1$.

Tundlikkustegureid kasutatakse laialdaselt töökindluse analüüsis ja standardis EVS-EN 1990 on need suurused ka täpsemate analüüside (kus on palju erinevaid muutujaid) tarbeks standardiseeritud. Tulenevalt tundlikkuskäitajatest ja töökindluse indeksi sihtväärtusest leitakse ka eri arvutusmudelitele projekteerimise sihtväärtused, mille kaudu on võimalik tuletada ka osavarutegureid. Näiteks kandevõime arvutusmodeli vajalikud sihtväärtused leitakse valemiga 15:

$$r^* = (1 - \alpha_R \times \beta_0 \times v_R), \quad (\text{valem 15})$$

kus r^* tähistab kandevõime projekteerimise sihtväärtust, α_R on kandevõime tundlikkuskäitaja, β_0 standardis toodud sihtväärtus ja v_R kandevõime variatsioonikoefitsient.

A.M. Hasofer ja N.C. Lind [111] täiendasid metoodikat selliselt, et enne töökindluse indeksi arvutust teisendatakse muutujad standardväärtusteks (valemid 16 ja 17) – sellisel juhul võib lisada rohkem sõltumatuid muutujaid. Teisendamise reegel:

$$U_1 = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R}, \quad (\text{valem 16})$$

$$U_2 = \frac{E - \mu_E}{\sigma_E}. \quad (\text{valem 17})$$

Selle teisenduse tulemusena on ringikujulise kujundi teljed sümmeetrilised ja keskvaartused võrdsed nulliga ning standardhälbed ühega.

Tänu standardiseeritud lähenemisele on tegemist töökindluse analüüsi peamise alusega ja seda lähenemist kutsutakse rahvusvaheliselt FORM (inglise keeles *First Order Reliability Analysis*) töökindluse analüüsiks. See nimetus tuleneb Tayloriga esimese astme võrrandi kasutamisest.

Antud töös kasutatakse Cornelli lähenemist, kus piirväärtus on defineeritud lineaarselt ja kõik muutujad on normaaljaotusega.

Arvutustulemused ja analüüs

Algandmetena on kasutatud kandepiiriseisundi jaotises arvutatud suuruseid ja vastavates juhendites soovitatud väärtuseid koos hälvetega. Kõikide sildade puhul on eelduseks võetud sarnased tingimused, et tulemused oleksid omavahel võimalikult sarnase taustsüsteemiga ja sellest tulenevalt paremini võrreldavad. Sarnaste tingimuste eeldamine tähendab seda, et arvutusmodelid, olenemata silla tüübist, olid sama normeeritud määramatusega ja olenemata silla tegelikust asukohast eeldati, et liiklusest tulenev koormus on sillal sama – sillal tekitavad sisejõu omakaalukoormus ja kaks kõrvuti asetsevat 52 tonnist raskeveokit.

Selgitused alljärgnevate tabelite kohta:

$M_{Em,1}$ – keskmine paindemoment silla omakaalust;

$M_{Em,2}$ – keskmine paindemoment muutuvkoormusest (kaks 52 t veokit kõrvuti, tüüp 5);

$M_{Ed,1}$ – arvutuslik paindemoment silla omakaalust;

$M_{Ed,2}$ – arvutuslik paindemoment muutuvkoormusest (kaks 52 t veokit kõrvuti, tüüp 5);

$M_{R,mean}$ – keskmine paindekandevõime;

M_{Rd} – arvutuslik paindekandevõime;

P_f – purunemistõenäosus.

Sildade purunemistõenäosus paindekandevõime kaotuse läbi

[Tabelis 2](#) on toodud arvutustes kasutatud keskväärtused ja purunemistõenäosus 1 aasta jooksul. Tulemustest selgub, et ainult Poaka sillal on purunemistõenäosus suurem kui 0,62% ja teistel sildadel on töökindlusega kõik korras. Kui piirväärtuseks võtta standardis EVS-EN 1990 toodud madalaim 1 aasta sihtväärtust 0,0013%, siis 14-st sillast vastaks sihtväärtusele ainult 3 silda (Sandra, Vaida III ja Vodja), mis näitab väga selget standardis toodud suuruse konservatiivsust.

Tabel 2. Paindekontrolli kandepiiriseisundis teostatud purunemistõenäosuse koondtabel

Sild		Paindemoment omakaalust [kNm]		Paindemoment veokist [kNm]		Arvut. painde- kandevõime M_{Rd} [kNm]	Keskm. painde- kandevõime $M_{R,mean}$ [kNm]	Purunemistõenäosus P_f 1 aasta jooksul [%]
		$M_{Ed,1}$	$M_{Em,1}$	$M_{Ed,2}$	$M_{Em,2}$			
Poaka sild		572	389	513	316	920	1138	0,66
Piiometsa sild		158	107	260	160	477	590	0,02
Rohe sild		453	308	390	240	1036	1282	0,01
Jõgisoo I sild		3864	2627	2094	1291	5973	7391	0,10
Maetsma sild	ava	1259	856	2643	1629	3689	4565	0,16
	tugi/konsool	2335	1588	3101	1911	4988	6172	0,24
Sandra sild		224	152	167	103	854	1057	0,00
Valgejõe sild		95	64	114	70	197	244	0,16
Lungu sild		887	603	635	391	1603	1984	0,05
Türi-Alliku sild		500	340	557	343	906	1121	0,56
Vaida III sild		354	240	386	238	1214	1502	0,00
Jõgisoo II sild (keskmine ava)		4126	2805	2193	1352	5973	7391	0,20
Piibe sild	ava	333	227	1073	661	1251	1548	0,32
	tugi/konsool	1133	770	1224	754	2224	2752	0,18
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		860	585	381	235	1635	2023	0,00
Vodja sild		38	26	60	37	188	233	0,00

Purunemistõenäosus 1 aasta jooksul on küll hea indikaator sildade võrdlemiseks, kuid otsuste tegemiseks on vajalik hinnata ka purunemistõenäosuse muutust aja jooksul. [Tabelis 3](#) ja [joonisel 5](#) on toodud sildade purunemistõenäosuse muutus aja jooksul, mis on arvutatud valemiga 18 [\[105\]](#):

$$P_{f,n} = 1 - (1 - P_f)^n, \quad (\text{valem 18})$$

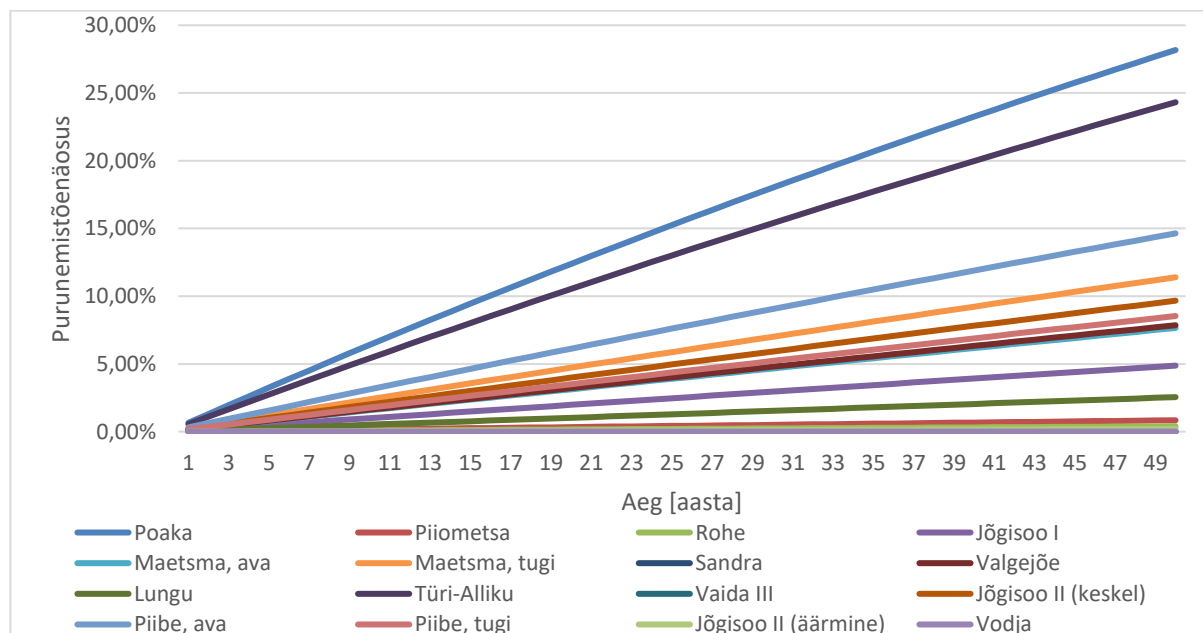
kus $P_{f,n}$ tähistab purunemistõenäosust aastal n ja P_f tähistab esialgset purunemistõenäosust.

[Tabelist 3](#) on näha, et enamuse sildasid (8 tk 14-st) ei vastaks 15 aasta pärast enam purunemistõenäosuse sihtväärtustele ja kõige ebasoodsamas olukorras oleva Poaka silla purunemistõenäosus on peaaegu 10%. Selleks, et hoida sildade purunemiskindlus sihtväärtusest kõrgemal on nendele sildadele vaja teostada kapitaalremont.

Tabel 3. Uuritud sildade paindekandevõime purunemistõenäosus 15 aasta jooksul

Sild		Purunemis- tõenäosus P_f 15 aasta jooksul [%]	Mitme aasta pärast on piirväärtus ületatud
Poaka sild		9,45	0
Piiometsa sild		0,25	37
Rohe sild		0,12	>50
Jõgisoo I sild		1,49	7
Maetsma sild	ava	2,36	4
	tugi/konsool	3,57	3
Sandra sild		0,00	>50
Valgejõe sild		2,42	4
Lungu sild		0,77	13
Türi-Alliku sild		8,02	2
Vaida III sild		0,00	>50
Jõgisoo II sild (keskmine ava)		3,01	4
Piibe sild	ava	4,64	2
	tugi/konsool	2,64	4
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		0,06	>50
Vodja sild		0,00	>50

Joonisel 5 on välja toodud sildade purunemistõenäosuste muutumine järgneva 50 aasta jooksul. Kuna täpsemat informatsiooni ei ole saadaval, siis on purunemistõenäosuse muutused lineaarsed.

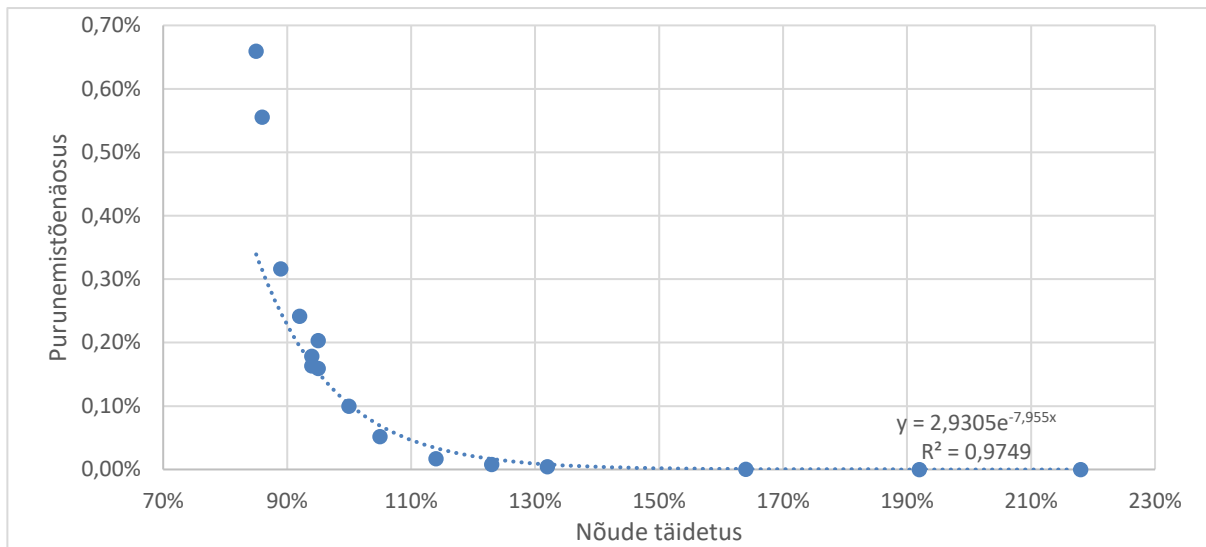


Joonis 5. Katsetatud sildade purunemistõenäosuse muutus 50 aasta jooksul

Jooniselt on näha, et praegu halvemas seisus olevate sildade purunemistõenäosus on 50 aasta pärast juba väga kõrge ja ületab tõenäosuse poolest ka täringu veeretamisel teatud numbri tulemise tõenäosust. See tähendab, et näiteks Poaka sillal piisab juba 4-st halvast eri tingimuse (nt 50% suurema koormuse sattumist nõrgestatud kohta) kokkusattumusest, et sild puruneks paindemomentide tagajärjel.

Sildade kandevõime varu ja purunemistõenäosuse võrdlus

Kuna kõikides varasemates uuringutes on sildade seisukorda hinnatud läbi kandevõime varu, siis järevalt on omavahel võrreldud töökindluse analüüsi tulemusi ja paindekandevõime nõude täidetuse omavahelisi seoseid. Vastavad tulemused on esitatud [joonisel 6](#). Jooniselt on näha, et tulemustel on väga tugev eksponentsiaalne seos, mis tähendab, et sillad, millel on suur kandevõime varu, on ka väiksem purunemistõenäosus.



Joonis 6. Paindekandevõime nõude täidetuse ja purunemistõenäosuse suhe

Muud arvatud väärtused

Standardi EVS-EN 1990 lisa C on toodud ka tundlikkustegurite väärtused, mida tuleks kasutada FORM analüüsis ja mis on negatiivsed ebasoodsate koormuste ja koormustulemite ning positiivsed kandevõime jaoks. Standardis on toodud, et nende väärtused võib võtta vastavalt -0,7 ja 0,8 eeldusel, et $0,16 < \sigma_E/\sigma_R < 7,6$. Kui see tingimus ei ole rahuldatud, siis tuleks suurema standardhälbega väärtuse puhul kasutada $\alpha = \pm 1,0$ ja väiksema standardhälbega $\alpha = \pm 0,4$.

[Tabelis 4](#) on toodud osavarutegurite väärtused, mis on arvatud tundlikkustegurite ja töökindluse põhjal.

Tabel 4. Tundlikkustegurid ja osavarutegurid

Sild		Tundlikkustegurid			Veoki koormuse ja kandevõime standardhälvete suhe σ_E/σ_R	Osavarutegurid		
		α_R	α_G	α_Q		γ_R	γ_G	γ_Q
Poaka sild		0,98	-0,11	-0,16	0,19	1,35	1,08	1,15
Piiometsa sild		0,98	-0,06	-0,16	0,18	1,82	1,08	1,13
Rohe sild		0,99	-0,08	-0,11	0,12	1,95	1,07	1,15
Jõgisoo I sild		0,99	-0,12	-0,10	0,12	1,58	1,07	1,16
Maetsma sild	ava	0,97	-0,06	-0,21	0,24	1,50	1,08	1,13
	tugi/konsool	0,98	-0,08	-0,18	0,21	1,46	1,08	1,14
Sandra sild		1,00	-0,05	-0,06	0,06	3,48	1,08	1,16
Valgejõe sild		0,98	-0,09	-0,17	0,19	1,51	1,08	1,14
Lungu sild		0,99	-0,10	-0,12	0,13	1,67	1,07	1,15
Türi-Alliku sild		0,97	-0,10	-0,18	0,20	1,36	1,07	1,14
Vaida III sild		0,99	-0,05	-0,09	0,11	2,61	1,08	1,15
Jõgisoo II sild (keskmine ava)		0,98	-0,12	-0,11	0,12	1,49	1,07	1,16
Piibe sild	ava	0,96	-0,05	-0,25	0,28	1,41	1,08	1,12
	tugi/konsool	0,98	-0,09	-0,16	0,18	1,50	1,08	1,14
Jõgisoo II sild (äärmine ava)		0,99	-0,10	-0,07	0,08	2,07	1,07	1,17
Vodja sild		0,99	-0,04	-0,09	0,11	3,05	1,07	1,14

Tabelist on näha, et tundlikkustegurid varieeruvad vähe ja suurused on pigem väiksemapoolsed. Samas on ka näha, et mõnel juhul ei vasta koormuse ja kandevõime hälvete suhe standardis toodud piirväärtusele ehk on madalam, kui soovitatud piirväärtus 0,16.

Kui osavarutegurite arvutuse aluseks kasutada soovituslikke tundlikkustegureid ja standardis toodud 1-aastase töökindluse indeksi sihtväärtust (4,2), siis sellisel juhul peaks kandevõime arvutamiseks kasutama osavarutegurit 1,73, omakaalule osavarutegurit 1,05 ja veokitele 1,08.

Kokkuvõte

Käesolevas peatükis tutvustati sildade töökindlust, purunemistõenäosust ja sellega seotud arvutusvalemeid. Kõikidele katsetatud sildadele arvutati purunemistõenäosus olukorras, kus sillad on pidevalt kasutuses kahe kõrvuti asetseva 52 t raskeveoki poolt.

Arvutuste ja analüüsi tulemusena võib väita, et lühema perioodi jooksul ei ole sildade purunemistõenäosus suur, kuid pikema perioodi jooksul tuleb vajaliku purunemiskindluse tagamiseks sildu remontima hakata.

Selleks, et sildade töökindlust ja purunemistõenäosust täpsemalt uurida, on esmalt vaja selgeks teha Eestis esinevad liikluskoormused ja koormusjaotused. Seejärel saab hakata teostama igale üksikule sillale detailsemat töökindluse analüüsi, muutes seeläbi otsuste tegemise veelgi ratsionaalsemaks.