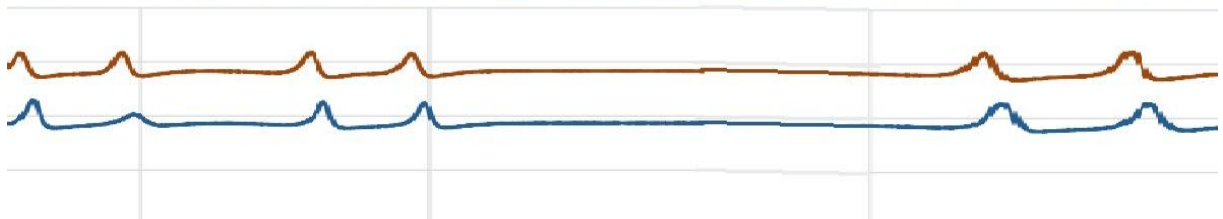


Raskeveokite mõju teekatendile

ARUANNE



Tallinn 2018



Raskeveokite mõju teekatendile

Tellija:

Maanteeamet

Aadress: Teelise 4, 10916 Tallinn

Kontaktisik: Marek Kask (e-mail: marek.kask@mnt.ee)

Teostaja:

Tallinna Tehnikakõrgkool

Aadress: Pärnu mnt 62, 10135 Tallinn

Kontaktisik: Mattias Olep (mattias@tktk.ee)

Töö teostajad: Mattias Olep (Tallinna Tehnikakõrgkool), Kaarel Grünberg (GIB)

Konsultandid: Martti Kiisa, Sven Sillamäe, (Tallinna Tehnikakõrgkool),

Antti Akkanen ja Prof. Pauli Kolisoja (Tampere Tehnikaülikool)

Töö teostamisel aitasid kaasa: Tiit Plakk (Adek OÜ), Reino Poom (AA-SAT OÜ)

© Maanteeamet, 2018

Töö tellija on Maanteeamet, kuid töö tulemus ei pea olema kooskõlas Maanteeameti seisukohaga ega väljenda Maanteeameti poolt heakskiidetud arvamusi. Vastutus antud dokumendis toodud informatsiooni ja esitatud arvamuste eest lasub täies mahus töö teostajal. Tööd võib vabalt tervikuna tasuta kasutamiseks välja anda või tsiteerida allikale viidates.

SISUKORD

SISSEJUHATUS	4
1.1 Teadustöö eesmärk.....	4
1.2 Lähteandmed	4
1.3 Valitud katselõik.....	5
2 Raskeveokite mõju teekatendile ja varasemad kogemused.....	11
2.1 Raskeveokite koormuspiirangud aastatel 2009-2018	11
2.2 Raskeveokite koormuse kasvu varasemad uuringud	12
2.3 Pinnatud kruusateede lagunemine raskeveokite koormuse tõttu.....	12
3 katsemetoodika lähteandmed.....	14
3.1 Nõuded anduritele.....	14
3.2 Andurite paigaldamine objektile ja testimine.....	15
3.3 Mõõtepunktide ettevalmistus.....	17
3.4 Katses kasutatavad etalonveokid	19
4 Teostatud katsed	19
4.1 Tee koormamine veokitega	21
4.2 Erinevate andurite kasutamine katsepäevadel	23
5 Tulemuste analüüs	26
5.1 Veoki liikumiskiiruse mõju teekatendile.....	26
5.2 Veoki kaalu ning paarisrattaste ja üksikrehvide mõju teekatendile.....	31
5.3 Tee eluiga ja raskemad veokid	39
5.4 40t, 52t ja 60tveoki mõju võrdlus	40
5.5 Raskeveokite ülesõidu mõju muldematerjali dielektrilisusele	44
5.6 Raskeveokite mõju monitooring üleriigilise võrguna ja soovituslik mõõtmis- ja jälgimismetoodika teede konstruktsioonide deformatsioonide monitoorimiseks.	45
5.7 Praktilised tähelepanekud mõõtmistest ning mõõtepunktide rajamisest.....	47
5.8 TTY ja Soome maanteeameti esindaja poolsed kommentaarid.....	48
6 Kokkuvõte ja Järeldused	50
7 Summary	52
Viidatud allikad ja kasutatud kirjandus.....	54
Lisade sisukord	55

SISSEJUHATUS

1.1 Teadustöö eesmärk

Käesoleva teadustöö peamiseks eesmärgiks oli mõõta erinevate veokitüüpide ja täismasside mõju teekatenditele ehk püsivate deformatsioonide teket, avaldumist ja arengut katendis.

Teadustöö teiseks eesmärgiks oli analüüsida 52 ja ja 60t täismassiga veoki mõju teedevõrgu säilimisele ja vastupidamisele.

Teadustöö kolmandaks eesmärgiks oli töötada välja mõõtmis- või jälgimismetoodika teede konstruktsioonide deformatsioonide monitoorimiseks, mida saaksid kolmandad osapooled kasutada sarnaste katsetuste korraldamiseks ja teedevõrgu eluea pikendamise meetmete rakendamiseks.

Teadustöö raames rajati 2 uut testimispunkti 15 erineva anduriga (6 erinevat liiki) ja lisati 2 uut andurit olemal percojaamale. Nii rohkete ja erinevate anduritega teede testimispunkte pole varem Eestis rajatud ning vastav kogemus puudus. Lähim eeskugu on Soome, kus sarnased jaamad on välja töötatud aastate jooksul etappide kaupa.

1.2 Lähteandmed

Käesoleva teadustöö tegemisel kasutati järgnevaid lähteandmeid:

1. Maanteeamet 2018 Raskeveokite mõju teekatenditele tehniline kirjeldus
2. Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi 05.06.2009 määrus, millega tõusis kuueteljeliste autorongide lubatud tegelik täismass siseriiklikul veol 40 t - 44 tonnini.
3. Majandus- ja taristuministri 04.09.2015 määrus nr 114 „Eriveo tingimused ning eriveo teostamise ja erilubade väljaandmise kord ning tee omanikule tekitatud kulutuste hüvitamise, eriloa menetlustasu ja eritasu määrad“
4. Majandus- ja kommunikatsiooniministri 13.06.2011 määrus nr 42 „Mootorsõiduki ja selle haagise tehnonõuded ning nõuded varustusele“
5. The ROADEX Project technical co-operation between roads organisations across northern Europe part funded by the EU Northern Periphery Programme

1.3 Valitud katselõik.

Lähteandmete tehnilise kirjelduse osas on toodud ära nõudmised valitud katselõigule lähtudes Teederigistri andmetest:

1)Uuringupunkt 1 peab olema nõrgemapoolse kandevõimega ($E < 180 \text{ MPa}$), FWD vajumikausi järgi peab $BCI > 40$.

2)Uuringupunkt 2 kandevõime peab olema antud tee liikluskoormust arvestades piisav, $E > 200 \text{ MPa}$ ning tee FWD vajumikausi parameetrite alusel heas seisus ($SCI < 200$).

3)Uuringupunktiks 3 kasutada teed, kus on Percostationi mõõtmisjaam juba olemas (Simuna-Vaiatu pilootlõik või T-17 Suursoo).

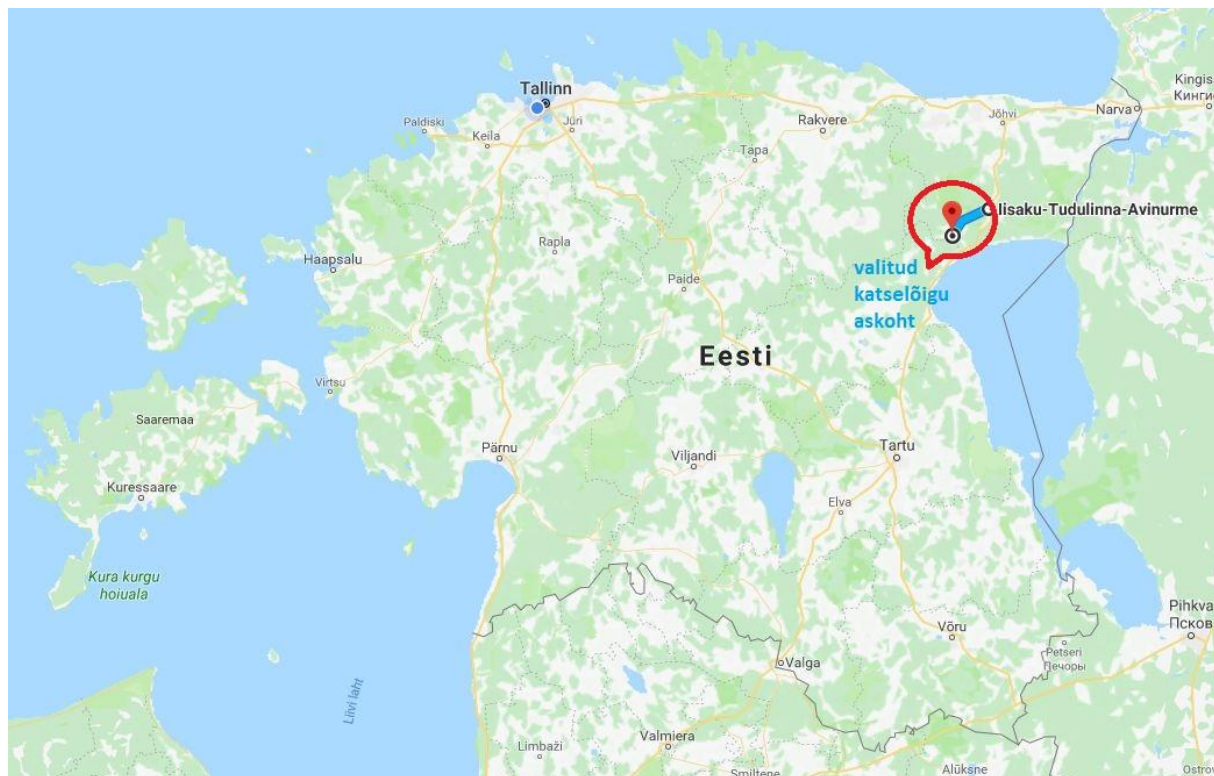
Kuna katselõikude rajamisel on vaja ka asfalteerimist kasutada, siis analüüsiti 2018 aastal Eestis tehtavaid olevate maanteede rekonstrueerimisprojekte:

Rekonstruktsiooni objekt 2018	Maakond	$E < 180 \text{ Mpa}$	$BCI > 40$	$E > 200 \text{ MPa}$	$SCI < 200$	Aja sobivus	Sobivus
Riigitee nr 17 km 44-55	Läänemaa	jah	ei	jah	jah	ei	EI
Ristmik 13114	Jõgevamaa	linnalõik				ei	EI
Riigitee 59 km 5,9-12,1	Pärnumaa	jah	jah	jah	jah	ei	EI
Riigitee nr 6 km 98..	Pärnumaa	jah	ei	jah	jah	ei	EI
Riigitee 35 Iisaku–Tudulinna–Avinurme km 0,8–16,5	Ida-Virumaa	jah	jah	jah	jah	jah	JAH
Kõrvalmaantee km 0- 3	I-Virumaa	jah	ei	jah	jah	ei	EI
Põhimaantee 7	Võrumaa	jah	ei	jah	jah	ei	EI
Riigitee 88 km 33-36,3	L-Virumaa	jah	jah	jah	jah	ei	EI
Tugimaantee 91 km 19–	I-Virumaa	liiga lühike				ei	EI

Tabel 1. Võimalikud katselõigu asukohad

Tabelist selgub, et enamus objektidel oli takistavaks teguriks liiga hea kandevõime või vale asfalteerimise aeg. Seega ei oleks ka teisel maanteelõikudel olnud lihtne leida sobiva tugevusega lõiku. Sobivaks osutus tee nr 35 Iisaku Tudulinna-Avinurme, mille puhul olid kõik

kuus kriteeriumit täidetud. Percostationi mõõtmisjaam on samuti piirkonnas olemas. Lähtudes neist täidetud kriteeriumitest osutus valituks just riigitee nr 35. Lisaks toimub antud teel ka kohalik puiduveokite liiklus, millede ülekoormused ongi 1 põhjusi antud uurimistöö tegemiseks.



Asukohaplaan 1 : Valitud katselõik Riigitee 35 Iisaku–Tudulinna–Avinurme asub Ida Virumaal Peipsi järvest põhja pool.

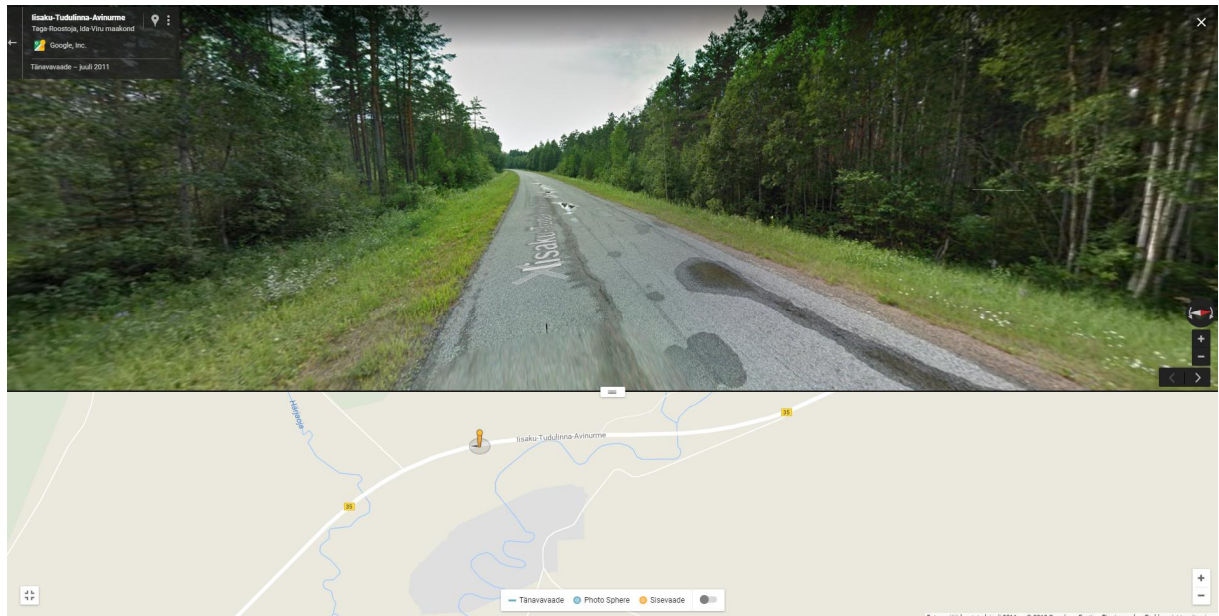
Riigiteel nr 35 on vastavalt 2016 a andmetele viies lõigus nõrga lõigu parameetrid täidetud (kollased read) . Sinisega on tähistatud tugeva lõigu vahemik:

Mnt nr	Km	Emod, MPa nõrk<180 või tugev>200	SCI (tugeva piir alla 200)	BCI (nõrga piir üle 40)
35	7,399	175	353	30
35	7,499	142	420	42
35	7,599	178	309	19
35	7,699	230	166	32
35	7,799	204	224	20
35	11,599	151	451	25
35	11,699	118	512	46
35	11,749	150	449	26
35	11,799	135	463	37
35	11,849	136	418	44
35	11,864	126	567	28
35	12,699	137	431	40
35	12,799	121	462	69
35	12,899	190	202	25
35	12,999	135	379	53
35	13,099	155	335	37

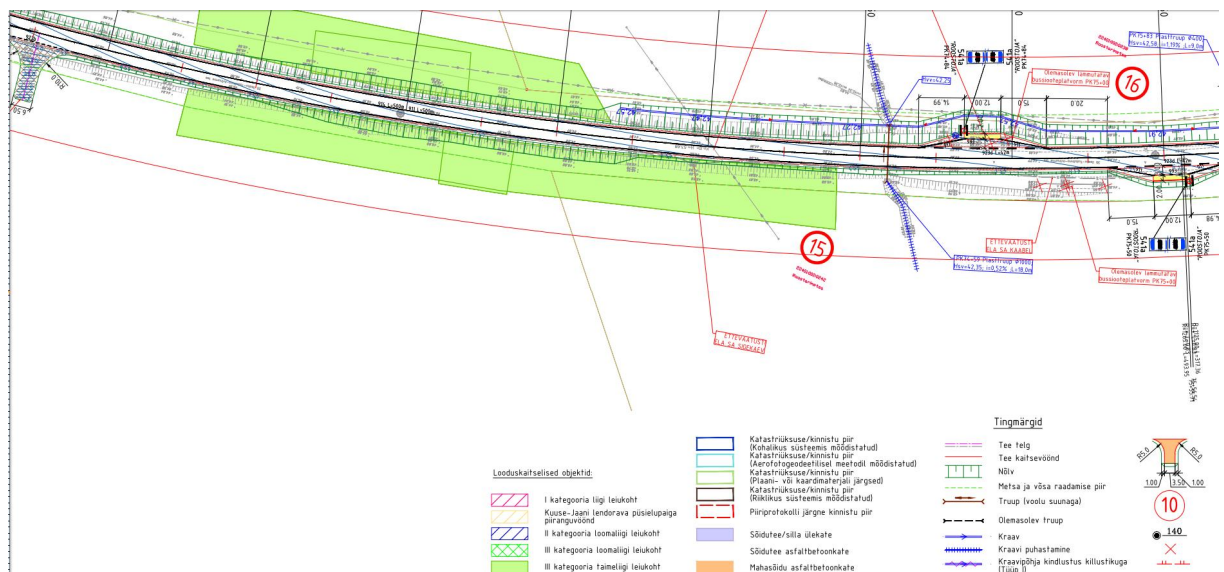
Tabel 2 : T-35 nõrga kandevõimega vahemikud km 7,4-7,6, km 11,6-11,75, km 11,8-11,86, km 12,7-12,85 ja km 12,9 -13,1.

Nõrgad lõigud asuvad tugevamate lõikude keskel, mille parameetrid eeldatavalt vastavad tugevama lõigu kriteeriumitele pärast käimasolevat teemulde rekonstruktsiooni.

Esimene vahemik km 7,4-7,6 asub ojade ristumiskohas, mille lähedal on soine mets. Tee kulgeb looklevate ojade vahel. Piirkonnas on ka 2011 suvel renoveeritud sild.

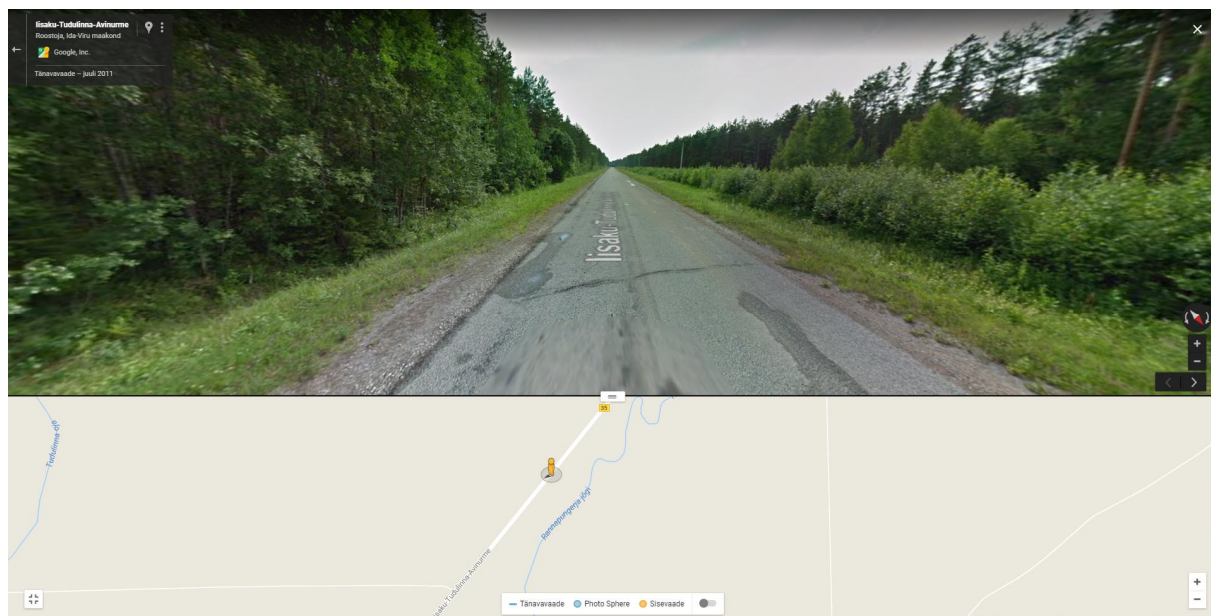


Ekraanitõmmis 1 : T35 km 7,5 piirkond. Näha on vajumeid paremal pool ja pikipragusid soise ala poolsel küljel.

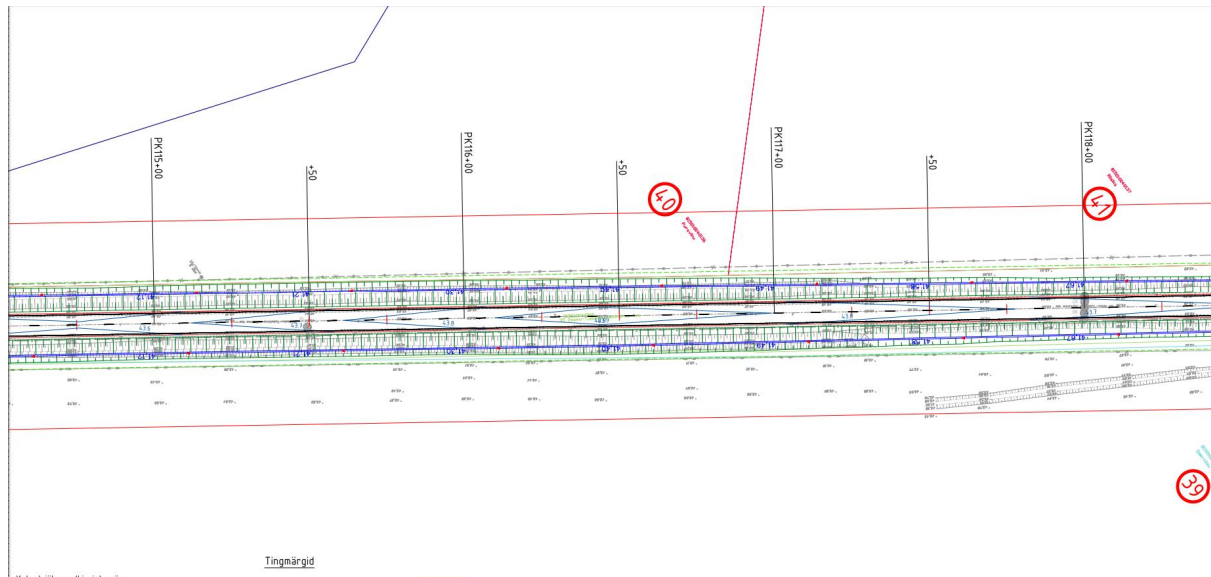


Asendiplaan 1: T35 km 7,5 piirkond. Kraave pole või on madalad. Piirkonnas on III kategooria taim leiukoht. Nõrgeimas piirkonnas PK 75+00 juures on kraav vasemal ja bussipeatus paremal pool.

Teine vahemik km 11,6-11,75 kuni km 11,8-11,86, Piirkonnas jookseb Rannapaungerja jõgi vasakul pool teed ca 50m kaugusel. Ala on liigniiske.

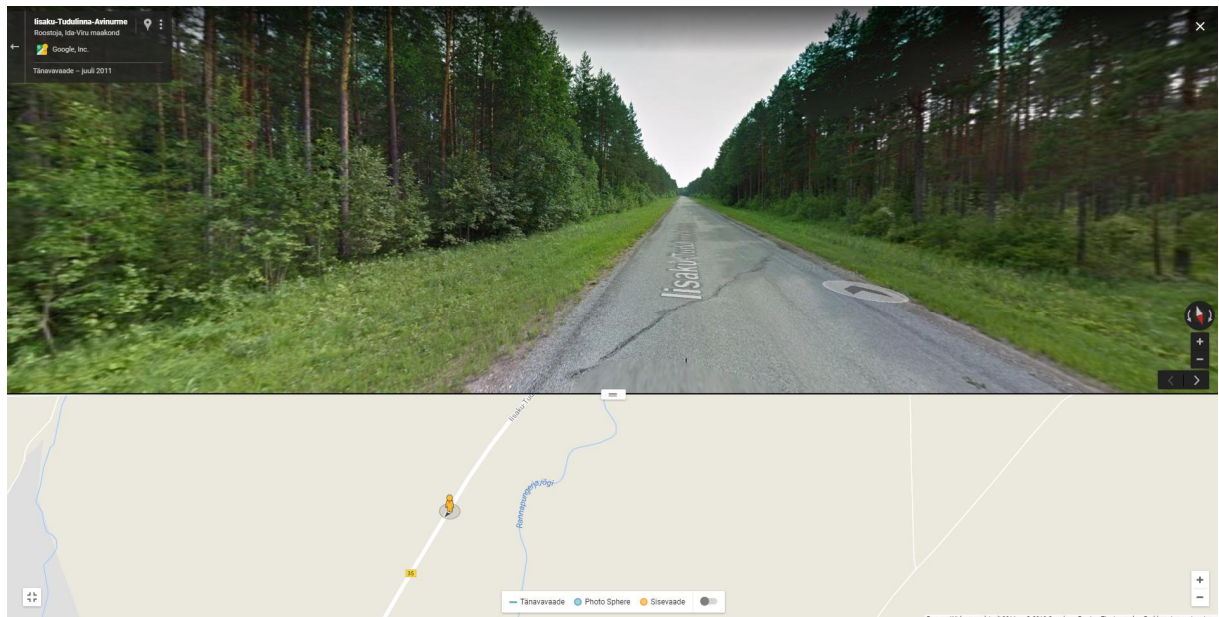


Ekraanitõmmis 2 : T35 km 11,75 piirkond. Näha on põikipragu, madalat mullet ja vesist piirkonda iseloomustavaid taimi paremal pool teed.

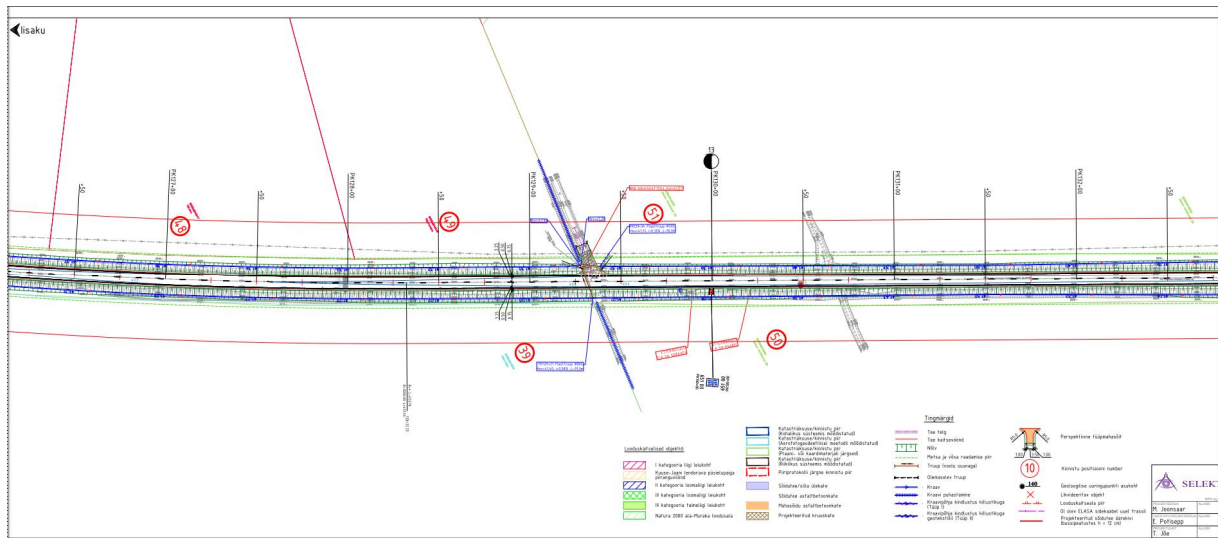


Asendiplaan 2: T35 km11,75 piirkond. Planeeritud kraavid on teekattest keskmiselt 2 meetri sügavused.

Kolmas vahemik km km 12,7-12,85 kuni km 12,9 -13,1.



Ekraanitõmmis 3 : T35 km 12,9 piirkond. Näha on diagonaalpragu ja madalat mullet.



Asendiplaan 2: T35 km 13 piirkond. Planeeritud kraavid on keskmiselt 2,5 meetri sügavused ja ette on nähtud ristuvate kraavide puhastamine. Nõrgimad punktid jäävad kummalegi poole truupi.

PK 75+00 on ettenähtud kraav teiselpool bussipeatust ehk mulle on eriti lai ja teiselpool pole kraavi. Eelnevalt PK 72-75 on kraavideta ala. Aluspinnas on tolmlüüv.

PK 129+00 on ettenähtud kraavid mõlemal pool mullet. PK 128+00 ja 130+00 on kummalgi pool truupi ehk maksimaalse sügavusega kraavid enne sissevoolu truupi. Aluspinnaseks on saviliiv.

Kogu teel on ülemised ca 30cm kihid hea kandevõimega ja alumised kihid on nõrga kandevõimega savikad ning tolmsed kihid. Vesi vähendaks kapillaartõusu tõttu kõikidel lõikudel hooajati kandevõimet, kuid PK 75 puhul muutuks olukord ehituse tõttu kõige vähem.

Kolme nõrga kandevõimega lõigu omadused on esitatud järgnevas tabelis

T-35 vahemikud/ iseloomustvad omadused	Sobilik mõõteseadmete paigaldamiseks	Katendis on nähtavaid kahjustusi	Veereziim püsib ca 10a jooksul sarnane	Läheduses ei ole uut truupi
km 7,4-7,6	JAH	JAH	JAH	JAH
km 11,6- 11,86	JAH	JAH	EI	JAH
km 12,7-13,1	JAH	JAH	EI	EI

Tabel 3. Nõrga kandevõimega lõikude valik. Valituks osutus km 7,4-7,6

Tabelist selgub, et esimesel lõigul muutub olev olukord kõige vähem ja teises ning kolmandas lõigus muutub veereziim oluliselt kuna kraavid saavad ehituse järgselt olema ca 2m sügavused mõõdetuna teepinnalt. Lisaks on oluline et piirkonnas oleks veokitel võimalus ümber keerata testkoormamise ajal ja ka see kriteerium oli esimesel lõigul täidetud. Seega sobilik lõik on km 7,4-7,6.

2 RASKEVEOKITE MÕJU TEEKATENDILE JA VARASEMAD KOGEMUSED

2.1 Raskeveokite koormuspiirangud aastatel 2009-2018

Aastal 2009 allkirjastas majandus- ja kommunikatsiooniminister määruse, millega tõusis kuueteeliste autorongide lubatud tegelik täismass siseriiklikul veol 40 tonnilt 44 tonnini. 44-tonniseid autoronge on lubatud kasutada riigisiselt juhul, kui autorong koosneb vähemalt kolmeteljelisest veokist, kolme ja enama teljega haagisest või poolhaagisest.

Alates aastast 2010 on Maanteeamet aktiivselt tegelenud 52t täismassiga metsaveokite kasutamise temaatikaga. Aastal 2011 paigaldati erinevatesse Eesti piirkondadesse temperatuuri mõõtvaid sensoreid, millega monitoorida teede talviseid külmumissügavusi võimaldamaks 52t eriveoseid juhul, kui teekatend on külmunud vähemalt 0.5 m sügavuselt.

Võimaldamaks lisaks lühikestele talvistele erivedude lubada 52t erivedusid ka aastaringiselt on Maanteeamet koos MKMiga koostanud määruse nr 114 (Majandus- ja taristuministri 04.09.15 määruses nr 114 „Eriveo tingimused ning eriveo teostamise ja erilubade väljaandmise kord ning tee omanikule tekitatud kulutuste hüvitamise, eriloa menetlustasu ja eritasu määrad“), mille järgi peab 52t täismassiga veok koosnema kolme või suurema telgede arvuga vedukist ja nelja või suurema telgede arvuga täishaagisest või 4-teljelisest vedukist ja vähemalt 3-teljelisest

täishaagisest. Lisaks peavad autorongi koosseisus olevate sõidukite kõik teljed, välja arvatud veduki pööratavate ratastega teljed, olema varustatud paarisratastega.

2.2 Raskeveokite koormuse kasvu varasemad uuringud

Erinevad uuringud (näiteks Roadex programm, Tampere Tehnikaülikooli ja Roadscannersi ühisuuringud) on rõhutanud seda, et täismasside tõstmisel on negatiivsed mõjud eriti madalamaklassilistele teedele. Samas ei ole eelmainitud uuringutes kasutusel olnud veokitel olnud paarisrattaid nagu Eestis on nõutud ning lubatud telejkoormused on samuti Eestis lubatavatest meist suuremad. Rehvide valikust on kasutusel üksikrehvid ehk supersingle tüüpi rehvid, paarisrattad ja lisaks uuemat tüüpi väga laiad (laius üle 490mm ehk ca paarisrataste summeeritud laius) üksikrehvid. Kõige kitsamad ja suurima ühikkoormusega on vanad üksikrehvid. Varasemalt on vastavaid uuringud tehtud ka Nõukugede Liidus (Sojusdornii 1990a Üksik ja Paarisratta mõju konstruktsioonile). Hilisemalt on Soome Venemaa koostöös tehtud 2011 ja 2012 aasta töö Оценка влияния тяжелых грузовых автоперевозок на дорожные конструкции, kus uuriti GPR (maaradari) ja FWD (langeva raskuse aparaadiga) 72t ja 90t veokite mõju teekatendile polaarpiirkonnas. Selle töö kliimaatline piirkond, kasutatud veokiraskused ja ka uurimisvahendid ei haaku Eesti oludega. EU raames on analoogset teemat käsitletud töös CEDR Task Group N4 (Heavy Vehicles) as appendices of CEDR Report 2017/05 – Conditions for efficient road transport in Europe. Eestis ei ole siiani tehtud vastavasisulisi mõõtmisi ega mõjude hindamisi teekonstruktsioonidele, mistõttu ei ole selget vastust sellele, kuidas täismasside tõstmine viimaseid mõjutab. Täismassi saab tõsta lisades koormust jaotavaid telgi või siis säilitades telgede arvu ja tõstes teljekoormusi.

Rootsis on pööratud tähelepanu suurema massiga veokite suuremale liiklusohhtlikkusele, kuid mõju teekatendile alles uuritakse.

2.3 Pinnatud kruusateede lagunemine raskeveokite koormuse tõttu

Täismasside tõstmine võib mõjutada enim madalaklassilisi teid, mis Eestis on enamasti pinnatud ülekattega teed. Pinnatud kruusateede liiga madalad kandevõimed põhjustavad kattekihi lagunemist, mille parandamine on kulukas. Tee püsimist mõjutavad ka katendikihtide ebaühtlus, halvasti toimiv drenaaž, mõne kihi materjali sobimatu terakoostis, milles (eriti kevadisel ajal) tekivad koormates plastsed deformatsioonid. Tüüpilised vigastused on võrkpragunemine ja roopad.

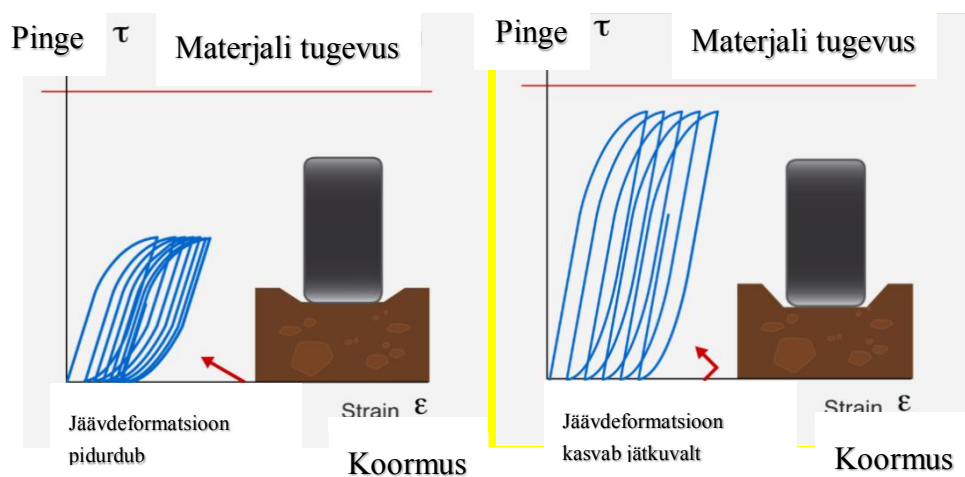
Raskeveokite poolt põhjustatud kõige nähtavamaks defektiks on pikiroopad (püsivad deformatsioonid, joonis 1) ja kitsastel teedel tihti tee serva deformatsioonid (ebaühtlased vajumised, joonis 2). Nimetatud defektid mõjutavad sõidumugavust ja –turvalisust. Roopas seisev vesi põhjustada vesiliugu, tekitada tee põiklõikes eri haardeteguriga tsoone ning ära vajunud teeääred soodustavad veokite ümberpaiskumist, mistõttu tuleb need kõrvaldada.



Joonised 1 ja 2. Raskeliikluse tagajärg teedevõrgule on püsivad deformatsioonid – pikiroopad ja serva deformatsioonid, mis suurendavad liiklusõnnetuste ohtu ja põhjustavad suurendatud kulutusi nii liiklejatele kui tee omanikele.

Püsivaid deformatsioone tekitavad koormuse tagajärjel plastsed deformatsioonid, kuna katendimaterjalid ei ole kunagi täielikult elastsed. Kui teekatend on piisavalt tugev ehk koormuse poolt põhjustatav normaalpinge sideainega sidumata kihtidele on madal, jäävad ka püsivad deformatsioonid väikesteks. Protsessi on kujutatud joonisel 3, kus koormuse poolt põhjustatud normaalpinge on suhtena teekatendis olevate materjalide maksimaalsesse tugevusse madal, mistõttu püsiva deformatsiooni arenemine aeglustub peale järeltihenemist.

Kui koormust suurendatakse, kasvab ka normaalpinge, mille suurus võib tõusta lähedale teekatendis olevate materjalide tugevuspiirile. Sellisel juhul kasvab plastse ehk püsiva deformatsiooni osakaal (joonis 4). Teekatendid ja seal olevad materjalid töötavad väsimuskindlusele ehk materjalide omadused aja jooksul nõrgenevad ning teed vajavad taastusremonti. Katendi eluiga on seda pikem, mida madalamana hoitakse normaalpinget, mistõttu viib veokite täismasside tõstmine progressiivselt kiireneva väsimiseni.



Joonised 3 ja 4. Püsivate deformatsioonide kasv aeglustub peale järeltihenemist, kui normaalpinge on suhtena materjalide tugevusele madal ja vastupidi.

Teine oluline komponent teekatendite kandevõime ja eluea juures on materjalide veesisaldus. Raskeveoki ülesõit põhjustab eriti madalamaklassilistel teedel pooriveerõhu tõusu pinnases ja seeläbi efektiivpinge vähenemise ehk teekonstruktsiooni nõrgenemise, mis viib püsivate deformatsioonideni. Eriti kriitiliselt avaldub see järjepideva dünaamilise koormamise

tagajärjel, näiteks mitme järjestikuse väikese pikivahega raskeveoki ülesõidul. Sellisel juhul ei jää koormamiste vahele piisavalt aega, et pooriveerõhk saaks langeda. Üheks võimaluseks pikendada teekatendite eluiga on limiteerida järjestiku sõitvate raskeveokite hulka või reguleerida nende vahele jäävat minimaalset aega. Paremini kontrollitav positiivne meede on suurendada veokite telgede arvu ja rehvide laiusi.

3 KATSEMETOODIKA LÄHTEANDMED

3.1 Nõuded anduritele

Raskeveokite mõju mõõtmiseks kasutada teekatendite sisse paigaldatud andureid, mis võimaldavad registreerida vajumid, pinge jaotuse ja taastusaja avaldunud koormusest.

Anduritele esitatakse vastavalt lähteülesandele järgnevad nõuded:

- 1) Uuringupunktis 1 ja 2 paigaldada teekonstruktsiooni sisse minimaalselt kolme anduriga kiiret andmekogumist võimaldav percojaam (dielektrilise väärtuse mõõtmiseks, millega hinnata teekonstruktsiooni täielikku taastumist koormusest), teekatte pinda kaks vajumisandurit, mis on ankurdatud tugevasse pinnasesse (võimaldamaks mõõta kogu konstruktsiooni vajumist ja jääva deformatsiooni suurust) ja kümme kiirendusandurit (mõõtmaks tee läbivajumit risti tee teljega – jäid tulevase mössi kihi paigaldamise tõttu 2018 paigaldamata), kaks vajumisandurit (killustik)alusesse (mõõtmaks aluse deformeermist) ning kahte eri sügavusse kokku neli (2+2) pingeandurit (mõõtmaks koormuse jaotumist). Kui uuringupunktis on tee katteks asfaltbetoon, siis paigaldada ka neli asfaltkatte alakihi tõmbeandurit (mõõtmaks asfaltkatte alapinna venivust; kaks risti- ja kaks pikisuunas)
- 2) Uuringupunkti 1 ja 2 andurite paigaldamiseks tuleb teekatend avada ja peale paigaldust täielikult taastada. Kui uuringupunkti tee katteks on asfaltbetoon, tuleb koht uuesti asfalteerida.
- 3) Uuringupunkti 3 paigaldada teekatte pinda kaks vajumisandurit, mis on ankurdatud tugevasse pinnasesse ja tee teljega risti kümme kiirendusandurit (hilisemalt paigaldatava mössi tõttu ei saanud kiirendusandureid 2018 paigaldada). Olemasolevate percoandurite lugemid tuleb registreerida kiire andmekogumise režiimis.
- 4) Andurite täpsed paigalduskohad ja -sügavused sõltuvad uuringupunktist ning selguvad peale punktide eeluuringuid läbi ehitusgeoloogilise puurimise, FWD-mõõtmise ja maaradari.
- 5) Lisaks tee sisse paigaldatavatele anduritele on vaja määrata katseveokite asukoht teel. Selleks kasutada nii laser-kaugusmõõtjaid kui videoülesvõtet nii, et teekattele on värvitud ruudustik
- 6) Kõikides uuringupunktides teha konstruktsiooni seisukorrauuringud: mõõta kandevõime FWD-seadmega, määrata kihipaksused ja materjalide olemused. Maaradariga tuleb määrata kihipaksused ka risti tee teljega.

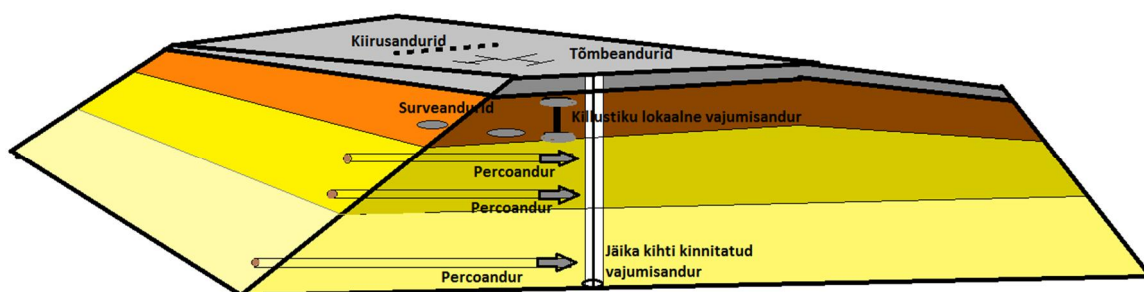
Antud juhul on mulde materjalid väga suure täpsusega surfimise ja geoloogiliste uuringutega määratud ning maaradar ei andnud lisaväärtust kihtide paiknemise kohta.

3.2 Andurite paigaldamine objektile ja testimine

Andureid paigaldati T-35 toimuvate ehitustööde graafikuga kooskõlas ning sobivaks ajavahemikuks said juuli kuni august 2018. Nõrga kandevõimega lõikude valikul osutus valituks km 7,5 ja tugevama kandevõimega km 2.1.

Andureid paigaldati järgnevalt erinevatesse sügavustesse vastavalt nende otstarbele:

- percoandurid – asfaltkattest 110, 80 ja 50 cm sügavusele, välimise sõidujälje alla;
- surve ehk pingeandurid – ülemised kaks paigaldati killustikaluse alla (katend andurite peal on 30 cm killustikku, 6 cm asfaltkatet + möss ja alumised kaks sellest 20 cm sügavamale ratta jälje alla (arvestatud on, et auto välimine ratas liigub 1 m kaugusel asfaltkatte servast) ja sellest 30 cm peenra poole;
- killustikaluse deformatsiooniandurid ehk vajumisandurid, mis mõõdavad kihi suhtelist deformatsiooni (ing. *strain*), ratta jälje alla ja sellest 15 cm peenra poole;
- Vajumisandurid teekatte pinnal: Iisaku poolne, on 8.5 m metallvarda otsas (toetub kaljupinnasele) ja Tudulinna poolne, on ca 2.5 m metallvarda otsas (toetub tugevamale vahekihile).
- asfaltkatte tõmbeandurid (ing. *strain*) nii risti- kui piki teed. Kaks andurit paigaldati risti sõidusuunaga nii, et üks tuli ratta jälje alla ja teise sellest 15 cm kaugusele ning kaks andurit paigaldati piki teed sama põhimõtte alusel.



Joonis 9. Andurite asetsemise skemaatiline joonis.

Andurid testiti enne paigaldamist veendumaks nende töökindluses. Testide tulemusel selgus, et kõik andurid olid töökorras enne paigaldamist. Kontrolliti üle ühenduskohad ja tugevdati vajadusel kaablikaitset.

Juulis alustati paigaldamist percoanduritest, mida tuli rammida tihedasse tsementeerunud liiva ja ülemisse kruusa kihti. Selle hõlbustamiseks puuriti ette pilootaugud.



Joonis 10. Percoandur ja selle paigaldus (km 7.5)

Augustis paigaldati ka surve-, deformatsiooni- ja tõmbeandurid (joonised 11...13).



Joonis 11. Surveandurite paigaldus ja nende asukoha fikseerimine.



Joonis 12. Deformatsiooniandurite paigaldus killustikalusesse.



Joonis 13. Tõmbeandurite paigaldus asfaltkatte alla.

Vaiatu percode paigaldusinfo septembris 2014 aastal:

Ch0 18 cm Kuiv kruus; ülemise stabi kihi all

Ch1 68 cm Kuiv kruus

Ch2 117cm Mõõdukalt niiske alumine stabikiht, väga tugev

Ch3 22 cm Kuiv kruus; ülemise stabi kihi all

Ch4 74 cm Kuiv mustjas kruus, huumusesisaldusega

Ch5 140...145 cm Vesiküllastunud, kergemini läbitav stabiliseeritud materjal

3.3 Mõõtepunktide ettevalmistus

Enne mõõtmisi tuli ettevalmistada objektil kohad, kus saab arvutiga töötada umbes 8 tundi järjest olenemata tuulest ja vihmast.



Joonis 14. T35 PK75 tööpunkt.

Mõõtepunktide kõrval, kuhu pidi tulema tööpunkt oli PK 75+00 tasane maapind, PK 21+00 nelja meetri sügavune kraav ja Vaiatu vanas mõõtepunktis samuti sügav kraav.

Viimase kahe puhul ehitati kraavi peale platvorm, kuhu sai paigutada laua, tooli ja vajadusel ka telgi.



Joonis 15. T35 PK 21 tööpunkt



Joonis 15. Simuna Vaiatu tööpunkt. Fotolt on näha, et asukoht on kurvi peal.

3.4 Katses kasutatavad etalonveokid

Katselõikusid koormati järgnevate etalonveokitega vastavalt lähteülesandele:

- 7) Etalonveokiks kasutada tegeliku massiga $44 \pm 0,1t$, 6-teljelist (3+3) liigendsõidukit, mis koosneb kolmeteljelisest mootorsõidukist ja kolmeteljelisest poolhaagisest, mis on varustatud üksikrehvidega. Lähtuda Majandus- ja kommunikatsiooniministri määrusest nr 42 (Majandus- ja kommunikatsiooniministri 13.06.2011 määrus nr 42 „Mootorsõiduki ja selle haagise tehnonõuded ning nõuded varustusele“ Lisa 1, tabel 30: <https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1090/6201/7005/MKM42lisa1.pdf#>).
- 8) Teiseks kasutada tegeliku massiga $52 \pm 0,1t$, 7-teljelist autorongi (teljed kas 3+4 või 4+3, pikkus 18,75 m, joonis 6), mille koosseisus olevate sõidukite kõik teljed, välja arvatud veduki pööratavate ratastega teljed, on varustatud paarisratastega. Lähtuda Majandus- ja taristuministri määrusest nr 114 (Majandus- ja taristuministri 04.09.15 määruses nr 114 „Eriveo tingimused ning eriveo teostamise ja erilubade väljaandmise kord ning tee omanikule tekitatud kulutuste hüvitamise, eriloa menetlustasu ja eritasu määrad“).
- 9) Kolmandaks kasutada tegeliku massiga $60 \pm 0,1t$, 7-teljelist autorongi (ülekoormatud, teljed kas 3+4 või 4+3, pikkus 18,75 m, joonis 7), mille koosseisus olevate sõidukite kõik teljed, välja arvatud veduki pööratavate ratastega teljed, on varustatud paarisratastega.
- 10) Neljandaks kasutada tegeliku massiga $40 \pm 0,1t$, 5-teljelist (2+3) liigendsõidukit, mis koosneb kaheteljelisest mootorsõidukist ja kolmeteljelisest poolhaagisest, mis on varustatud üksikrehvidega. Lähtuda Majandus- ja kommunikatsiooniministri määrusest nr 42. (Majandus- ja kommunikatsiooniministri 13.06.2011 määrus nr 42 „Mootorsõiduki ja selle haagise tehnonõuded ning nõuded varustusele“ Lisa 1, tabel 30: <https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1090/6201/7005/MKM42lisa1.pdf#>)

4 TEOSTATUD KATSED

10, 11 ja 12 oktoobril viidi läbi etalonveokitega katsepunktide koormamine riigitee T35 km 2,1, km 7,5 ja Simuna Vaiatu juba olevas Percojaamas. Eelnevalt teostati Eestis oleva logeri ja tarkvara testimine km 7,5. Vaiatu nn vana logger saabus vahetult katsepäeva eelsel õhtul Eestisse, kuna logger oli Soomes kasutusel. Esimese päeva hommikul toimusid Tudulinna asfalteeritud parklas veokite kontrollkaalumised.

Esimesel kahel päeval viidi läbi katsed T35 kahes mõõtepunktis ja kolmandal Simuna Vaiatu mõõtepunktis. T35 mõõtepunktid olid valitud selliselt, et tee oleks sirge ja veoki kaal ei oleks viraaži tõttu rohkem ühel teljel. Vaiatu mõõtepunkt oli juba 2014 rajatud ning seal on mõõtepunkt kurvi peal. Selle tõttu ei saanud seal ka maksimaalse kiirusega 90 km tunnis katset teostada, kuna kurvis tekkis suurel kiirusel veokite külili vajumise oht.



Joonis 16. Katsekohtade detailsem kaart Ida-Viru maakonnas.

Ilm oli mõõtepäevadel kuiv ja õhutemperatuur +10..14C. Kuna T35 lõpetati teetöid, siis liiklus mõõtepäevadel oli minimaalne. Veokid tegid ümberkeeramiseks ca 25 km ringi, kuna suuremad veokid vajasisid suuri ümberkeeramise raadiusi.

4.1 Tee koormamine veokitega

Veokite kiirused olid T35 peal 30km/h, 50km/h ja 90km/h ja Simunas kurvi tõttu 30km/h ja 50km/h. Teekatendit koormati järgmise skeemi alusel:

1. 40t etalonveoki ülesõit, 4x erineva kiirusega. Enne järgmist ülesõitu peab teekatend olema esialgsest koormusest taastunud.



Joonis 17. 40t etalonveoki möödumine ja T35 km 7,5 mõõtepunkt töö.

2. 44t veoki ülesõit, 4x erineva kiirusega. Enne järgmist ülesõitu peab teekatend olema esialgsest koormusest taastunud.



Joonis 18. 44t etalonveoki möödumine

3. 52t veoki ülesõit, 4x erineva kiirusega. Enne järgmist ülesõitu peab teekatend olema esialgsest koormusest taastunud.



Joonis 19. 52t etalonveoki möödumine

4. 60t veoki ülesõit, 4x erineva kiirusega. Enne järgmist ülesõitu peab teekatend olema esialgsest koormusest taastunud.



Joonis 20. 60t etalonveoki möödumine

5. Neljas sõit on veokite ülesõit kolonnis 90km/h.



Joonis 21. Kolonni möödumine

4.2 Erinevate andurite kasutamine katsepäevadel

Erinevate andurite töökindlust kontrolliti eelnevalt laboris ja üksikult objektil paigalduse käigus. Korraga polnud varem kõiki andureid proovitud tööle panna, kuna viimased andurid sai paigaldatud vahetult enne katsete algust. Katse käigus näeb arvutite ekraanilt, kas signaal on või ei ole ning korraga jooksevad ekraanil ca 15 anduri signaalid. Hilisema analüüsi käigus selgus, kas mõõtetulemused olid realistlikud.



Joonis 22. Teekattele oli märgitud välimise ratta soovitatav trajektoor ning ruudilippudega oli tähistatud vajumisandurite asukohad. Statiivil on laser ja lähenemas 6 teljeline 44 tonnine veok.

1. Laser

Laser oli paigaldatud statiivi peale ja mõõtis kaugust tee peenrast. Kui veok mööda sõitis siis kaugus vähenes maksimaalselt 10 meetrit ca 4 meetri peale ja hiljem oli andmetest võimalik veoki möödumist registreerida sekundituhandik väärtusega. Kuna andurid tegid tuhandeid mõõtmisi sekundis, siis täpsete ajavahemike välja valimine oli väga oluline algse info filtreerimisel. Laser kalibreeriti Tampere Tehnilises Ülikoolis ning töös tõrkeid ei esinenud.

Hiljem selgus, et laseri tugev signaal võib häirida teisi nõrgema signaaliga andureid. Varasemates Soomes tehtud katsetes ei ole sellist häiret tekkinud, kuid antud katsepunktides oli ka väga palju kaableid paralleelselt, mis võisid teineteist segama hakata.

2. Kaamera

Kaamera oli valitud suure eraldusvõimega ja paigaldatud nii, et oleks näha kellaeg arvuti ekraanil, mööduv veok kui ka võimalusel teekatte pind. Teekatte pinda ei saanud filmida, kui mõõteplatvorm oli ehitatud kraavi kohale ehk teepinnast oluliselt madalamale.



Joonis 23. Kaamera asus telgi sees mõõtekapi küljes, fotol punase ringi sees telgi keskosas.

3. Percoandurid

Perco andurid töötasid eraldi loggerilt ning mõõtetihedus oli ca 10 korda väiksem kui teistel anduritel, kuigi tegu oli uut tüüpi kiirete anduritega. Eraldi logger tähendas ka eraldi tarkvara ja et eri loggerite andurid oleks omavahel ajaliselt sünkroonis, tuli

tarkvara käima panna samas arvutis paralleelselt teiste andurite koondtarkvaraga. Andurid olid vastavalt lähteülesandele paigaldatud 3 eri sügavusse 110, 80 ja 50 cm sügavusele. Andurite tootja hinnangul, kes viibis ka katsete juures ja aitas hiljemalt tulemusi tõlgendada, ei anna andurid häid tulemusi sügavamates kihtides. Percoandurite tulemused registreeriti T35 mõlemas punktis ja Simuna Vaiatu mõõtepunktis tekkis mõõteandmete lugemisel tõrge, kuid kuna antud punktis on varasemad mõõtmised kestnud kokku üle aasta (1.09.2014-1.12.2015), siis sai neid tulemusi võrrelda teiste antud punktis mõõdetud andurite tulemustega. Vaiatu jaamas on vana tüüpi ehk aeglaselt ehk suure ajalise sammuga mõõtvad andurid.

4. Surve- ehk pingeandurid

Surveandureid oli T35 mõlemas mõõtepunktis 4. Ülemised kaks on killustikaluse all ja alumised kaks sellest 20 cm sügavamal. Ühed mõlemas sügavuses on ratta jälje all teised 30 cm peenra poole. Andurid töötasid hästi ja ka hilisemas analüüsis selgus, et tulemused on loetavad.

5. Killustikukihi vajumisandurid

Killustikaluse deformatsiooniandurid ehk vajumisandurid, mis mõõdavad kihi suhtelist deformatsiooni, ratta jälje all ja sellest 15 cm peenra poole. Need andurid paigaldati T-35 mõlemasse punkti.

6. Sügavad vajumisandurid

Sügavad vajumisandurid on T35 mõõtepunktides ankurdatud 2,5 m sügavusse ja 8, 5m sügavusse, et mõõta mulde enda vajumit ja koguvajumit. Vaiatu vana Percojaama lähedale on mõlemad vajumisandurid paigaldatud 8 m sügavusele, kuna mulde alusesse turbasse ei saanud mulde enda vajumit mõõtvat andurid ankurdada. Pärast esimest mõõtmispäeva selgus (PK75), et nii killustiku kui ka sügavate vajumisandurite signaal on häiritud mingi teise anduri juhtme signaalist. Järgmises katsepunktis otsustati loobuda laserist, kuna laser kasutab kõige tugevamat voolu. Järgnevatel katsepäevadel mõõdetud vajumisandurite tulemused, kus laserist loobuti, olid ilma moonutuseta.

7. Asfaldiandurid

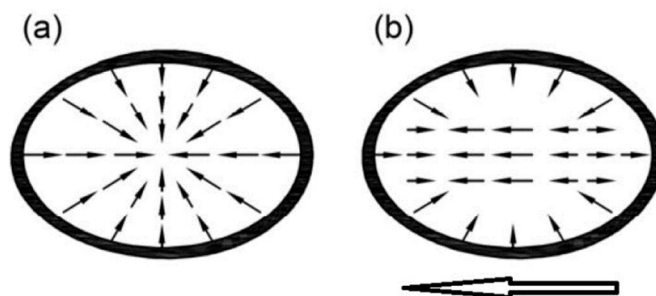
Asfaldi andurid olid T35 mõlemas punktis ja paiknesid teekatte pinna all ja mõõtsid asfaldikihi kokkusurumist või venimist horisontaalsuunas. Visuaalselt on nende asukohta objektil raske märgata. Kuna andurid on nii sõidusuunas kui ka risti sõidusuunaga, siis neile mõjuvad erinevad jõud. Seda oli ka näha hilisema analüüsi käigus, kus selgus, et osad andurid suruti kokku ja osad tõmmati laiali vastavalt nende asukohale ülesõitva ratta suhtes.

5 TULEMUSTE ANALÜÜS

5.1 Veoki liikumiskiiruse mõju teekatendile

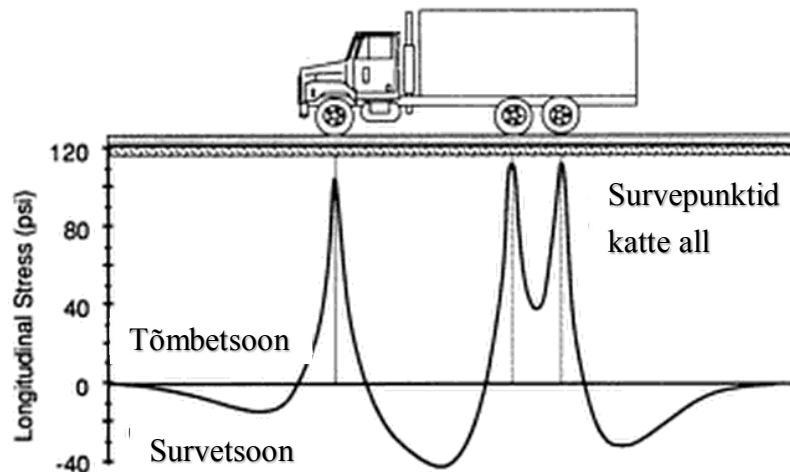
Katsetes teostati anduritest ülesõite kolmes eri punktis ja T35'l kolmel ning Simuna Vaiatus kahel eri kiirusel. Kiirusteks olid 30km/h, 50km/h ja 90km/h. 90km/h ülesõidud toimusid kord pausidega ja kord kolonnis. Simuna Vaiatu lõik asus kurvi peal ja turvalisuse kaalutlustel tehti seal kolonnisõit kiirusega 50km/h.

Koormus jaguneb dünaamiliseks ja staatiliseks koormuseks. Liikuv objekt tekitab dünaamilist koormust ning enamasti taluvad erinevad mulded paremini lühiajalist ehk dünaamilist koormust ja näiteks sillad pigem staatilist koormust. Dünaamiline koormus mõjub konstruktsiooni punktile löögina, mille energia hajub alumistesse kihtidesse. Pealmises kihis on löögi jõud kõige enam kontsentreeritud ja selle tõttu peab olema tee pealne kiht kõige tugevam. Liiga jäik kiht puruneb löökide ja temperatuuri paisumiste tõttu. Asfalt on elastoplastne ja talub soojuspaisumist kui ka lööke. Löögi järgseks tee kuju taastumiseks peaks olema elastoplastsel kihil vajalik minimaalne taastumisaeg. Erinevate uurimistöödest on maksimaalseks taastumiseajaks loetud 30 sekundit. Samuti muutuvad rehvidele mõjuvad jõud liikuva rehvi korral erinevalt seisva rehvi võrreldes:



Joonis 24: a) seisev rehvi ja b) liikuv, liikumissuund on joonise all märgitud noolega (Tielking & Roberts 1987). Horisontaalsed jõud moodustavad liikaval rehvil u 15% vertikaaljõududest

Teemulle koosneb enamasti pealmisest elastoplastest kihist ehk asfaldist ning alumistest puistematerjalidest, mis peaksid teoorias olema juba tihendatud ehituse käigus. Seega tekib ülesõidu löögist tekkinud vajumikauss just ülemistesse kihtidesse ning alumised kihid on vähem mõjutatud üksikutest ülesõitudest.



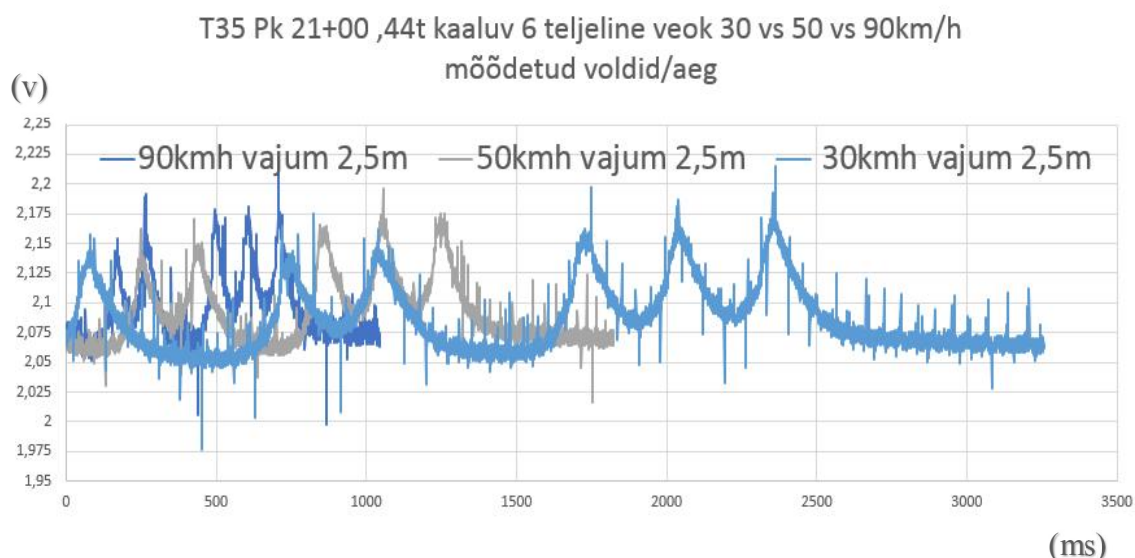
Joonis 25. Surve ja tõmbetsoonid betoonkattes veoki ülesõidul (Thomas D. Gillespie 1993). Asfaltkattega teel on põhimõtte sama, kuid graafikud laugemad.

Veoki ülesõidu kiirus mõjutab kogu veoki poolt tekitatava koormuse kestust, kui ka telgede ülesõitude vahele jääva asfaldi taastumisaja kestust. Enamasti jääb telgede vaheline aeg alati liiga lühikeseks, et vajumiskauss jõuaks taastuda ühe veoki eri telgede ülesõidu vahel.

Veokite ülesõidul oli kõige suurem mõju anduritele, mis asetsesid kõige lähemal teepinnale ehk koormuse kontaktpinnale. Kõige lähemal teekatte pinnale asetsesid asfaldiandurid ja sügavate vajumisandurite pealmised osad, mis olid 10-30 mm sügavusel. Killustiku vajumisandurid ja surveandurid asetsesid 300-500 mm sügavusel ning percoandurid veel sügavamal.

Paljudest võimalikest erineva veokite võrdlusest valiti välja T35 PK21, kui kõige rohkemate selgete loetavate andmetega mõõtepunkt, kus vaadeldavaks veokiks valiti 6 teljega üksikrehvidega tüüpiline 44t kaaluv veok.

Teepinnale lähedal olevate andurite tulemuste võrdlusest, kus kasutati sama 44t veoki ülesõidust kogutud andmeid korraga ühel graafikul on näha eelkõige teekatte koormamise ajalise kestuse erinevus.



Joonis 26. Vajumianduri graafikud sama veoki ülesõidul 3 eri kiirusel.

44t veok kiirus/ telg	1 telje vajum (V)	2 telje vajum (V)	3 telje vajum (V)	4 telje vajum (V)	5 telje vajum (V)	6 telje vajum (V)	Keskmine	Erinevus	Max (V)
30 km/h	2,22	2,18	2,2	2,16	2,16	2,16	2,18	0,38%	2,22
50km/h	2,17	2,2	2,17	2,17	2,16	2,16	2,17	0,00%	2,2
90km/h	2,21	2,17	2,18	2,2	2,15	2,15	2,18	0,23%	2,21

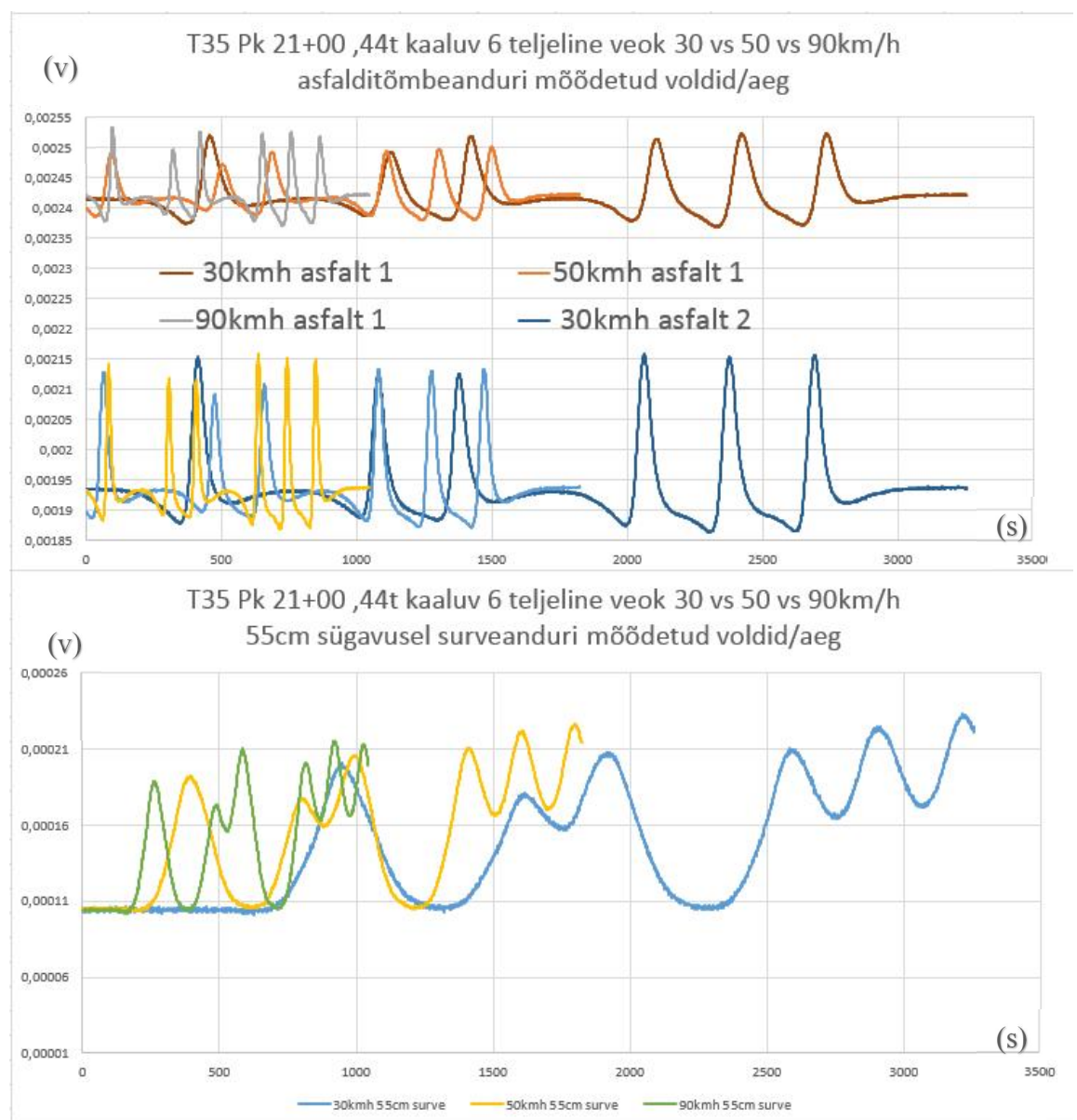
Tabel 4 . Vajumianduri registreeritud väärtused sama veoki ülesõidul 3 eri kiirusel.

Vajumiandurite graafikul on kõige laiemas helesinise graafikuga kõige aeglasem ülesõit ja kõige kiirem ülesõit mahub kõige kitsamasse ajavahemikku graafiku vasakus servas. Korelatsioon vajumite kestuse ja kiiruste erinevuse vahel on 1:1 ehk 30km/h koormamise kestus on 3x pikem, kui 90km/h koormamise kestus. Samuti on näha minimaalset maksimaalse vajumi erinevust, kus kiiremal koormamisel vajumi maksimum erineb 0,2-0,4%. 30km/h koormamisest tekkinud pinge muutus (v) taastub algselt tasemele 0,6 sekundi jooksul, kuna teekate oli uus ja mulle ei olnud veega küllastunud. Taastumise kiiruse erinevus 30-90km vahel on ca 0,1 sekundit ja ei oma teadustöö eesmärki silmas pidades olulist väärtust.

Uurimustöös Effects of Heavy-vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance (Thomas D. Gillespie 1993) käsitleti ka teed koormavate veokite kiiruse mõju teekatte kahjustuste arengule. Uurimistöö jõutakse samadele järeldustele, et kiirus on 1 olulisemaid dünaamilisest koormamisest tulenevaid komponente, mis mõjutab teekatte lagunemist ja siledal teel vähendab suurem kiirus teekatte lagunemist lühema

koormamisaja tõttu. Koormamise kiirusega kasvab omakorda ka kiirusest sõltuv ja tee ebatasustest tulenev veoki rappumine. Ideaalselt siledal teel säilib teekate paremini suuremate lubatud kiiruste korral, kuid tee lagunedes muutub suurem kiirus teekatele kahjulikuks, kuna peab ületame lisaks hõõrdumisele ka väikseid vertikaalseid takistusi.

Sügavamate andurite (nt percoandurite) mõõdetud graafikutes oli vähe muutusi nii lühikese koormamise puhul. Järgnevalt on välja toodud teekatte pinnas olevad asfaldiandurid. Need andurid mõõdavad asfaldisse kinnitatud kahe pulga vahelist liikumist, kui veokirattast tulnud löögi tulemusel asfalt venib või surutakse kokku. Teiseks anduriks on valitud sügavaim andur ehk 55cm sügavusel olev surveandur, mis andis väga selgeid tulemusi. Mõlemas graafikus on kasutatud eelneva vajumisandurigaafikuga analoogselt 44t veokit. Graafikule on kokku pandud 3 erineva kiirusega ülesõidu ajal mõõdetud tulemused.

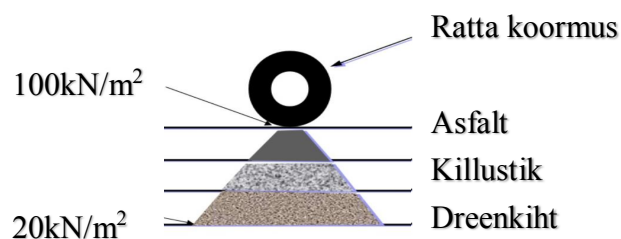


Joonis 27. Asfaldi- ja surveanduri graafikud sama veoki ülesõidul 3 eri kiirusel

44t veok kiirus andur/ telg	1 telg (V)	2 telg (V)	3 telg (V)	4 telg (V)	5 telg(V)	6 telg (V)	Kesk- mine *100	Erinevus	Max (V)*100	Min (V)*100
30 km/h										
Asfalt 1	0,00252	0,00252	0,00251	0,00251	0,00248	0,00253	0,25	20,75%	0,253	0,248
Asfalt 2	0,00215	0,00215	0,00215	0,00212	0,00212	0,00215	0,21	2,88%	0,215	0,212
Surve	0,00023	0,00022	0,00021	0,00021	0,00018	0,0002	0,02	21,67%	0,023	0,0177
50km/h										
Asfalt 1	0,0025	0,0025	0,00249	0,00249	0,00247	0,00248	0,25	19,63%	0,25	0,247
Asfalt 2	0,00212	0,00212	0,00212	0,0021	0,00208	0,00212	0,21	1,44%	0,212	0,208
Surve	0,00023	0,00022	0,00021	0,00021	0,00017	0,00019	0,02	19,90%	0,0225	0,0174
90km/h										
Asfalt 1	0,00251	0,00252	0,00251	0,00252	0,00249	0,00252	0,25	20,75%	0,252	0,249
Asfalt 2	0,00215	0,00215	0,00215	0,00211	0,00211	0,00213	0,21	2,56%	0,215	0,211
Surve	0,00021	0,00021	0,0002	0,00021	0,00017	0,00019	0,02	16,47%	0,0211	0,017

Tabel 5 . Asfalditõmbeandurite ja 55cm sügavusel asuva surveanduri registreeritud väärtused sama veoki ülesõidul 3 eri kiirusel.

Graafikutelt ja tabelist on taaskord näha, et aeglasema kiirusega ülesõit koormab katendit 3 korda kauem ning teekatte pinnal on mõjuvad jõud lühiajalisemad ja suurema intensiivsusega. Sügavama surveanduri graafikud on sujuvamad, kestavad kauem ja on väiksema amplituudiga. See vastab koormuse pinnases jagunemise teooriale.



Joonis 28. Üldine koormuse jagunemise mudel, kus pole arvestatud konkreetsete materjalide sisehõordenurkadega

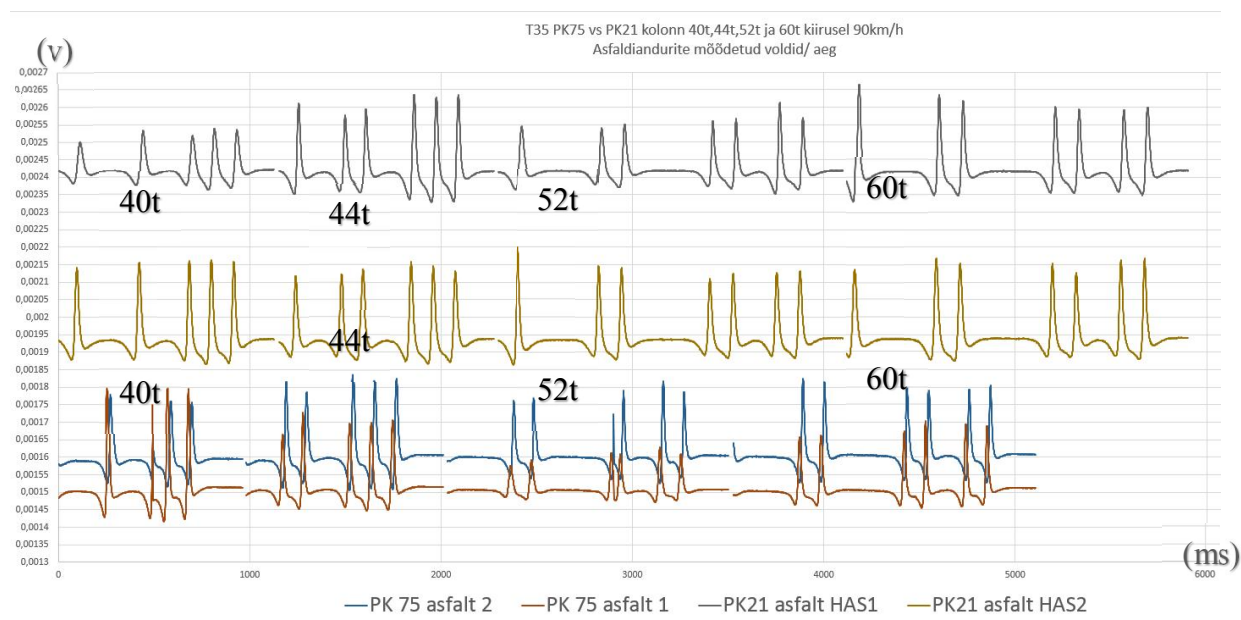
5.2 Veoki kaalu ning paarisrataste ja üksikrehvide mõju teekatendile

Katsetes teostati kolmes eri punktis nelja erineva kaaluga veokite ülesõite anduritest. Kaaludeks olid 40t, 44t, 52t ja 60t. Ülesõidud toimusid 3 korda pausidega ja kord kolonnis kaalu järjekorras alustades kõige kergemast ja lõpetades raskeimaga.

Veokite kaalu mõju teekatendile sõltub, kui suurele alale on veoki koormus jaotatud. Analoogselt tikk-kontsaga kingale, mis võib ka suhteliselt väikse kaalu puhul tekitada parketile suurt kahju, tekitavad ka kitsad rehvid ja vähene telgede arv suuremat kahju, kui suurema koormusega ja laiemate rehvide ning suurema telgedearvuga veok.

Võrdluseks valiti PK 21 ja PK 75 kolonni ülesõit, kuna andmed olid järjest registreeritud ja ei satu teine-teise peale. Lisaks on kiirused mõlema kolonni puhul samad. Simuna Vaiatus oli kolonni kiirus 50km tunnis seoses mõõtepunkti asukohaga kurvil. Kolonni puhul saab samuti vaadata, kas järjest liikunud veokid tekitavad püsivaid vajumeid teekatesse ehk kumulatiivset deformatsiooni. Kuna kumulatiivset plastset deformatsiooni nii sileda ja mitte liigniiskel aastajal teekatendile ei tekkinud, siis on ka eri kaaludega veokite andmed paremini võrreldavad.

Kumulatiivsete deformatsioonide uurimiseks peaks katsed läbi viima teekatte jaoks kriitilises ajavahemikus kevadel või sügisel nullilähedase temperatuuriga, kui niiskus on maksimaalne ning jäätumis-sulamistsükliks teevad katendi nõrgaks. Huvitava leiuna on Soome vastavatest null temperatuuri aegsetest katsetest 1 katse (TTY 2015-2017), kus peale veokit sõitis järgi kerge mõõteauto, et deformatsioone mõõta. Selgus, et väga vettinud mulde korral suudab veoki taga sõitev sõiduauto takistada teekatte taastumist.



Joonis 29. Asfaldiandurite graafikud 4 eri kaaluga veoki ülesõidul kolonnis 90 km/h

Veoki kaal ja andur/ telg	PK 21 asfaldi andur 1	PK 21 asfaldi andur 2	PK 75 asfaldi andur 1	PK 75 asfaldi andur 2
	40t			
1 telg (V)	0,00252	0,00213	0,00179	0,00177
2 telg (V)	0,00252	0,00215	0,00175	0,00170
3 telg (V)	0,00250	0,00214	0,00179	0,00174
4 telg (V)	0,00251	0,00215	0,00179	0,00175
5 telg (V)	0,00250	0,00213	0,00179	0,00174
	44t			
1 telg (V)	0,00259	0,00210	0,00166	0,00180
2 telg (V)	0,00257	0,00211	0,00171	0,00178
3 telg (V)	0,00257	0,00212	0,00168	0,00183
4 telg (V)	0,00262	0,00213	0,00169	0,00181
5 telg (V)	0,00261	0,00211	0,00168	0,00181
6 telg (V)	0,00262	0,00213	0,00170	0,00181
	52t			
1 telg (V)	0,00253	0,00218	0,00156	0,00175
2 telg (V)	0,00252	0,00214	0,00158	0,00175
3 telg (V)	0,00253	0,00213	0,00159	0,00172
4 telg (V)	0,00255	0,00210	0,00159	0,00178
5 telg (V)	0,00255	0,00211	0,00162	0,00181
6 telg (V)	0,00255	0,00211	0,00158	0,00178
7 telg (V)	0,00255	0,00211	0,00157	0,00173
	60t			
1 telg (V)	0,00263	0,00213	0,00165	0,00182
2 telg (V)	0,00262	0,00215	0,00163	0,00180
3 telg (V)	0,00260	0,00212	0,00165	0,00178
4 telg (V)	0,00258	0,00213	0,00166	0,00177
5 telg (V)	0,00258	0,00211	0,00169	0,00177
6 telg (V)	0,00258	0,00214	0,00169	0,00178
7 telg (V)	0,00258	0,00215	0,00169	0,00178

Tabel 6 . Andurite mõõdetud väärtused 4 eri kaaluga veoki ülesõidul kolonnis 90 km/h

Graafikutelt ja tabelist on näha, et veokid jagunevad kahte gruppi. Esimesed kaks tekitasid asfaldis suuremaid ja vahelduvamaid siirdeid, kui viimased kaks, mis on suhteliselt sarnaste tulemustega mõlemas mõõtepunktis. Kaalu järgi võiks oletada, et tagumised raskemad veokid tekitavad suuremaid siirdeid, kuid suurematel veokitel on paarisrattad ja koormus jaguneb paremini.

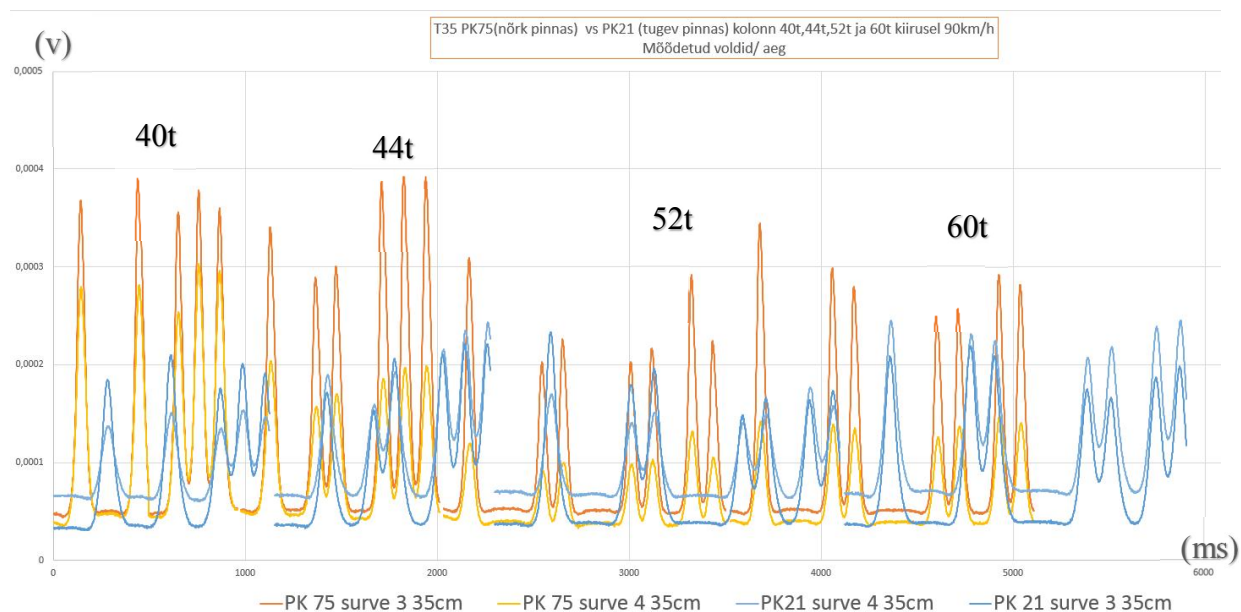
Antud suure hulga ehk 4 x 25 maksimumväärtusega graafikutelt on näha, et kõrvutiste telgede koormus asfaldile on kuni 34 % protsenti väiksem. Sellised tulemused on seletatavad ülesõidu trajektoori kõikumisega, kui ratas alati ei satu täpselt andurite peale.

Veoki kaal ja andur/ telg	PK 21 asfaldi andur 1	PK 21 asfaldi andur 2	PK 75 asfaldi andur 1	PK 75 asfaldi andur 2	Keskmine
40t					
1 telg	62%	37%	15%	13%	31,0%
2 telg	62%	38%	12%	9%	
3 telg	60%	37%	15%	12%	
4 telg	61%	38%	15%	12%	
5 telg	60%	37%	15%	12%	
44t					
1 telg	66%	35%	6%	15%	31,5%
2 telg	65%	35%	10%	14%	
3 telg	65%	36%	8%	17%	
4 telg	68%	37%	8%	16%	
5 telg	67%	35%	8%	16%	
6 telg	68%	37%	9%	16%	
52t					
1 telg	62%	40%	0%	12%	28,4%
2 telg	62%	37%	1%	12%	
3 telg	62%	37%	2%	10%	
4 telg	63%	35%	2%	14%	
5 telg	63%	35%	4%	16%	
6 telg	63%	35%	1%	14%	
7 telg	63%	35%	1%	11%	
60t					
1 telg	69%	37%	6%	17%	31,1%
2 telg	68%	38%	4%	15%	
3 telg	67%	36%	6%	14%	
4 telg	65%	37%	6%	13%	
5 telg	65%	35%	8%	13%	
6 telg	65%	37%	8%	14%	
7 telg	65%	38%	8%	14%	

Tabel 6a . Andurite väärtused protsentides võrreldes väikseima väärtusega 4 eri kaaluga veoki ülesõidul kolonnis 90 km/h

Protsentuaalses võrdluses on näha, et üksikratastega 44t veok tekitab asfaldis suurimaid pingeid ja väiksemaid pingeid tekitab paarisratastega 52t veok

Surveanduritest valiti seekord kõrgemal ehk killustiku kihi all asuvad andurid, mis näitavad suuremat amplituuti, kui sügavamal asuvad surveandurid. Veokid sõitsid taaskord kolonnis, kus kergemad veokid olid eespool ja raskemad tagapool.



Joonis 30. 35 cm sügavusel asuvate surveandurite graafikud 4 eri kaaluga veoki ülesõidul kolonnis 90 km/h

Graafikult on näha, et PK 21 vajumiandurite mõõtetulemused kattuvad 80% ulatuses, nii et graafikuid pole võimalik graafikult eristada

Selgub, et on ka erinevus kahe PK 21 ja PK 75 tekkinud pingete vahel, kus PK 75 graafiku amplituud on ligi 10-50% kõrgem. See korreleerub pehmema aluspinnasega, kus pingejaotus jaguneb kitsamale alale materjalide väikese sisehõõrdenurga tõttu.

Veoki kaal ja andur/ telg	PK 21 surve andur 3	PK 21 surve andur 4	PK 75 surve andur 3	PK 75 surve andur 4
	40t			
1 telg (V)	0,00020	0,00013	0,00037	0,00027
2 telg (V)	0,00021	0,00015	0,00038	0,00028
3 telg (V)	0,00017	0,00013	0,00035	0,00025
4 telg (V)	0,00020	0,00015	0,00037	0,00030
5 telg (V)	0,00019	0,00015	0,00035	0,00029
	44t			
1 telg (V)	0,00016	0,00018	0,00034	0,00020
2 telg (V)	0,00015	0,00016	0,00028	0,00015
3 telg (V)	0,00019	0,00019	0,00030	0,00017
4 telg (V)	0,00021	0,00021	0,00038	0,00018
5 telg (V)	0,00022	0,00023	0,00039	0,00019
6 telg (V)	0,00022	0,00024	0,00039	0,00020
	52t			
1 telg (V)	0,00023	0,00017	0,00030	0,00011
2 telg (V)	0,00018	0,00014	0,00020	0,00009
3 telg (V)	0,00019	0,00015	0,00022	0,00010
4 telg (V)	0,00014	0,00014	0,00020	0,00009
5 telg (V)	0,00016	0,00015	0,00021	0,00010
6 telg (V)	0,00016	0,00017	0,00029	0,00013
7 telg (V)	0,00016	0,00016	0,00022	0,00010
	60t			
1 telg (V)	0,00020	0,00024	0,00034	0,00014
2 telg (V)	0,00022	0,00023	0,00029	0,00013
3 telg (V)	0,00020	0,00022	0,00027	0,00013
4 telg (V)	0,00017	0,00021	0,00024	0,00012
5 telg (V)	0,00016	0,00022	0,00025	0,00013
6 telg (V)	0,00018	0,00024	0,00029	0,00014
7 telg (V)	0,00019	0,00024	0,00028	0,00014

Tabel 7. 35 cm sügavusel asuvate surveandurite mõõdetud väärtusd 4 eri kaaluga veoki ülesõidul kolonnis 90 km/h

Samuti on näha, et esimesed kaks veokit tekitavad suuremat survet, kui viimased kaks veokit. Esimesel kahel on siis vastavalt 5 ja 6 telge, kus on haagistel kõik üksikrattad ja lisaks üksikute rehvidega pöörav esitelg. Teisel kahel on haagistel paarisrattad ja 7 telge ehk ca 2x (olenevalt rehvi tüübist) suurem toetuspindala.

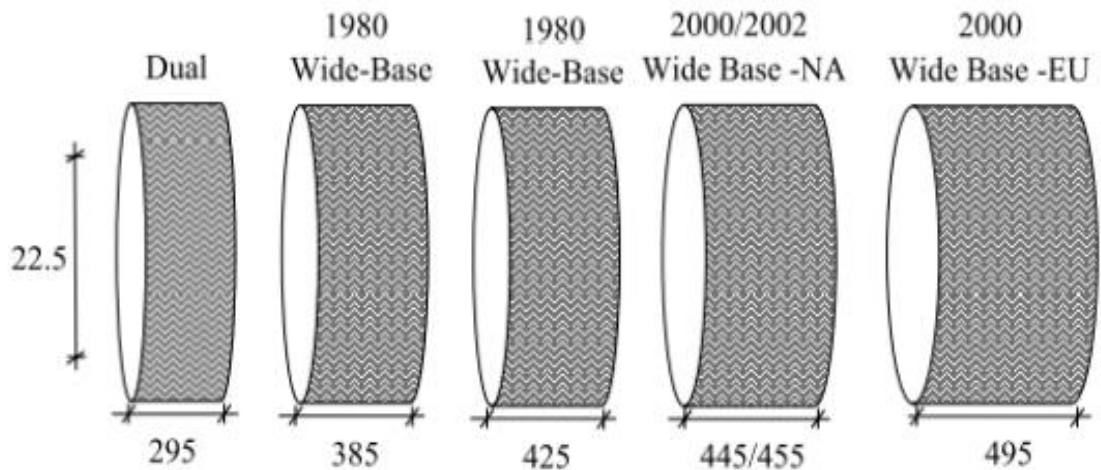
Veoki kaal ja andur/ telg	PK 21 surve andur 3	PK 21 surve andur 4	PK 75 surve andur 3	PK 75 surve andur 4	Keskmine
	40t				
1 telg (V)	122%	44%	311%	200%	171,7%
2 telg (V)	133%	67%	322%	211%	
3 telg (V)	89%	44%	289%	178%	
4 telg (V)	122%	67%	311%	233%	
5 telg (V)	111%	67%	289%	222%	
	44t				
1 telg (V)	78%	100%	278%	122%	156,02%
2 telg (V)	67%	78%	211%	67%	
3 telg (V)	111%	111%	233%	89%	
4 telg (V)	133%	133%	322%	100%	
5 telg (V)	144%	156%	333%	111%	
6 telg (V)	144%	167%	333%	122%	
	52t				
1 telg (V)	156%	89%	233%	22%	84,92%
2 telg (V)	100%	56%	122%	0%	
3 telg (V)	111%	67%	144%	11%	
4 telg (V)	56%	56%	122%	0%	
5 telg (V)	78%	67%	133%	11%	
6 telg (V)	78%	89%	222%	44%	
7 telg (V)	78%	78%	144%	11%	
	60t				
1 telg (V)	122%	167%	278%	56%	130,56%
2 telg (V)	144%	156%	222%	44%	
3 telg (V)	122%	144%	200%	44%	
4 telg (V)	89%	133%	167%	33%	
5 telg (V)	78%	144%	178%	44%	
6 telg (V)	100%	167%	222%	56%	
7 telg (V)	111%	167%	211%	56%	

Tabel 7a. 35 cm sügavusel asuvate surveandurite protsentuaalsed väärtused võrreldes väikseima mõõdetud väärtusega 4 eri kaaluga veoki ülesõidul kolonnis 90 km/h

Nullpunktiks on tabelis võetud väiksem mõõdetud väärtus ehk 52t veoki 4 telje 4 anduri väärtus, mis on tabelis väärtusega 0%.

Tabelis on koos kahe erineva kanevõimega mõõtepunkti ülesõidud kokku pandud ning võetud keskmised väärtused, mida tuleb vaadelda üldistusena. Nagu graafikutelt näha selgub ka protsenditabelitest, et survejõud on killustiku all kihis 40t ja 44t üksikratastega veokite puhul ca 2 korda suuremad, kui 52t paarisrattega veoki puhul ning ca 25 % suuremad kui 60t paarisratstaste puhul. Seega pingete erinevused kasvavad sügavuse kasvades võrreldes tabelit 7a tabeliga 6a.

Veoki rehvide erinevaid kontaktpingeid on ka täpsemalt uuritud TTY 2017 V. Haakana diplomitöös, milles uuriti täpsemalt uue põlvkonna nn supersingle rehvide mõju võrreldes paarisrataste ja vanade üksikrehvidega. Leiti, et kõige suurema kontaktpingega ja teele kõige kahjulikumad on vanad üksikrehvid, kuna rehvi laius on kitsas ja rehvi rõhk on kõrge. Uue põlvkonna üksikrehvide laiused on kasvanud ja rehvi rõhk läinud allpoole ehk nende mõju läheneb paarisrataste kui kõige teed säästvamate rataste mõjule.



Joonis 32. Paarisratas ja uute üksikrehvide ajalooline areng 1980-2002 (Al-Quadi 2004)

Põhja-ameerika rehvitootjad hakkasid 1980'ndatel otsima alternatiive kulukatele paarisratastele. Selle tulemusel töödati välja esimese põlvkonna üksikrehvid, mis olid küll odavamad, kuid riigile kallimad, kuna lagundasid teed paremini. Pärast mitmeid uurimistöid sattusid rehvitootjad surve alla, et välja töödada rehvi, mis on küll soodsam, kui paarisratas, kuid ei lagunda teed. 35 aastaga on selle eesmärgile päris lähedale jõutud.

Uute üksikrehvide (495/45 R22.5) eelis on kütuse kokkuhoid, rehvi pikem eluiga, väiksem rehvirõhk, parem koormuse jaotus kontaktpinnal, suurem koormuse taluvus ning parem sõidumugavus ning juhitavus. Varasema generatsiooni (445/50R22.5, 455/55R22.5 ja eriti 385/65R22.5, 425/65R22.5) rehvide puudusteks oli väike kontaktpindala, kõrge kontaktsurve, kõrge rehvirõhk (790-89kPa) ja kõrge teekatte kahjustamise risk.



Joonis 31. Paariratas ja uued üksikrehvid (Michelin 445mm ja Goodyear 495mm) ja rattajäljed ehk veoki toetuspinna suurus (D. Grellet, j-P Bilodeau 2012). Alumisel kujutisel on näha 125 mm telje muutust sõiduraja serva poole uute üksikrehvide puhul.

Eesti oludes tuleks jälgida, et üksikrattad oleks varustatud võimalikult uute ja laiade üksikrehvidega ning raskematel haagistel oleks peale vedava telje kõik teljed paariratastega.

Rehvi rõhk ei jaotu ühtlaselt teekattele vaid erinevatest rehvidest tekitavad erinevad survemustrid, mis on reeglina servades suurema rõhuga ja rehvimustrite keskel suuremate lainetena. Samas ei sõida veokid samas rattajäljes ehk rehvi oma mustrist tulenevad erinevad koormused jaotuvad laiali tee pinnale. Roobaste tekkimisel vajuvad rehvid samasse roopasse ja see omakorda kiirendab roopa arengut. Uuringud on näidanud, et väikeste roopa sügavuste puhul võib roopa kõrval sõitev veok tasandab roobast ja tee säilimise aspektist peaks ideaalis veokite sõidujäljed jaotama laiali kogu

teekatendi laiuses. Uued laiad üksikrehvide raskuskese on 125mm serva pool ja seega muudavad või tasandavad olevaid roopaid.

5.3 Tee eluiga ja raskemad veokid

Eesti projekteerimismisnormide kohaselt projekteeritakse tee keskmiselt 20 aastaks. Selle aja jooksul muutuvad nii liikluskoormused kui ka ehitusmaterjalid. Praktikas on enamuse tänapäeval kasutuses olevatest põhimaanteedest rekonstrueeritud ja täitsa uuena ehitatud viimase 25 aasta jooksul. Enamus kõrvalmaanteid on läbinud pealiskatendi rekonstruktsiooni. Kruusateid on pinnatud ja asfaltteeks ümber ehitatud. Seega põhimaanteedel olukord on märgatavalt parem, kui kõrvalmaanteedel ja kruusateedel olukord, millel on endiselt all tolmetest materjalidest ehitatud liigniiskuse suhtes tundlikud mulded. Sellised mulded on eriti nõrgad sulamis-jäätumistsüklite ajal.

Teekatte seisukorra analüüsimiseks (seisukorra pingerida, remondivajadus, tasuvusarvutused jne) kasutatakse kahte arvutitarkvara EPMS ja HDM-4. EPMS on spetsiaalselt Eestis välja töötatud tarkvara teekatte seisukorra analüüsimiseks ja HDM-4 on rahvusvaheliselt tunnustatud tarkvara tasuvusanalüüside tegemiseks. Erinevate analüüside juures kasutatakse erinevaid teede seisukorra ning teid iseloomustavaid näitajaid (tasasus, praod jne) ja analüüside tulemiks on kandidaatobjektide pingeread, mis on aluseks lõplike remondinimekirjade koostamiseks.

Seega Eesti oludes tähendab tee eluea täis saamist EPMS remondinimekirja sattumine.

Sildade uuring Sõidukite massi ja teljekoormuse seire Eesti sildadel (TKTK ja Viacon Eesti AS 2018) on väljatoodud, et mõõtmistulemuste järgi ca 11% veokitest on Eestis ülekaalus ning osade kaalud küündivad kuni 90 tonnini. Katendiarvutustes ei võeta sõiduautosid, kui liiga kergeid, arvesse ja samas 40t veokitel on juba suur mõju katendi konstruktsioonile. AASHTO neljanda astme seadus ütleb, et kahjustused teekatendile ei kasva lineaarselt koormuse kasvades vaid astmes 4. Neljanda astme reegli järgi suudavad paar 90 tonnist veokit teha teele sama palju kahju, kui sajad normaalkaalus veokid. Käesolev uurimus on näidanud (Tabel 6a ja 7a, joonised 29 ja 30), et kui veokirataste kontaktpindala teega suurendada, nii et surve ruutsendimeetritele kokkuvõttes ei suurene, siis see ei tekita teele märkimisväärset kahju. 90t veok peaks siis olema umbes 10 teljeline paarisrattastega eriveose loaga veok, mida ükski neist 17 % ületajatest ei olnud. Praegusel hetkel lähtuvad nii projekteerijad kui ka ehitajad ja tellija eeldusest, et ülekaalulisi veokeid on mõni protsent. Kui nende hulk küündib tegelikkuses 11% ni, siis on Eesti teed siiani suurepäraselt vastu pidanud.

5.4 40t, 52t ja 60tveoki mõju võrdlus

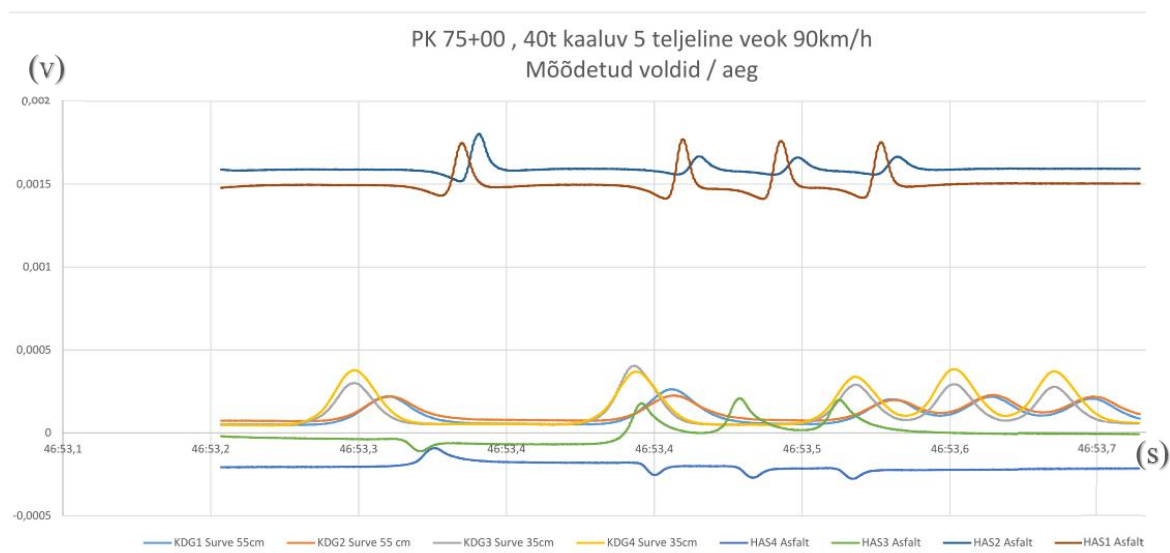
Eraldi huvi pakub juba aastaid lubatud olnud 40t veoki ja kaalumisel oleva 52t veoki ning naaberemaades juba lubatud, kuid Eestis veel eriveose alla käiva 60t veoki omavaheline võrdlus.

Valitud kiiruseks on Eesti maanteed keskmine lubatud kiirus ehk 90km/h. Eelnevatest peatükkidest selgus, et suuremal kiirusel on lühemad ja nn. teravamate tippudega graafikud ja PK 75 on vajumiandurite amplitud suurem kui PK 21. Selgemate tulemuste esile toomiseks jäi valituks PK 75.

Graafikutel on koos asfaldi kui ka surveandurid. Kaks ülemist ja kaks alumist (osaliselt survet ja osaliselt tõmmet registreerivad jooned) on asfaldi andurid. Asfaldi andurid asetsevad teepinnal kord sõidusuunas ja kord risti sõidusuunaga. Selliselt saavad need registreerida survet kui ka tõmmet, olenevalt mis tsooni andurid satuvad.

Laugemate tippudega on keskmised surveandurid. Surveandurid on kahes eri sügavuses 35 cm ja 55cm. Surveandureid saab eristada reaktsiooni kiiruse ja tippude lauguse järgi. Aeglasemalt ja sujuvamate lainetena jõuab veoki ülesõidust tulenev surve sügavamate 55 cm sügavusel olevate anduriteni. Pisut järsem surve tõus on registreeritud 35 cm sügavusel asetsevate andurite poolt.

Kahte eri tüüpi andurite mõõtmistulemusi võrreldes on näha kuidas sekundi murdosa jooksul mõjub järsk löök asfaldile ja asfaldi andurid registreerivad selle. Pisut hiljem jõuab löök 35cm sügavusele ja surveandur registreerib selle natuke pikema aja vältel. Veel hiljem jõuab löök 55cm sügavusele ja surve kestus pikeneb veelgi, kuigi jõud on jäänud juba väiksemaks.

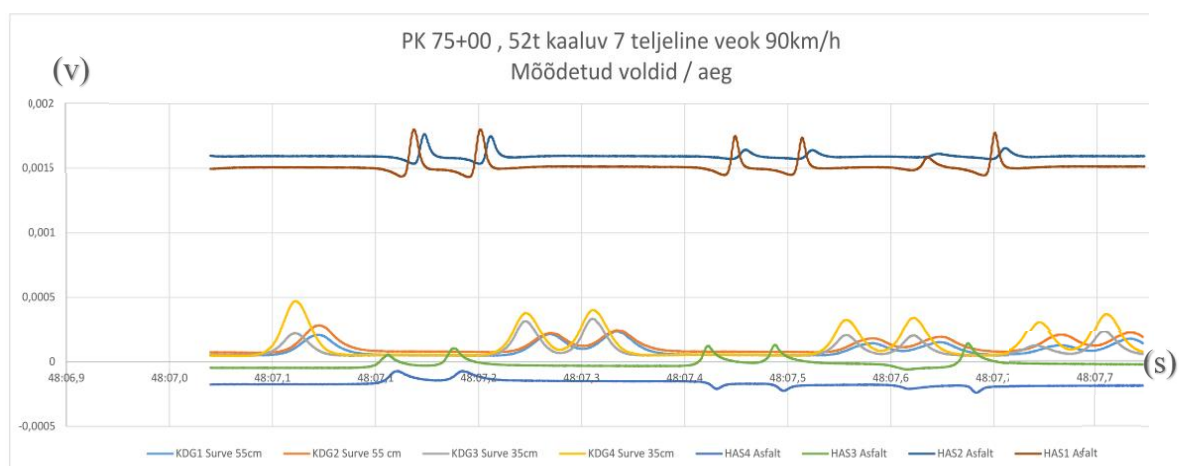


Joonis 33. 40t veoki ülesõit. Asfaldi- ja surveandurite graafikud.

40t veok 90km/h andur/ telg	1 telg (V)	2 telg (V)	3 telg (V)	4 telg (V)	5 telg(V)	Keskmine *100	Erinevus	4 anduri keskmine (V)*100
Asfalt 1	-	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,17	1600%	0,09
Asfalt 2	-	0,0018	0,0016	0,0016	0,0016	0,165	1550%	
Asfalt 3	-	-0,0001	0,00016	0,00019	0,00018	0,0105	5%	
Asfalt 4	-	-7E-05	-0,0003	-0,0003	-0,0003	0,02175	118%	
Surve 1	0,00022	0,00026	0,0002	0,00021	0,0002	0,0218	9%	0,03
Surve 2	0,00022	0,00022	0,0002	0,00023	0,00022	0,0218	9%	
Surve 3	0,0003	0,0004	0,00029	0,00029	0,00027	0,031	55%	
Surve 4	0,00037	0,00036	0,00034	0,00038	0,00037	0,0364	82%	

Tabel 8. 40t veoki ülesõit. Asfaldi- ja surveandurite mõõdetud tulemused.

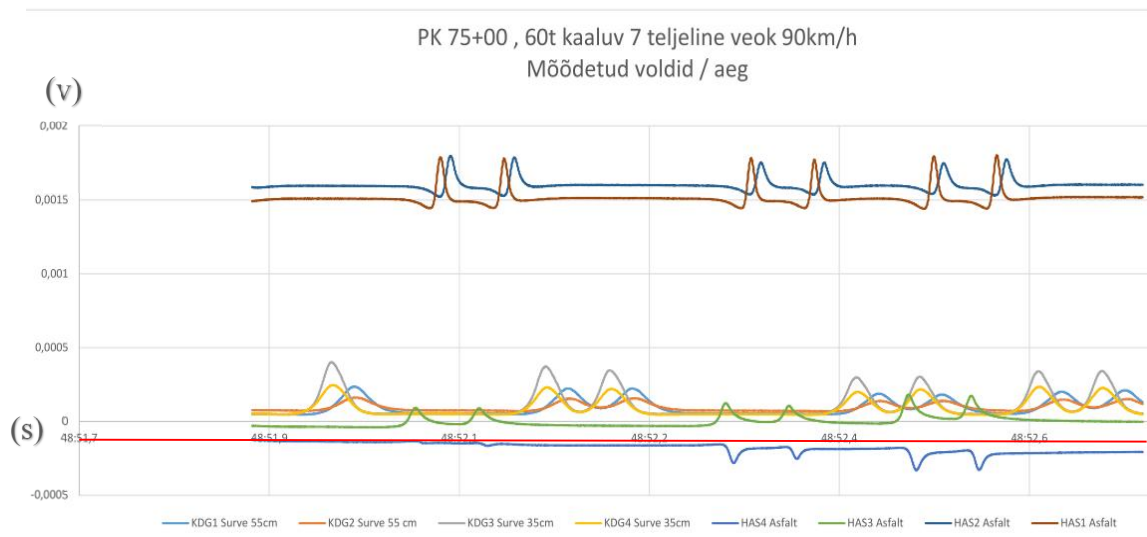
Tabelis on kahte tüüpi andurid mille mõõtetulemused erinevad 10 korda omavahel ning maksumimide erinevused on samuti erinevas skaalas. Samas annab joonis 33 ettekujutuse pingete jagunemisest muldes, kus sama telje mõju jõuab 35cm sügavusele 0,1 sekundilise hilinemisega. Tabel 8 on näha et asfaldiandurite mõõtetulemused einesid kuni 1600% olenevalt kui täpselt ratas neist üle sõitis ja sügavamale surveandurite mõõdetud pinged olid ühtlasemad (kuni 88% erinevus) , kuna pinged on juba ülevalt alla suunas laiali.



Joonis 34. 52t veoki ülesõit. Asfaldi- ja surveandurite graafikud.

52t veok 90km/h andur/ telg	1 telg (V)	2 telg (V)	3 telg (V)	4 telg (V)	5 telg(V)	6 telg(V)	7 telg(V)	Kesk- mine *100	Erinevus	4 anduri keskmine (V)*100
Asfalt 1	-	0,0018	0,0018	0,0017	0,0017	0,0016	0,0018	0,17	2376%	0,09
Asfalt 2	-	0,0017	0,0017	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,16	2233%	
Asfalt 3	-	0,00005	0,0001	0,0001	0,0001	-5E-05	0,00012	0,01	0%	
Asfalt 4	-	-7E-05	-7E-05	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	0,02	138%	
Surve 1	0,0002	0,00022	0,00024	0,00014	0,00015	0,00012	0,00017	0,02	48%	0,02
Surve 2	0,00028	0,00022	0,00024	0,00018	0,00019	0,0002	0,00021	0,02	81%	
Surve 3	0,00022	0,00031	0,00033	0,0002	0,0002	0,00022	0,00021	0,02	101%	
Surve 4	0,00046	0,00037	0,0004	0,00031	0,00033	0,0003	0,00036	0,04	201%	

Tabel 9. 52t veoki ülesõit. Asfaldi- ja surveandurite mõõdetud tulemused.



Joonis 35. 60t veoki ülesõit. Asfaldi- ja surveandurite graafikud.

60t veok 90km/h andur/ telg	1 telg (V)	2 telg (V)	3 telg (V)	4 telg (V)	5 telg(V)	6 telg(V)	7 telg(V)	Kesk- mine *100	Eri- nevus	4 anduri keskmise (v)*100
Asfalt 1	-	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,18	2150%	0,10
Asfalt 2	-	0,0018	0,0018	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,17	2067%	
Asfalt 3	-	0,00008	0,00008	0,00012	0,0001	0,00017	0,00016	0,01	48%	
Asfalt 4	-	-1E-05	-2E-05	-0,0003	-0,0003	-0,0003	-0,0003	0,02	154%	
Surve 1	0,00023	0,00022	0,00022	0,00019	0,00018	0,0002	0,00021	0,02	48%	0,02
Surve 2	0,00016	0,00015	0,00016	0,00014	0,00014	0,00015	0,00015	0,02	7%	
Surve 3	0,00039	0,00037	0,00034	0,0003	0,0003	0,00033	0,00034	0,03	142%	
Surve 4	0,00025	0,00022	0,00022	0,0002	0,00021	0,00023	0,00022	0,02	58%	

Tabel 10. 60t veoki ülesõit. Asfaldi- ja surveandurite mõõdetud tulemused.

Erinevate kiiruste graafikuid ja tabelleid võrreldes on näha esmalt erinev telgede arv, mida andurid on ka registreerinud. Vajumiandurid on telgede arvu registreerinud

täpsemalt. Esimene pööravate ratastega telg on alati üksikratastega telg ning see on enamasti jäänud asfaldiandurite poolt registreerimata, aga annab ka kõige teravama tipu vajumigraafikutel (joonised 33-35). Kuna 40t oli kõik üksikrattad siis ka järsemad graafiku tipud on näha 40t (joonis 33). Paarisratastega 52 ja 60t haagistest tulenevad jõud on olnud kõige ühtlasemad ja hajusamad (joonised 34 ja 35, tabelid 9 ja 10) .

60t puhul (joonis 35) on näha, et asfaldis mõjuvad tõmbe ja survejõud on suuremad, kuna kõige alumisel graafikul on kõige suuremad sakid võrreldes 52 ja 40t sama anduri tulemustega. 60t 3. ja 4. asfaldianduri tulemuste puhul on näha kumulatiivset venimist ehk iga järgnev telg venitab asfalti rohkem, kuna asfalt ei ole jõudnud tagasi kokku tõmmata (Joonis 35 alasosa punase ja sinise joone vahe). Vajumisanduritest kumulatiivset efekti näha pole ja need kaks graafikut on ainukesed 2 , mis tuhandete mõõtmistulemuste hulgast kumulatiivse efekti on registreerinud.

Andurite komplektide keskmised väärtused 40, 52 ja 60t veoki ülesõidudel on väga sarnaste väärtustega, kõikudes 0,01 voldi võrra (tabelid 8-10). Surveandurid on registreerinud 0,01 volti suuremaid pingeid 40t veoki üksikrataste puhul ja asfaldiandurid 60t paarisrataste puhul. Tulemused on korellatsioonis teiste antud teadustöö mõõtmistulemustega.

40t üksikratastega veok võib tekitada asfaldis ja muldes isegi suuremaid pingeid kui raskemad veokid, kui veokil on piisavalt kitsad üksikrehvid. Samas on raskematel veokitel rohkem telgi ja see suurendab ühest ülesõidust tekkivat löökide arvu ning koormuse kestust. Pikem koormamise aeg võib liigniiske mulde korral viia kiirema jäävdeformatsiooni ehk roopa tekkeni.

5.5 Raskeveokite ülesõidu mõju muldematerjali dielektrilisusele

Vastavad andurid hakati tootma ca 10a tagasi eesmärgiga saada maaradari ülesõitudega dielektrilisuse ehk kaudselt niiskuse mõõtmisele sarnaseid tulemusi pikaajsete mõõtmiste kaudu otse mulde seest. Teoreetiliselt peaks ülesõitvad veokid pumpama vett muldesse ja kui mulde materjali veesisaldus on ca 85% kasvavad jäävdeformatsioonid oluliselt. Selleks, et vett saaks pumpata peab materjal olema tolmne ja tootja soovitusel saab paremini mõõta siis, kui pumpamine toimub pigem teekattele lähedastest kihtidest ca 0..50cm. Seekordsel mõõtmisel olid andurid sügaval ning mõõdeti paarisekundilisi ajalõike, kui veokid üle sõitsid. Selgeid graafilisi seoseid veoki ületamise ja dielektrilisuse ehk vaba vee juurdevoolu vahel ei tekkinud. Samas oli tee just rekonstrueeritud ehk tolmseid kihte nii lähedal teekattele ei olnud ja andurid olid ka vastavalt lähteülesandele liiga sügaval.

Soomes valmis TTY poolt 2018 aasta kevadel aruanne HCT-mittaukset 2015-2017 raportti, kus käsitleti ka Percoandurite tulemusi. Ülesõit suudeti küll registreerida, kuid kuna vee sisaldus materjalis peale ülesõitu ei muutunud, siis koormamisel ei olnud dielektrilisusele ehk vaba vee sisaldusele mõju.

Simuna Vaiatus on 2014 aastal teinud ka Tehnokeskus pikajalisi üle aasta pikkusi mõõtmisi Percoseadmetega. Tulemustes nenditakse, et kuna lähedal asuvad andurite tulemused ei korreleerunud omavahel, on raske leida tulemustest seoseid.

Muldkeha läbikülmumise ja teekonstruktsiooni kandevõime seose uuringus (Tehnokeskus 2011), kus percoandurid paigaldati iga 20cm sammuga teekatte pinnast sügavamale on Maanteede uuringu järeldused peatükis lk 64 välja toodud, et vajumikausi parameetritega ei õnnestunudki teise ja kolmanda kihi percoandurite poolt registreeritud elektriliste omadustega seoseid leida (üldiselt oli FWD deformatsioonide ja elektriliste omaduste muutumine ajas heas kooskõlas)

5.6 Raskeveokite mõju monitooring üleriigilise võrguna ja soovituslik mõõtmis- ja jälgimismetoodika teede konstruktsioonide deformatsioonide monitoorimiseks.

Antud teadustöö raames on rajatud 2 uut mõõtepunkti ja täiendatud ühte 2014 rajatud mõõtepunkti. 2018 aasta sügisel toimunud kolmel katsepäeval kogutud andmetest saime ülevaate Ida-Virumaal asuvate riigitee 35 Iisaku–Tudulinna–Avinurme km 0,8–16,5 lõigu ning Vaiatu lõigu käitumisest erinevate raskeveokite koormuste all. Tulemused iseloomustavad varasügisese niiskustingimusi hõreda liiklusega ja uue ülekattega Ida-Viru kõrvalmaanteel. Tulemustest sai välja lugeda üldisemat teekonstruktsiooni käitumise loogikat ülekoormatud veokite ülesõidul.

Antud mõõtepunktides saab veel teha katsemõõtmisi kevadise sulamise tsüklite ajal kui ka sügiseste külmumistsüklite ajal, kui tee konstruktsioon on kõige haavatavam.

Erinevad uurimistööd on näidanud, et kõrvalmaanteed on just kõige tundlikumad koormuse kasvule. Selleks, et tekiks tervikpilt Eesti erinevate piirkondade ja teetüüpide käitumist uute raskemate veokite koormuse all eri aastaaegadel, peaks katsepunktide võrku laiendama üle kogu Eesti. Antud katsetest selgus, et kõik andurite tüübid ei anna selgeid loetavaid tulemusi kõikides tingimustes. Seega peaks välja valima kõige töökindlamate andurite miinimumkomplekti, mida saaks rakendada üleriigiliselt. Vastavalt kohalikule olule saaks lisada mõningaid andureid, mille mõõdetud parameetrid iseloomustaksid antud piirkonda (näiteks liigniiskus).

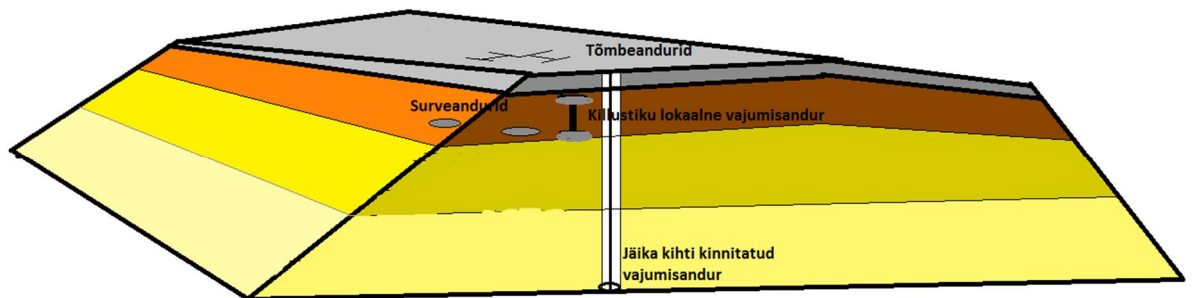
Katsepunktid peaksid olema T-35 eeskujul iga maakonna iseloomulikuma madalama teeklassi teel. Antud katsepunkti valikul oli kriteeriumiks, et saaks ühendada teedehituse objektiga, kuna paljud andurid tuleb paigaldada konstruktsiooni sisse ehk tee tuleb lahti kaevata. Valimist hõlbustaks juba talvel objekti välja valimine, kuna siis pole veel suvise ajagraafikusse mahtumisega probleeme. Osade andurite tellimisaeg on väga pikk ja seetõttu on samuti mõistlik alustada pool aastat enne suvise ehitusperioodi algust.

Uutest katsepunktidest saadaud info täiendaks sildade monitooringu infot ja aitaks aina edasi arenevate rehvitüüpide mõju täpsemalt hinnata. Teadustöö teostamise hetkel veel uued laiemad üksikrehvid pole veel laialdases kasutuses ning lubatud maksimaalset

veokikoormust pole samuti veel märkimisväärselt tõstetud. Soome Aurora projekt oli antud töö eeskujuks ning lähiajal peaks valmima Aurora mõõtmiste tulemuste raport. Vastavalt Soome maanteeameti esindajate kommentaaridele hakatakse tõenäoliselt ka Soomes lähiajal looma analoogset raskeveokite mõju seirevõrgustikku.

Uued veokid mõõdavad ise oma kogumassi ja seda saaks hakata koguma ühtsesse andmebaasi. Antud katses osalenud juhusel neljal eri veokil olid kõigil kaalumissüsteem sisseehitatud. Seda andmebaasi saaks võrrelda sildade monitooringute ja teeregistri kandevõime mõõtmiste tulemustega.

Käesoleva teadustöö raames saadud kogemuste põhjal kuuluvad optimaalsesse andurite komplekti 1) asfalditõmbeandurid, 2) killustiku- ja muldevajumisandurid ning kihtide all olevad 3) surveandurid.



Joonis 36. Optimaalsete andurite arvuga mõõtepunkti skeem

Sellise andurite komplektiga on kaetud kogu katendi monitooring ning kuna kõik andurid on sama tüüpi, saab neid ka ühte logerisse kokku ühendada. Mõõtepunkti tulevad juhtmed tuleb ilmastiku eest peita selleks püstitatud elektrikappi ning kõik kaablid ilmastikukindlalt ära tähistada. Elektrikapile tuleb võimalusel lisada päikesepatarei või kasutada elektrigeneraatorit. Meeskonnas peaks olema 1 elektrik ja vähemalt 1 inimene, kes on varem vastavate anduritega telegelenud. Vajadusel tuleb kraavi kohale ehitada mõõteplatvorm. Konkreetsetel katsemõõtmistel on vaja kasutada kaamerat ja laserit. Kui kasutatakse etalonkaaluga veokeid, siis on vajalikud ka veokite kaalud ja tasane asfaltkattega kaalumisplokk. Kaalumisplokkil kaalutakse veokid ja registreeritakse rehvide laiused ning veokitesse sisseehitatud kaalude tulemused.

Kõik valitud andurid on väga tiheda mõõtmisagedusega (üle 1000 mõõtmise sekundis) ning suudavad väga heade tulemustega registreerida veokitelgede ülesõitu. Suure andmete mahu jooksvalt edastamine pidevate mõõtmiste tegemisel vajab veel arendamist. Surve ja lokaalsete surveandurite jaoks on vaja tee lahti kaevata vähemalt killustiku põhjani. Seega tasub enne igat tee remonti kaaluda, kas antud tee olukorra monitooring pakuks infot kogu piirkonna teede olukorra hindamisel.

Liigniiskes ja tolmsete katendikihtidega teelõikudes saab mõõta niiskusrežiimi muutumist percoanduritega, mida tuleb paigutada teekattele võimalikult lähedal olevasse tolmsesse kihti. Perecoandurid vajavad eraldi logerit ja mõõtmisagedus ei kattu teiste andurite mõõtmisagedusega, samas saab neid kasutada pikemaajalisteks monitooringuteks. Percodele püsiloendusjaamad tuleks varustada päikesepatareiga, et andureid kasutada aastaringelt info kogumiseks. Sellisele mõõtejaamale saaks ka lisada optimaalse andurite komplekti püsिमõõtmisvõimaluse.

Järgnevatel aastatel on plaanis hakata mõõtma veokite telgede kaalusid jooksvalt Eestit läbivatel transiitteedel ning oleks kasulik paigaldada mõõtepunktid ka nende lähedusse. See võimaldaks teha mõõtmisi ilma etalonveokiteta, kuna veokite kaalusid mõõdetakse paralleelselt katendi mõõtepunktis mõõdetavate väärtustega.

5.7 Praktlised tähelepanekud mõõtmistest ning mõõtepunktide rajamisest

Antud 15 anduri, laseri ja kaameraga mõõtmispunktid on Eestis esmakordsed ja varasem kogemus puudus. Mõõtmispunkte peaks arendama etappide kaupa ja pikema aja vältel.

Andurite, loggerite ja tarkvara paremaks testimisel objektil tuleb järelduste tegemiseks korraldama katsemõõtmised valides välja mööduvast liiklusest juhusliku veoki ning hiljem analüüsima, kas andmetest tuletatud graafikutel tekivad kõverad või jäävad väärtused samaks. Näiteks kausi või kaare kujulised graafikud näitavad, et andurid töötavad ja ühtlane sik-sak muster, et ei tööta. Voltmeetri etalonväärtus peab jääma samaks (5v). See tähendab, et 1 päevast testimisest jääb väheks ja analüüsimiseks oleks vaja lisapäeva. Lisaks oleks hea jagada andurid näiteks 2 tüübi kaupa eri inseneride vahel, sest 1 inimene ei jõua 15 anduri tööd korraga jälgida. Kindlasti on vajalik elektriiku/ elektrotehniku kohalolek katsetamisel, et jooksvalt parandada tekkinud tõrkeid. Antud objektil ei olnud piisavalt JR50 otsikuid ning eri mõõtepunktide vahel liikudes pidime käsitsi kõik juhtmed uuesti lahti keerama JR50 otsikute küljest ning need teises mõõtekohas taaskasutama. See lisab igas mõõtepunktis mitmeid tunde ettevalmistusele kuluvat aega. Lisaks kulus aega sassis kaablitele, mis vajasisid aega nõudvat harutamist. Kaablite kasutusele võttu hõlbutaks nende gruppide kokku teipimine ja ära tähistamine anduri liigi nimega (näiteks Percoandurid kokku jne). Antud juhul tehti see töö vahetult enne katseid. Vaiatu percojaam kasutab 2010 aastal tehtud loggerit, mis asub Soomes ja vajab omakorda erilist juhtmeid ja laadijat. Loggeri tarvikute kaasa panemist peaks enne kontrollima.

Igas punktis tasuks enne katseid kontrollida kõikide logeri blokkide tööd. Kaevu peidetud anduri kaablitelt oli vesi ja niiskus tähitused ära kulutanud ehk kaev pole parim kaablite säilitamise koht. Kuna km 2,1 ja Simuna Vaiatu teel oli mõõtepunkti kõrval ca 4m sügavune kraav, siis sai kraavi peale ehitatud ajutine platvorm.

Kaalumist hõlbustab, kui veokitel on oma kaalud autosse integreeritud. Vihm mõjutab veoki kaalu veest tekkiva lisaraskuse tõttu. Antud juhul kasutasime 2 kaalu, ideaalis

võiks neid olla 4. Kaalu täpsust peaks määrama protsendina $\pm 5\%$, kuna kaaludele sõites hüdraulikaga rataste kaal alati kõigub.

Videol peaks näha olema ideaalis mööduvad veokid, arvuti ekraani kell ja graafikud, kui ka teekattele joonistatud ruudulipud. Praktikas on teekatet võimalik filmida, kui tööplatvorm on teega tasa või kõrgemal nagu oli mõõtepunktis T35 km 7,5. Teistes kohtades ehitasime kraavi peale kõrgema platvormi, kuid need jäid siiski liiga madalaks.

Info maht sellistest rohkete ja üle 1000x sekundis mõõtvate anduritega on väga suur ulatudes miljonitesse Exceli ridadesse. Lisaks veel video, mis tähendab, et jooksvalt ei saa objektilt näiteks e-mailiga tulemusi saata ja võrguserverisse laadimine ei pruugi objektilt õnnestuda.

5.8 TTY ja Soome maanteeameti esindaja poolsed kommentaarid.

Tampere Tehnikaülikooli poolt oli koostatud kõikide andurite tarkvara (va. Percoandurid) , mida käidi projektmeeskonna poolt ka Tampere testimas enne tegelikke katseid. Lisaks konsulteeriti ülikooli vastavate spetsialistidega jooksvalt töö käigus. Kokkuvõttes kirjutas professor Pauli Kolisoja raskeveokite mõju uuringute hetke olukorra kohta järgneva ülevaate:

Soome teedevõrgu maksimaalsed lubatud veokaalused suurendati 2013. aasta sügisel. Alates sellest ajast on Tampere Tehnikaülikool (TTY) osalenud mitmetes raskeveokite koormamist uurivates uurimisprojektides. Enamik projekte on läbi viidud tihedas koostöös Roadscanners Oyga Soomest. Projektide peamised tulemused on järgmised:

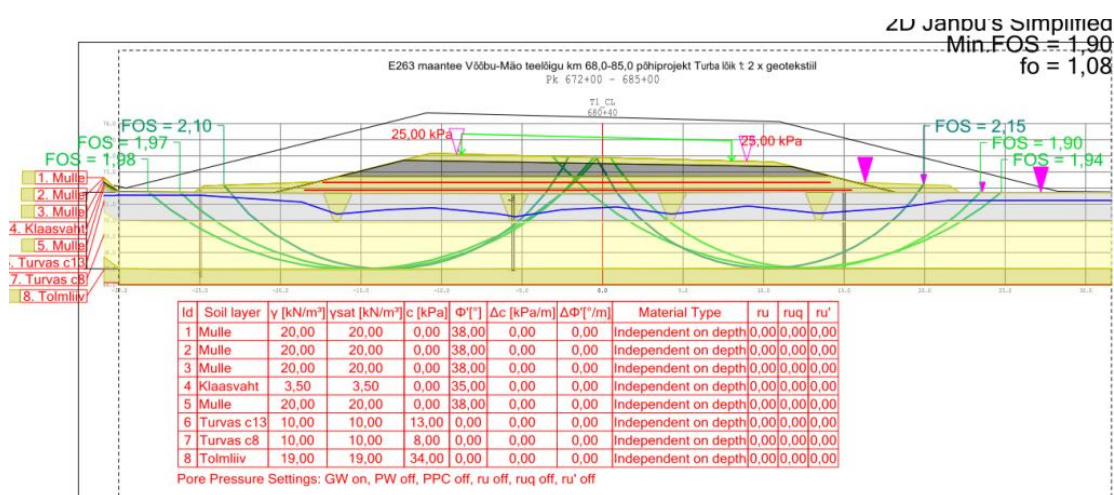
- Kitsa "vana põlvkonna" üksikrehviga varustatud raskete sõidukite telgede kahjulik mõju on mitmekordne võrreldes paarisratastega ja uue põlvkonna laiade rehvidega.
- Lisaks rehvitüübile mõjutab ka rehvirõhk raskete sõidukite kahjulikku mõju.
- Isegi kui lubatav veokite kaalu kasv saavutati Soomes suurendades telgede arvu, suurenesid ka telgede maksimaalsed massid. Näiteks kolme telje rühma puhul 240 kN kuni 270 kN. See suurendab tee koormust eriti pehmete aluspinnase piirkondades, kus järjestikuste telgede koormamise efekt on kumulatiivne.
- Kui järjestikuste telgede arv suureneb, siis kasvab iga järgnevast teljest tingitud deformatsioon. Tugevate teekonstruktsioonide puhul, mis toetuvad jäigale pinnasele, on mõju marginaalne, kuid niisketes tingimustes ja pehme pinnasega (eriti soistel aladel) mõju võib olla märkimisväärne. Kõige halvem stsenaarium on vee pumpamine märjast pinnasest tee konstruktsiooni, mis Soome mõõtmistulemuste põhjal võib põhjustada väga kiiret roopa arengut.
- Rattajälgede erinevus erinevate sõidukite vahel avaldab suurt mõju raskeveokite tekitatavale roopa arengule. Kui sõidukid sõidavad erinevates rattajälgedes , siis osaliselt järgnevad veokid tasandavad eelmiste veokite tekitatud roopaid. Samas kui sõidetakse samas rattajäljes kasvab ka roobas.

Käesolevast aruandest saab ülevaate raskete veoautode koormuskatsetest kolmes Eesti katsepunktis 2018. aasta sügisel. Katsetulemused on varasemate Soome kogemustega hästi kooskõlas, kuigi kõik eespool nimetatud küsimusi ei ole veel põhjalikult uuritud.

Valitud testimiskohad on kahtlemata asjakohased sellist tüüpi uuringute jaoks ja koos TTÜga komplekteeritud andurite komplekt on häid tulemusi andnud. Seepärast on väga soovitatav, et uuringud jätkuvad ka tulevikus Eesti piirkonna tingimustes.

Lisaks on oldud ühenduses Soome maanteemati geotehnika osakonna spetsialistidega ning saadud järgnevad kommentaarid:

Antud uurimistöö tähtsaim leid on, et tee lagunemise suurim mõjutaja on teljekoormuse ja telgede paigutamine tulenev kontaktpinge. Veoki kogumass muutub oluliseks ainult siis, kui arvutatakse kogu muldkeha stabiilsust.



Joonis 36. Näide mulde stabiilsusarvutusest , kus liikluskoormus on erakordselt suurena arvesse võetud – 25kPa. (M.Olep 2016)

Staatiline koormusega konstruktsioonid peaksidki olema eraldatud ja näiteks asfaldi omadused peaksid olema täiesti teistsugused , kui dünaamilise koormuse puhul.

Andurite mõõtelulemustesse peaksi suhtuma alati teatava skeptilisusega. Eriti kui mõõdetakse kiireid dünaamilisi muutusi muldes ja näiteks Percoandurid mõõdavad kaudseid , mitte otseseid muutusi.

Oleks oluline teha analoogseid mõõtmisi kogu riiki katva võrguna, et saaks eristada konkreetse mõõtepunkti tulemusi, teeklasside mõtetulemusi ja teevõrgu mõõtetulemusi. Sellist andmebaasi pole veel ka Soomes

Veokite kandevõime tõusu ja üleminekuga 7-8- ja 9-teljelistele sõidukikombinatsioonidega on Soomes kokku hoitud aastas ca 30 miljonit sõidukilomeetrit. Raskeveokite läbisõidud moodustavad ligikaudu 3% vedude koguarvust Soomes. Tulemusena oli kulude kokkuhoid ligikaudu 58 miljonit eurot 2015. aastal ja CO2 emissioon vähenes 0,07Mt. Kuigi säästud on olulised, on need väiksemad kui pooled ennustatust (vt Nykänen & Liimatainen 2014).

6 KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED

Käesoleva töö raames rajati Ida-Virumaal 2 eri tugevusega pinnasel asetsevat mõõtejaama teel nr T35 ning täiendati läheduses olnud 2014 aastal rajatud Simuna Vaiatu mõõtepunkti. Kõik kolm mõõtepunkti on töökorras ja võimaldavad teha mõõtmisi ning nende eeskujul ehitada ka uusi jaamu mujale Eestisse.

Rajatud ja täiendatud 3 mõõtepunktis teostati kokku 48 etalonveokite ülesõitu, mille käigus mõõdeti eraldi iga anduri poolt registreeritud ülesõite kokku 1344. Katsetustest saadud info analüüsimisel on jõutud järgmiste järeldusteni:

1. 52 t veoki, millel on paarisrattad ja 7 telge (joonis 19) , poolt teekattes tekitatud pinged on 1,6% keskmiselt väiksemad, kui 40 t (joonis 17) üksikrattastega veoki ja 2,1% keskmiselt väiksemad kui 44 t (joonis 18) veoki tekitatud pinged (Tabel 6a).
2. 60 t paarisrattastega 7-teljelise veoki (joonis 20) tekitatud pinged olid 0,1% keskmiselt suuremad, kui 40 t üksikrattastega veoki mõju ja 0,4% keskmiselt väiksemad kui 44 t veoki mõju (Tabel 6a).
3. Veoki täismassi mõju teekatendile sõltub kõige enam rehvide arvust ja laiustest – mida pikemad on telgede vahed ja laiemad on rehvid, seda vähem koormab see teekatendit (Tabel 6a ja 7a). Lisaks sõltub täismassi mõju niiskusrežiimist ja katendi kandevõimest.
4. Teekatte lagunemisele aitavad kaasa kõige enam vanad (nt joonis 31 Michelin) kitsad alla 490 mm laiusega üksikrattad, ülekoormatud veokid ja kevadised ning sügisesed sulamise/jäätumise tsüklid. (Kasutaud kirjandus 1,5,7,10).
5. Uued laiemad üksikrattad on ligilähedaselt sama mõjuga, kui paarisrattad ning vanad kitsad alla 490 mm laiusega rattad kuni 2,5 korda kahjulikumad, kui paarisrattad (TTY Finland HCT-mittaukset 2015-2017 raportti).
6. Liigniisketes piirkondades tuleks ette näha kevadised ja sügisesed koormuspiirangud. Soome halvast kogemustest lähtudes ei tohiks lubada suurendada maksimaalset teljele lubatavat koormust (p 5.8).
7. Laiema pildi saamiseks peaks katsepunktide võrgustikku laiendama üle kogu Eesti (p 5.6).
8. Rahuldavas seisukorras ja kuivale teekattele ei teki väikeste vahedega sõitvatest 40-60t kaaluvatest veokitest mõõdetavat jäävat deformatsiooni ehk roobast (p 5.2).
9. 2018. aasta sildasid ületavate veokite seire põhjal selgub, et suurim oht Eesti teedele on ca 11% kõikidest veokitest, kes sõidavad ülekaalus (p 5.3).
- 10. Kui 52-tonnisel veokil on 7 telge ja paarisrattad või üle 490mm laiad üksirehvid, siis võib selliseid veokeid lubada teedele ilma eriloata.**

Enne uute mõõtepunktide ehitust tuleks selle töö raames rajatud punktides teha veel mõõtmisi sulamis-jäätumistsüklite ajal. Samuti annaks hea võrdluse regulaarselt kevadel sügisel tehtavad mõõtmised, kui praegu värselt rekonstrueeritud tee nr T35

peenrad täis kasvavad, vee režiim muutub ning asfalt hakkab kuluma. Telgede lisandumise ja veokipikkuse kasvades kasvab ka liiklusohtlikkus külgslibisemise puhul, mida tuleb veel uurida. Soome mõõtmiste puhul on liigniiskes piirkonnas mõõdetud kiiret roopa tekkimist, mida selle töö raames kuiva mulde puhul ei tekkinud.

7 SUMMARY

Within the framework of this work, Ida-Virumaa was built on a measuring platform T35 located on 2 different locations in the Ida-Viru area and complemented the Simuna Vaiatu measuring point in 2014. All three measuring points are operational and allow measurements to be made and also build new stations in other regions of Estonia.

A total of 48 truck by-passes were made at 3 measuring points, during which a total of 1344 single passes of each sensor were recorded. Analyzing the information obtained from the tests, the following conclusions have been reached:

1. The impact of a 52-tonne 7-axle truck (drawing 19) with twin wheels to road embankment is in average 1,6 % less than 40t (drawing 17) and in average 2,1% less than of a 44-tonne single wheeled truck (drawing 18) with a 6 axles and single wheels (Table 6a).
2. The impact of a 60-tonne 7-axle truck (drawing 20) with twin wheels to road embankment is in average 0,1% higher than of a 40-tonne truck and in average 0,4% less than 44 tonne truck with single wheels.
3. The impact of gross weight of the truck to pavement is dependent of number of axles, type of tires, distance between the axles- wider the wheels and longer the distances between axles less impact occurs (Table 6a 7a). Soil moisture regime and the load capacity of the pavement is also important factors of road bearing capacity.
4. The old narrow less than 490mm wide single wheels (drawing 31 Michelin) , overloaded vehicles and spring and autumn melt-thaw cycles are most likely to damage the pavement (used literature 1,5,7,10).
5. The new wider single wheels have roughly the same effect as the twin wheels and old less than 490mm wide wheels have about 2,5 times larger impact to embankment (TTY Finland HCT-mittaukset 2015-2017 raportti).
6. Spring and autumn load limits should be foreseen for high surface water areas. In the light of the poor experience of Finland, it should not be allowed to increase the maximum permissible axle load.
7. To get a wider picture, the network of test points should be expanded throughout Estonia (p5.6).
8. For roads in a satisfactory and dry condition no significant deformation from the heavy trucks what drive in row will occur (p 5.2).
9. On the basis of the monitoring of 2018 bridges, it appears that the biggest threat to Estonian roads is that about 11% of all lorries are driven with overload (p 5.3).
- 10. In case of 52 t truck having 7 axles, twin wheel or over 490 mm wheels there is no need to require overweight permit.**

Before the construction of new measuring points, it would be worthwhile to carry out measurements at the points constructed in this work, and in particular during the melt-thaw cycles. It would also provide a good comparison of the measurements made in autumn on a regular basis, if the T35 is currently freshly reconstructed, the water regime will change and asphalt will begin to wear out. With longer trucks also the road safety decreases. In wet condition there has been measured rapid rutting in Finland but not in this test section in dry conditions.

VIIDATUD ALLIKAD JA KASUTATUD KIRJANDUS

Allikad on loetletud peatükis 1.2 Lähteandmed

Töö on vormistatud vastavalt TTKs kehtivale juhendile - <http://www.tktk.ee/uliopilasele/oppetoo/kirjalike-toode-vormistamise-juhend>

Kasutatud kirjandus:

1. TTY Finland 2014 Raskaiden ajoneuvojen rengastuksen vaikutus tierasitukseen
2. Riiklik Teederegister <https://teeregister.riik.ee/mnt/index.do>
3. Selector Projekt OÜ 2017 Iisaku–Tudulinna teelõigu rekonstrueerimine ja Tagajõe sillaremont
4. YIT Infra Eesti AS – Iisaku–Tudulinna teelõigu rekonstrueerimine : tööde ajagraafik
5. TTY Finland HCT-mittaukset 2015-2017 raportti
6. Effects of Heavy-vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance (Thomas D. Gillespie 1993)
7. Sojusednii Üksik ja Paariratta mõju konstruktsioonile 1990a
8. Оценка влияния тяжелых грузовых автоперевозок на дорожные конструкции, Soome Venemaa 2011 ja 2012.
9. CEDR Task Group N4 (Heavy Vehicles) as appendices of CEDR Report 2017/05 – Conditions for efficient road transport in Europe.
10. Liikenneviraston ohje LO 38/2018 Tierakenteen suunnittelu Suomi 2018
11. Sõidukite masside ja teljekoormuse seire II vahearuanne, TKTK ja ViaCon 2018

LISADE SISUKORD

1. Mõõtmistulemuste graafikud (61 lk)
2. Fotod (digitaalses formaadis)
3. Videod (digitaalses formaadis)
4. Mõõtmistulemused (Exceli formaadis)

Lisa 1

MÕÕTMISTULEMUSTE GRAAFIKUD