



MASINAEHITUSE INSTITUUT
Tootearenduse õppetool

MES70LT

Roger Kripus

Tulevikusõiduki analüüs „Wheelie“ näitel

Autor taotleb
tehnikateaduse magistri
akadeemilist kraadi

Tallinn
2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”.....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....201... a.

..... allkiri

Magistritöö ülesanne

2015 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Roger Krinpus, MATM143899

Õppekava MATM01

Eriala: Tootearendus ja tootmistehnika

Juhendaja: Dotsent, Toivo Tähemaa

MAGISTRITÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Tulevikusõiduki analüüs „Wheelie“ näitel

(inglise keeles) Analysis of Future Vehicle Based on „Wheelie“

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Tänapäeva ja tuleviku autokasutuse uurimine	04.04.2015
2.	LCA analüüsi läbiviimine	14.04.2015
3.	Konstruktsiooni analüüsi läbiviimine	22.04.2015
4.	Suurratta erinevate lahenduste projekteerimine	05.05.2015

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Lähtudes tulevikuautode ideedest, tehakse olemasolevale „Wheelie“ sõidukile erinevad analüüsid, mille tulemusena optimeeritakse masina tootmist ja konstruktsiooni.

Täiendavad märkused ja nõuded:.....

Töö keel: eesti

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt

Töö esitamise tähtaeg.....

Üliõpilane

/allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja.....

/allkiri/ kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

Magistritöö ülesanne	3
Eessõna.....	7
SISSEJUHATUS.....	8
1. AUTOKASUTUS TÄNAPÄEVAL JA TULEVIKUS.....	11
1.1. Prognoositav autokasutus	11
1.2. Tüüpilised autokasutajad.....	14
1.3. Tänapäeva auto.....	18
1.4. Tulevikuauto.....	20
1.4.1. Tulevikuauto mootor	21
1.4.2. Visioonid tulevikuautodest.....	24
1.5. Küsitlus.....	28
2. OPTIMEERIMINE	33
2.1. LCA analüüs.....	33
2.1.1. Toote elutsükli kirjeldus.....	33
2.1.2. Toote elutsükli kaart ja piirid	35
2.1.3. Key Performance Indicators (KPI).....	36
2.2. Toote elutsükli kirjeldus.....	37
2.2.1. Teras tootmine	37
2.2.2. Kasutusel olevad materjalid	40
2.2.3. Kinnitusdetailid	42
2.2.4. Projekteerimine	42
2.2.5. Lintsaega lõikamine	44
2.2.6. Puurimine	46
2.2.7. Keevitamine	47
2.2.8. Värvimine.....	49

2.2.9. Komplekteerimine	51
2.2.10. Analüüsi kokkuvõte.....	52
2.2.11. Simulatsioonid.....	53
2.3. Konstruksiooni analüüs	58
2.3.1. Suurratta tugevusarvutused	58
2.3.2. Sisemise raami tugevusarvutus	66
2.3.3. Rulliku ja telje tugevusarvutus	71
2.3.4. Redelraami arvutused	74
2.3.5. Sisemise raami optimeerimine	78
2.3.6. Redelraami kontrollarvutus programmiga ANSYS	81
2.3.7. Redelraami kontrollarvutus käsitsi	84
2.3.8. Sisemise raami optimeerimise kokkuvõte.....	85
2.3.9. Poltliidete optimeerimine	85
3. ARVUTUSED JA ERINEVAD LAHENDUSED	89
3.1. Laagrite arvutused	89
3.1.1. Laagrite eluiga.....	89
3.1.2. Laagritele vajaminev minimaalne jõud	91
3.1.3. Laagrites tekkiv hõõrdejõud ja jõukadu	91
3.2. Jõuajami arvutus.....	93
3.3. Suurratta erinevad lahendused	95
4. KOKKUVÕTE.....	100
5. SUMMARY	105
6. KASUTATUD KIRJANDUS	109
7. LISAD	111
7.1. Küsimustik	111
7.2. Joonis 1. „Wheelie“	113
7.3. Joonis 2. Kolmnurkraam	114

7.4. Joonis 3. Alusraam	115
7.5. Joonis 4. Suur ja vedav ratas	116
7.6. Joonis 5. Rullik+laagrid+telg	117
7.7. Joonis 6. Telg	118
7.8. Joonis 7. Optimeeritud „Wheelie“	119
7.9. Joonis 8. Optimeeritud kolmnurkraam	120
7.10. Joonis 9. Optimeeritud alusraam	121
7.11. Joonis 10. Suur ja vedav ratas – lahendused nr. 1 ja 2	122
7.12. Joonis 11. Suur ja vedav ratas – lahendused nr. 3 ja 4	123
7.13. Joonis 12. Suur ja vedav ratas – lahendused nr. 5 ja 6	124

Eessõna

Lõputöö teema on välja valitud antud töö autori poolt põhinedes 2014. aasta sügissemestril õpitud aine „“ raames valmis ehitatud tudengiprojektil „Wheelie“. Töö juhendajaks on Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanikateaduskonna Masinaehituse instituudi Tootearenduse õppetooli dotsent Toivo Tähemaa, kes oli ka läbitud aine üks õppejõududest. Teema tekkis soovist arendada tudengiprojektist välja reaalne toode tulevikuturul.

Andmete kogumiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogust laenutatud raamatuid, internetist leiduvaid teadusartikleid ning õppejõududega konsultatsioone..

Autor avaldab tänu Toivo Tähemaale lõputöö teema väljapakkumise, rea kasulike ettepanekute ja töö vormistamise abi eest. Samuti soovib autor tänada „Wheelie“ meeskonda ja kaastudengit Kaspar Komissarovi ühiste pingutuste eest.

SISSEJUHATUS

Lõputöö teema sai välja valitud „Wheelie“ projekti analüüsimise ja edasiarendamise võimalusest. Algpärase meelelahutusliku sõiduki potentsiaal tulevikuautona tundus autorile reaalne ning sellepärast võeti suund just sellele valdkonnale. Hetkel väga aktuaalse teemana käsitletakse tuleviku autotööstust ning küsimusi sellel teemal on palju. Autonduse erinevate osade uurimusi on tehtud palju ning selles töös kasutatakse neid, et saada arendada „Wheelie“ projekt järgmisele tasandile. Samuti on selline teema tähelepanuväärne oma uudsusega, sest sarnaseid töid pole palju avaldatud.

Antud töös ei hakatud projekteerima tulevikuautot täiesti nullist, vaid valiti edasiarendamiseks juba olemasolev sõiduk „Wheelie“, sest autor nägi liikumisvahendis suurt potentsiaali olevat futuristlik masin. Sellise kindluse andis asjaolu, et „Wheelie“ prototüüp oli tavainimeste seas väga populaarne ning peaaegu kõik sõlmed ja süsteemid töötasid tõrgeteta. Sellele lisaks meenutas juba esialgne mudel veidi erinevate autofirmade tulevikuautode disaine.

Rääkides tulevikuautodest, peetakse silmas aastatel 2020-2030 tulevaid sõidukeid ja sellega seoses tuleb mõelda selles töös väga suurelt ning üritada see siduda praeguste reaalsete ja peagi tulevate lahendustega. Visioonid teistest tulevikusõiduvahenditest on peamiselt vaid jooniste tasandil, kuid antud töö on teistsugune, sest põhjalikult analüüsitakse nii „Wheelie“ konstruktsiooni kui ka lahenduste töökindlust. Vaatluse alla võetakse samuti kogu sõiduki valmistamisprotsess oma tootmisetappidega.

Lõputöö eesmärgiks on analüüsida tulevikuautondust uurides „Wheelie“ konstruktsiooni, lahendusi ja tootmisprotsesse. Töö keskendub valmistatud „Wheelie“ prototüübi optimeerimisele ja üritatakse simuleerida protsessi, kui tootmine on viidud massidesse. Lõpptulemusena jõutakse töös parandatud lahenduseni ja leitakse paremad tootmisviisid kogu sõidukile.

Autondus on hetkel seismas silmitsi kütuseprobleemiga ning sellest tulenevalt üritatakse leida sobiv jõuallikas, mis oleks nii keskkonnasõbralik kui ka efektiivne. Praegu on väga suur enamik autosid kas bensiini või diisli abil sõitvad, kuid üha enam minnakse elektri- ja vesinikmootorite peale. Samuti on probleemiks kujunenud inimeste arvu kiire kasvamine, millega jääb suurtes linnades aina vähem ruumi. Nii tuleb hakata otsima lahendust autode parkimise lahendustele ja suurte autode aeg hakkab otsa saama.

Selleks, et seda valdkonda põhjalikult uurida, kasutati juba tehtud analüüse tulevikuautonduse prognoosimisel. Selleks kasutati põhiliselt kahte artiklit, milleks olid Inglismaa teadlase Phil Goodwin'i „Peak Travel, Peak Car and the Future of Mobility“ ning USA teadlaste A. Schafer'i ja D.G. Victor'i „The Future Mobility of the World Population“. Mõlemad kirjatükid keskendusid samale teemale, kuid veidi teistsuguse nurga alt ja nende kokkuviiimisel saadi suurem pilt sellest valdkonnast.

Oluliseks uurimisteenaks antud töös on tulevikuautodel kasutatava jõuallika potentsiaal ja lõpuks ka selle valik. Selle uurimiseks oli väga suureks abiks artikkel „Comparative Analysis of Battery Electric, Hydrogen Fuel Cell and Hybrid Vehicles in a Future Sustainable Road Transport System“, mille oli koostanud teadlaste meeskond, kuhu kuulusid G.J. Offer, D. Howey, M. Contestabile, R. Clauge ja N.P. Brandon. Uurimustöös analüüsiti erinevate mootorite võimekust ning potentsiaali tulevikuautonduses.

„Wheelie“ sisemise raami LCA analüüsi tulemusena saadakse teada kogu valmistamisprotsessi mõju nii keskkonnlikus, majanduslikus kui ka kvaliteetses võtmes. Arvutustel ja uurimustel kasutati materjale Tallinna Tehnikaülikooli ainst „Maksumus- ja keskkonnakeskne projekteerimine“. Analüüsile andis kasulikke näpunäiteid aine praktikumi õppejõud nooremteadur Ahti Põlder. LCA analüüsi tulemusena leitakse esialgselt valitud KPI'le kogu tootmisprotsessis olevatele osadele väärtused ning võrreldakse neid omavahel, et leida kitsaskohad. Seejärel tehakse mõned simulatsioonid ning uuritakse, kas muudatused toovad kaasa parendused.

Lõputöös võetakse ülesandeks analüüsida ka „Wheelie“ konstruktsioon, et saada teada, millised on sõiduki nõrgad kohad ning millised on üledimensioneeritud. Arvutustes kasutatakse LEM-i meetodil põhinevat arvutusprogrammi ANSYS Workbench 14.5. Kõik eelnevad 3D mudelid koostatakse SolidWorks2013 CAD programmis. Leitud kriitilised kohad kontrollitakse üle veel ka käsitsi arvutustega, mille abiks oli suuresti Priit Kulu koostatud „Mehaanikainseneri käsiraamat, 2. trükk“. Analüüsi tulemusena tehakse ettepanekud konstruktsiooni muutmiseks ning kontrollitakse optimeeritud lahenduste tugevust arvutuste teel.

Pärast kõiki vajalikke arvutusi, hakati otsima uusi lahendusi kõige probleemsemale sõlmele. „Wheelie“ prototüübi pealt nähti, et selleks oli suure ja vedava ratta vaheline kontakt. Koos sellega üritatakse lahendada suurratta liigse libisemise probleem. Lahendusi pakutakse välja erinevaid, arvestades siiski kogu sõiduki turvalisust.

Lõpuks pannakse kokku kõik optimeeritud osad ning uued lahendused ja valmib täiustatud „Wheelie“, mille väikesel täiustamisel nii väliselt kui ka sisemuselt, saadaks tõsiseltvõetav tulevikusõiduk. Kogu lõputöö püstitab sellele hea aluse ning annab põhjaliku materjali kõigile tulevikus samale teemale keskenduvatele inimestele.

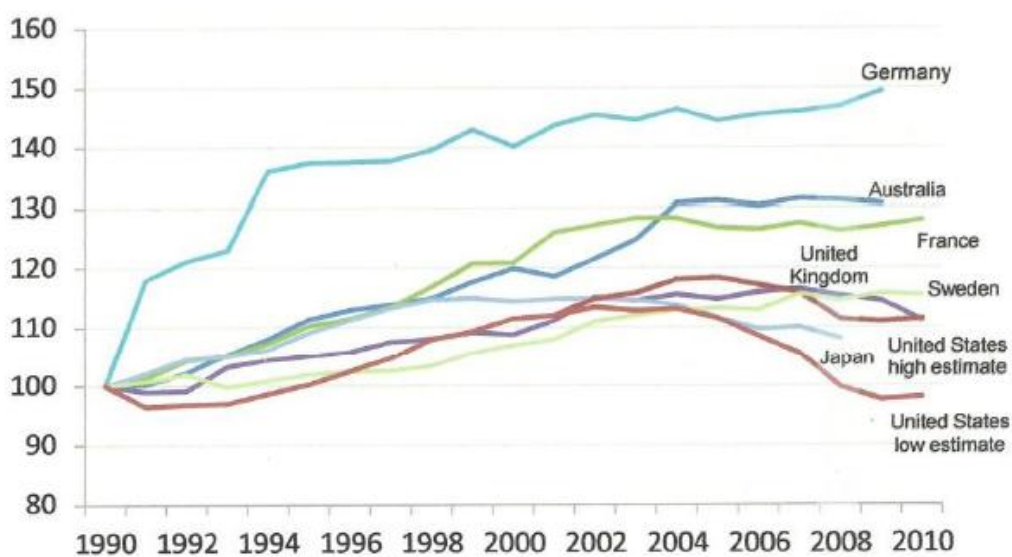
1. AUTOKASUTUS TÄNAPÄEVAL JA TULEVIKUS

Antud peatükis analüüsitakse autode kasutust minevikus, tänapäeval ning tehakse fakte põhjal ennustusi tuleviku kohta. Taoline uurimus on vajalik, et teha kindlaks, kas auto-sarnaste sõidukite arendamisel ning täiustamisel on mõtet. Samuti saab teada, mis vanusegrupile ning kui suure sissetulekuga inimestele oleks vaja kõige rohkem tähelepanu pöörata. Analüüsist tulevad ka tulemused riikide lõikes, et näha, kuidas erinevad regioonid reageerivad autostumisele. Peatükis vaadatakse, kas sõidukite kasutamine sõltub vaid majandusest või on sel ka teised tegurid mängus. Kõiki tegureid võrreldakse „Wheelie“ aspekti arvestades ja analüüsitakse, kas antud tegurid on olemas ka sellel sõidukil.

Selles punktis uuritakse ka hetkel populaarsemaid automarke ning tehakse kindlaks, miks on just need müügi tabelite tipus. Nendest tulemustest lähtuvalt pakutakse välja tulevikuautole vajalikke omadusi ning uuritakse ka, milline peaks olema selle sõiduki jõuallikas. Lõpus tuuakse välja enamlevinud tulevikuautode ideed ning leitakse sarnaseid jooni nendes. Uuritakse, mis sellistel projektidel on tugevateks ning nõrkadeks kohtadeks.

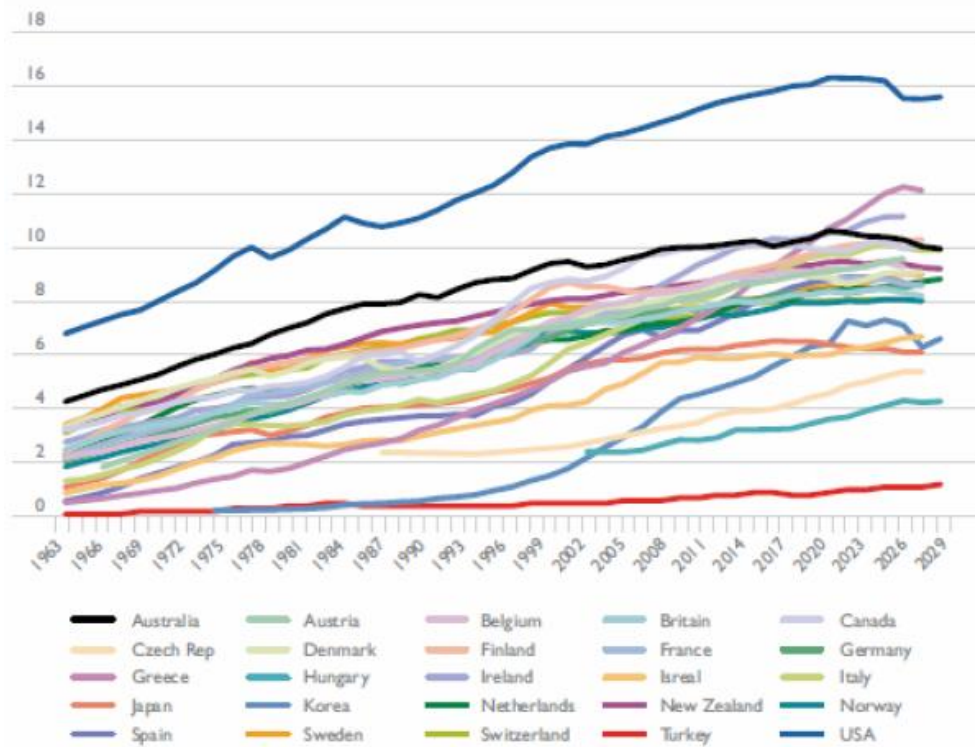
1.1. Prognoositav autokasutus

Aastal 2012 avaldas Inglismaa teadlane Phil Goodwin koos oma kolleegidega autode kasutamise uurimuse. Uurimuses analüüsiti 25 erineva riigi sõidukite kasutamist inimeste poolt [1]. Kõige tähtsam oli see, et keskenduti ainult eraautodele ehk siis ei arvestatud ühistranspordiga ka kergliiklusvahendeid, mis on antud lõputöö temale väga kohane.



Sele 1.1. Autokasutus erinevate riikides aastatel 1991-2010 (kilomeetrit päevas) [1]

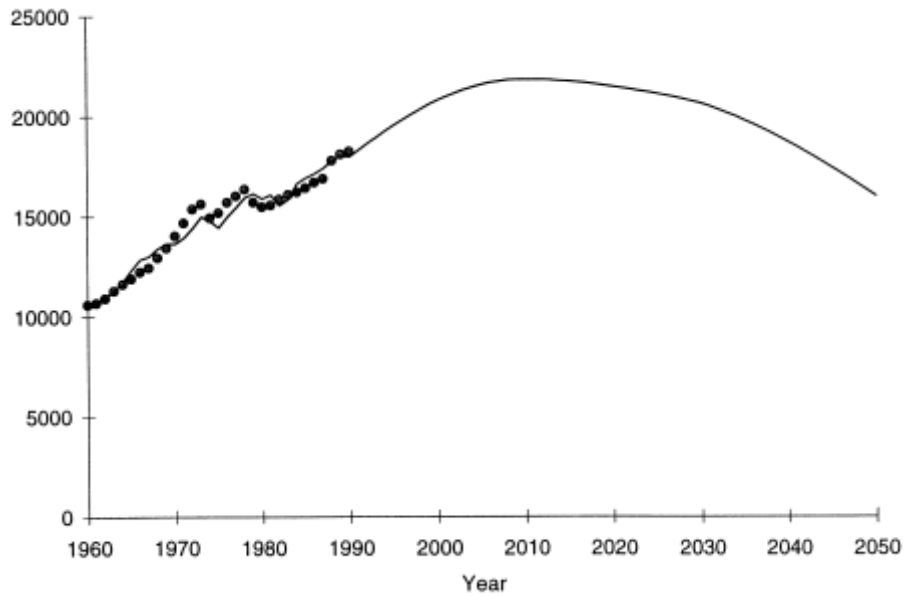
Eelneval seel [Sele 1.1] on näha tulemuste põhjal tehtud graafikut suurimate riikide kohta. 1990. aastast alates kuni 2005. aastani toimus autode kasutamise suurenemine, kuid sellest hetkest alates on trend kas stabiliseerunud või isegi hakanud langema. Tulemuste põhjal tehti kõigi 25 riigi kohta prognoos, kuidas võiks graafik kujuneda tulevikus ning seda on näha järgnevalt seelt [Sele 1.2].



Sele 1.2. Ühe inimese autokasutuse prognoos 25 riigile (*1000 kilomeetrit aastas) [1]

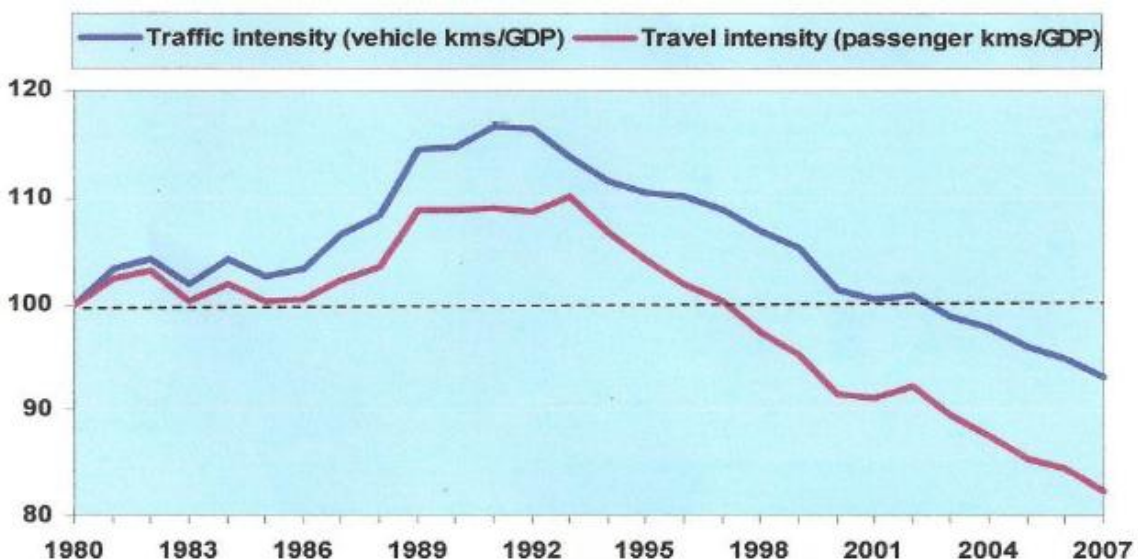
Nagu näha graafikult, siis ka tehtud prognoos näitab, et autode kasutus kas stabiliseerub või kahaneb. Ainukene erand terves uuringus on Türgi, kelle autokasutus inimeste hulgas kasvab. Sama arvatakse toimuvat ka aeglasema arenguga maades.

Paralleelselt Schipperiga uurisid sama teemat ka A. Schafer ja D. Victor, kelle arvutused andsid täpselt samasuguse pildi [2]. Nende prognoos ning aastate jooksul saadud saadud tulemused olid väga sarnased [Sele 1.3] ning sellest tulenevalt tundub, et arvutused ja uurimustöö on piisavalt tõesed, et neile toetuda.



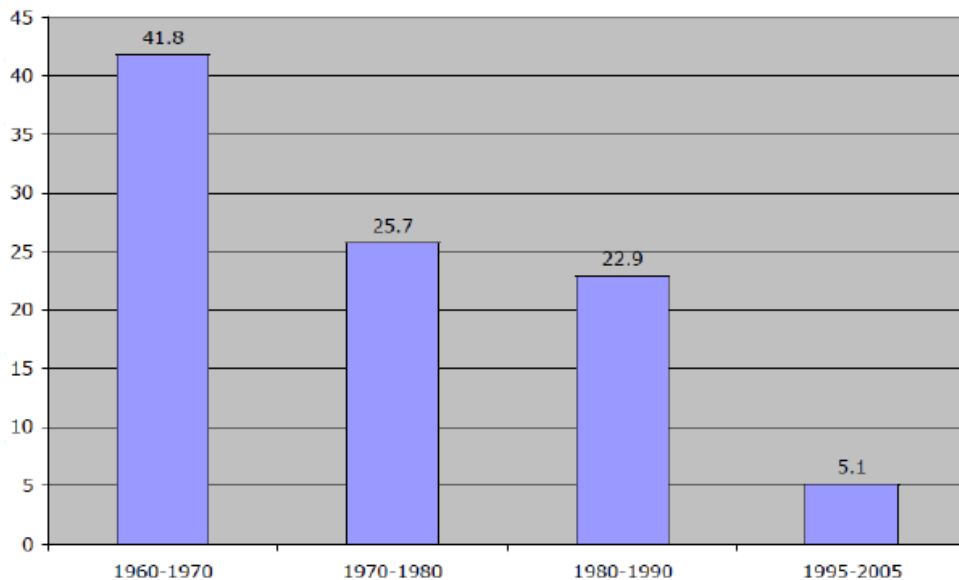
Sele 1.3. Schaferi ja Victori tehtud autokasutuse prognoos [2]

Suurtes linnades on juba mitmel viimasel aastal olnud suur langus autode kasutamises. See tuleneb kõige rohkem sellest, et linnad on ülerahvastatud ning ühistransport on juba nii heal tasemel, et sellega liigeldes on inimestel nii odavam kui ka mugavam liikuda kui omaenda autoga. Ekspertid usuvad, et graafikujoone tõusunurga saavutamiseks on vaja inimkonnal astuda autonduses järgnev samm. Tüüpilist suurlinna graafikut ilmestab väga hästi Londoni statistika [Sele 1.4].



Sele 1.4. Londoni liikluse ja autokasutajate kujunemine [1]

Paljud statistikud on samuti kogunud infot autode ostu ning nende kasutamise kohta ja hästi ilmestavad ka need graafikud, et aastatega autokasutuse suurenemine inimese kohta aina väheneb. Niimoodi saab lugeda ka välja Newman'i ja Kenworthy kogitud näitajatest moodustatud tulpadest [Sele 1.5].

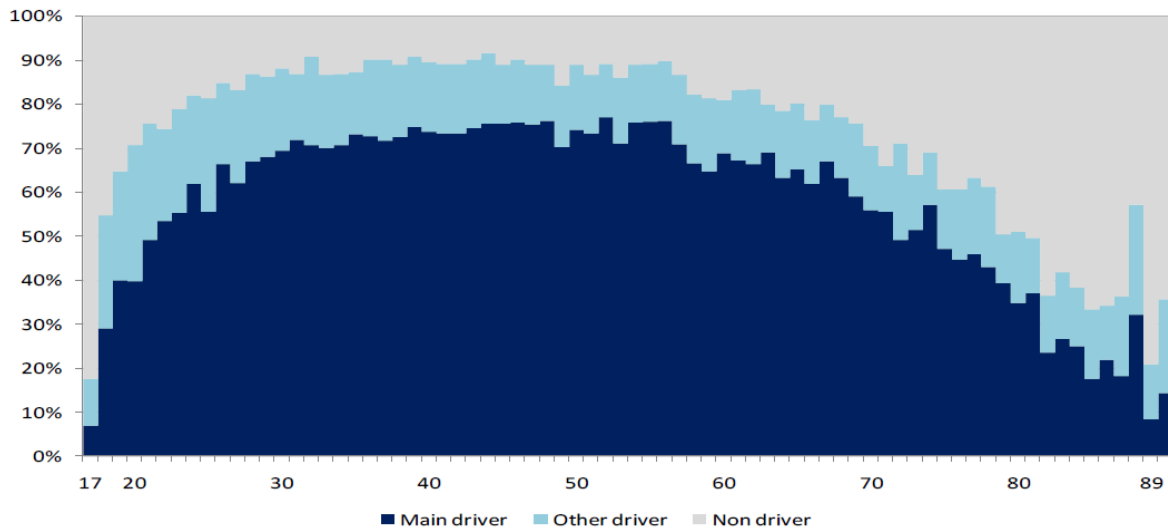


Sele 1.5. Autokasutajate arvu tõus protsendiliselt aastate jooksul [1]

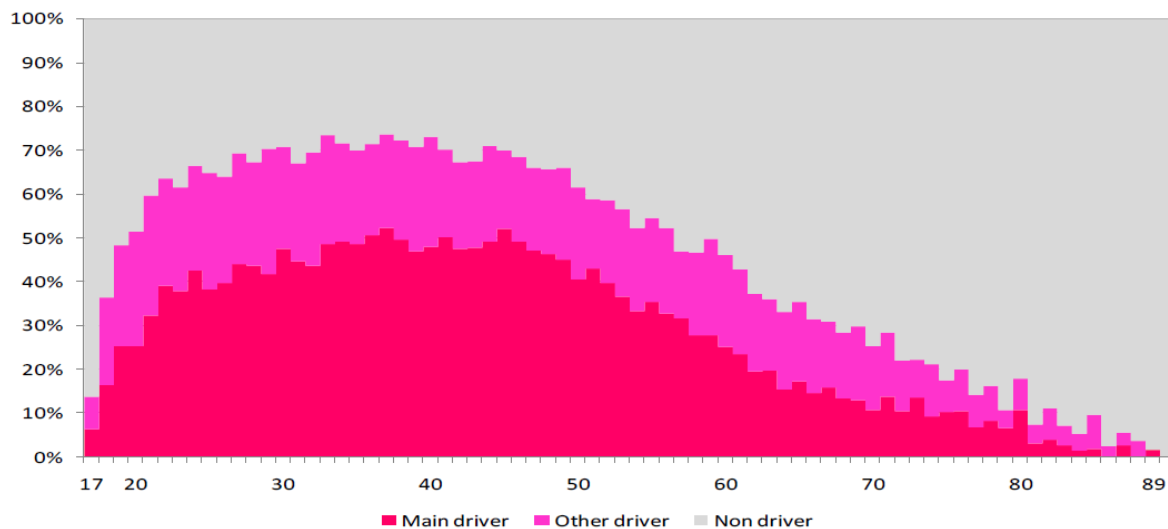
1.2. Tüüpilised autokasutajad

Eelnev punkti tõestas asjaolu, et autode kasutus järgnevatel aastatel veel veidi suureneb, kuid siis stabiliseerub. Sellele toetudes saab kindlalt väita, et autodel on ka tulevikus oma koht inimühiskonnas. Selleks, et teada saada, milline on keskmine inimene, kellele tuleks autot projekteerida tulevikus, peab uurima autode kasutajate ajalugu ning kuidas see aegade jooksul on kujunemas.

Aastatel 1988-1995 olid enamik autojuhtidest mehed ning naine autoroolis oli väga harv nähtus [1]. Seega oli autondus täielikult meeste pärusmaa ja sõidukeid toodeti nii, et need meeldiksid eelkõige neile. Nii meeste kui ka naiste seas saadi sel perioodil autorooli kohe 17 aastastelt, kuid autokasutajate hulk hakkas vähenema 50 aastaste piirist [Sele 1.6, Sele 1.7].

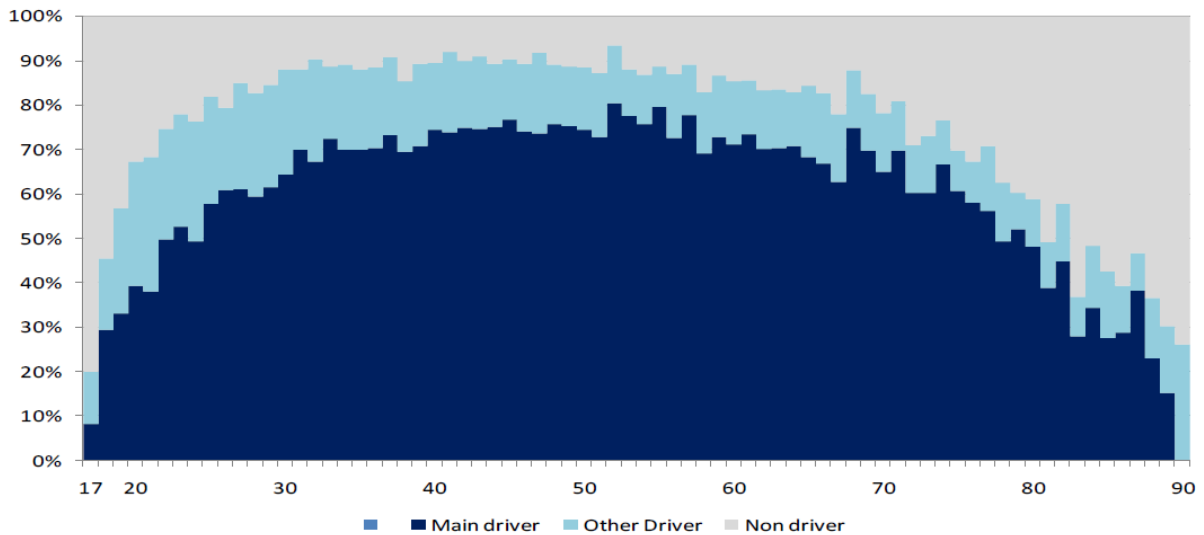


Sele 1.6. Meeste autokasutus aastatel 1988-1995 [1]

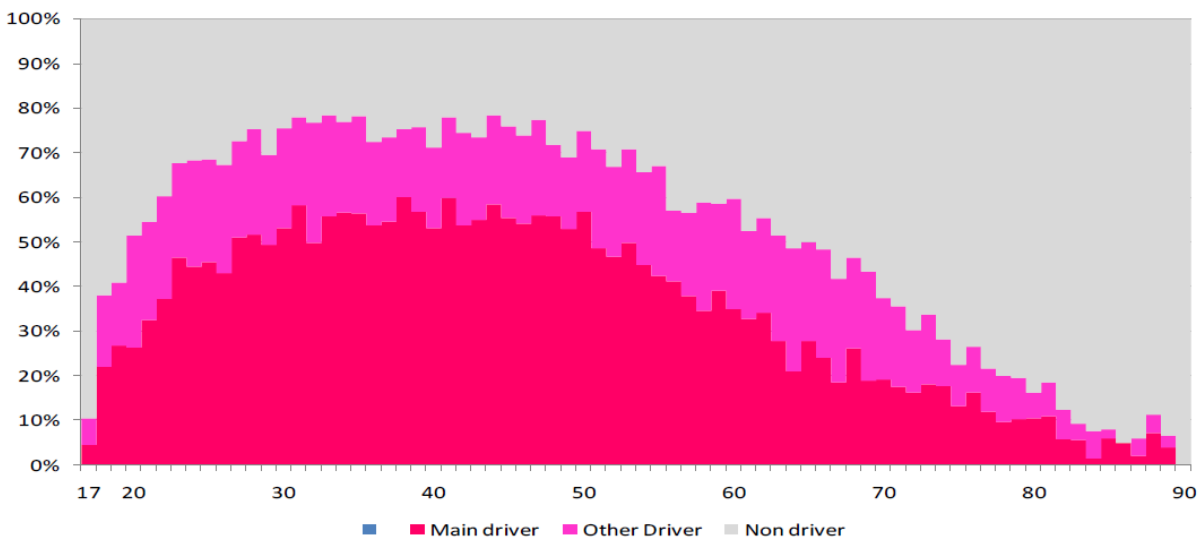


Sele 1.7. Naiste autokasutus aastatel 1988-1995 [1]

Aastatel 1995-2001 oli meeste osakaal autoroolis ikka veel märgatavalt suurem kui naistel, kuid kui meeste osakaal võrreldes eelnevate aastatega ei muutunud, siis naiste osakaal tõusis peaaegu 10% [1]. Graafikutelt [Sele 1.8, Sele 1.9] on näha, et enam ei alustatud autojuhtimisega kohe 17 aastasel, vaid tõus on graafikul veidi laugem. Samuti on märgata, et autoroolis istuvad aina vanemad inimesed.

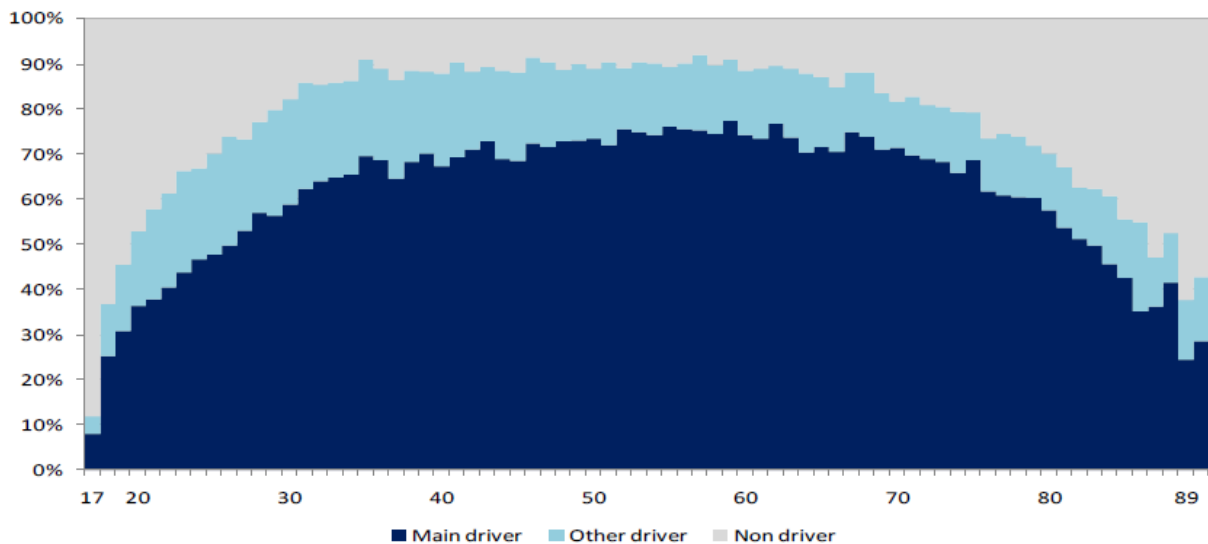


Sele 1.8. Meeste autokasutus aastatel 1995-2001 [1]

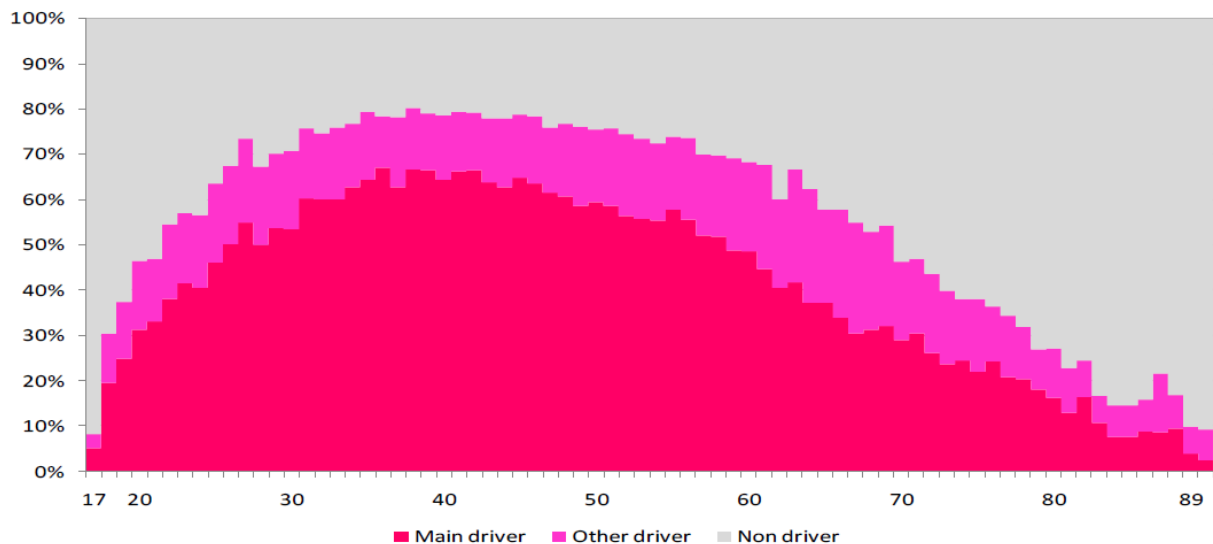


Sele 1.9. Naiste autokasutus aastetel 1995-2001 [1]

Aastatel 2002-2008 tõuseb naiste osakaal autoroolis peaaegu samale tasemele, mis on meestel [Sele 1.10, Sele 1.11]. Huvitavaks muutub asjaolu, et autokasutajate vanus ühtlustub. Näiteks on 90 aastaseid vanamehi autoroolis rohkem kui seda on 18 aastaseid poisse. See omakorda tähendab autotootjatele, et nüüd on vaja mõelda kogu inimkonnale – auto peaks olema sobiv nii 80 aastastele prouadele kui ka noortele poistest uljaspeadele. Kuna nii universaalset sõidukit on raske välja mõelda, siis spetsialiseerutakse enamasti ühele mingisuguse kindla sissetulekuga vanusegrupile [1].

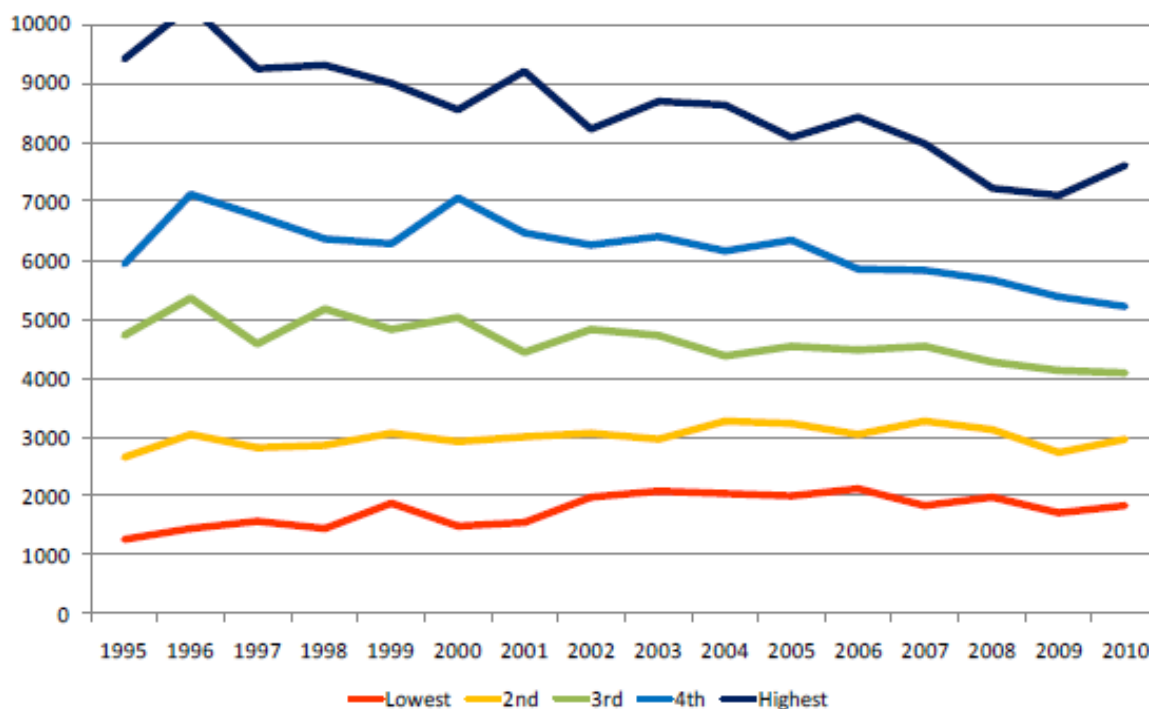


Sele 1.10. Meeste autokasutus aastatel 2002-2008 [1]



Sele 1.11. Naiste autokasutus aastatel 2002-2008 [1]

Nüüd kui on teada, et autotootjad keskenduvad just mingisugusele vanusegrupile ja sissetulekuga inimestele, siis järgmisena uuritakse palga ning autokasutuse suhet. 1995. aastal oli veela madala ja kõrge sissetulekuga inimeste aastas sõidetud keskmises teepikkuses suur – peaaegu 8000 miili (~13000 kilomeetrit) [Sele 1.12]. Järgnevatel aastatel on erinevus ühiskonnakihtide vahel väiksemaks jäänud ning juba 2012. aastaks oli vaheks 5500 miili (~8900 kilomeetrit) [Sele 1.12]. Selle on põhjustanud autohindade ning kütusehinna langused. Samuti ei kasuta kõige suurema palgaga inimesed nii palju autosid, kui vanasti, sest selle asemel ostetakse elukoht paika, kust kõik on käe ja jala juures. Taoline uuring näitab, et ühiskonnakihtide vahe läheb aina väiksemaks ning autosid kasutavad igasuguste sissetulekutega inimesed [1].



Sele 1.122. Autokasutus sõltuvalt sissetulekust aastatel 1995-2012 [1]

1.3. Tänapäeva auto

Kui 100 aastat tagasi oli auto kõrge staatuse sümbol või midagi millest unistati, siis tänapäevaks on autost saanud tarbeese. 21. sajandil sümboliseerib auto vabadust liikuda ja sõltumatust teistest inimestest. Ei või unustata, et auto näitab mingil määral ka omaniku isikupära. Laialt on levinud arvamused, et inimene, kes omab minibussi, on pereinimene ja tal on mitu last ja koer ning teiselt poolt 45 aastane meesterahvas, kes sõidab ringi sportautoga, vaevleb kindlasti keskeakriisis. Siit tekib küsimus milliseid autosid on võimalik tänapäeval osta ja miks autod just sellised on?

Kui vaadata seisu autoturul, siis on võimalik osta kõikvõimalikke sõidukeid. Erinevad on nii autode kerekujud, mootorid, istekohtade arv kui ka suurus. Ka väliselt identsed autod võivad olla täiesti erinevad, omades erinevat lisavarustust ja mootorit. Kõik see on võimalik, kuna inimestele on näidatud, et nende arvamus loeb. Kui tehti esimesed seeriatootmise autod, siis oli iga viimne kui auto identne. Paarkümnend aastat hiljem sai indiviid valida autole enda jaoks sobiva värvi ehk liikluspilt muutus sõna otseses mõttes värvilisemaks. Praeguseks hetkeks on liikluspilt muutunud tundmatuseni, autod ei erine mitte ainult värvi poolest vaid ka välimuse ja otstarbe poolest. Kõik see oleks jäänud olemata, kui autotootjad poleks andnud inimestele võimalust valida.

Selleks, et teada saada milline on tänapäeval kõige populaarsem autotüüp, tuleb ette võtta viimaste aastate automüügi edetabelid. Keskendutakse Euroopa turule ning võetakse vaatluse alla viimased 3 aastat. Tabelist 1.1 on võimalik näha 2013 aasta uute autode esikümme automüügis [3]. Lisaks sellele on tabelist näha, kui palju antud sõiduvahendi müük võrreldes eelmise aastaga muutus. Tabelist 1.2 on sama infot võimalik lugeda 2014 aasta kohta [4].

Tabel 1.1. Uute autode müük euroopas aastal 2013

Koht	Mudel	Müüdnud autode kogus 2013, tk	Müüdnud autode kogus 2012, tk	Muutus, %
1	Volkswagen Golf	470 229	431 754	+8,9
2	Ford Fiesta	293 663	306 308	-4,1
3	Renault Clio	287 111	244 076	+17,6
4	Volkswagen Polo	266 994	287 639	-7,2
5	Opel Corsa	239 814	265 070	-9,5
6	Peugeot 208	239 102	160 150	+49,3
7	Ford Focus	224 232	241 728	-7,2
8	Nissan Qashqai	202 593	208 049	-2,6
9	Bmw 3 Series	201 224	175 299	+14,8
10	Opel Astra	194 683	230 237	-15,4

Tabel 1.2. Uute autode müük euroopas aastal 2014

Koht	Mudel	Müüdnud autode kogus 2014, tk	Müüdnud autode kogus 2013, tk	Muutus, %
1	Volkswagen Golf	520 958	470 229	+11,1
2	Ford Fiesta	308 999	293 663	+5,3
3	Renault Clio	300 924	287 111	+5,1
4	Volkswagen Polo	280 378	266 994	+5,2
5	Opel Corsa	252 420	239 814	+5,2
6	Ford Focus	222 834	224 232	-0,6
7	Peugeot 208	215 312	239 102	-9,5
8	Skoda Octavia	206 362		+22,1
9	Nissan Qashqai	204 200	202 593	+1,2
10	Audi A3	200 157		+19,3

Kahte tabelit vaadates peab esimese asjana välja tooma, et esikümnes on mõlemal juhul 9 autot, mis kuuluvad pigem väikeklassi autode hulka. Tõele au andes, on väikeauto viimaste aastate jooksul küll natukene kasvanud, kuid seda on teinud ka keskklassi- ja luksklassi autod. Kui minna väheke täpsemaks, moodustavad esikümne autod, mille kerekuju on luukpära või universaal ehk autode pagasiruum ei ole sõitjaruumist otseselt eraldatud. Ainuke auto, mis ei kuulu väikeklassi autode hulka on linnamaastur Nissan Qashqai.

Igatahes annab viimase kahe aasta uute autode tabelite vaatlus meile kindla pildi sellest, et väikeautod on Euroopas väga populaarsed ning vaadates muutust, siis tõenäoliselt väikeautode müük tulevikus kasvab veelgi. Antud tabelid ei anna küll otsest ülevaadet, milliste mootoridega autosid enim ostetakse, aga kui vaadata autotootjate kodulehtedele, võime sealt välja lugeda, et esikümnesse kuuluvaid autosid pakutakse peaaesjalikult bensiini või diiselmootoriga.

1.4. Tulevikuauto

Millistele tingimustele peaks tuleviku auto vastama? Sellele küsimusele vastamiseks võetakse vaatluse alla Euroopa populaarseim auto Volkswagen Golf, et teada saada, mida inimene praegu autolt ootab. Golfi puhul on väliselt tegemist suhteliselt traditsioonilise liikumisvahendiga. Sõiduvahendi välisdisain on kindlate joontega ja suhteliselt konservatiivne. Autosalongis on rõhku pandud mugavusele, kvaliteedile ja funktsionaalsusele [5]. Tänapäevale kohaselt on autot võimalik vastavalt oma eelistustele täiendada, kuid kui vaadata Volkswageni põhivarustust, võib tähele panna seda, et juba põhivarustuses on autol olemas kõikvõimalikud turvalisuslisad – turvapatjadest erinevate juhiabisüsteemideni [6]. Kui siia lisada mõned probleemid, mida tulevik endaga kaasa võib tuua, võib kirja panna esmased punktid mida tulevikuauto peab täitma.

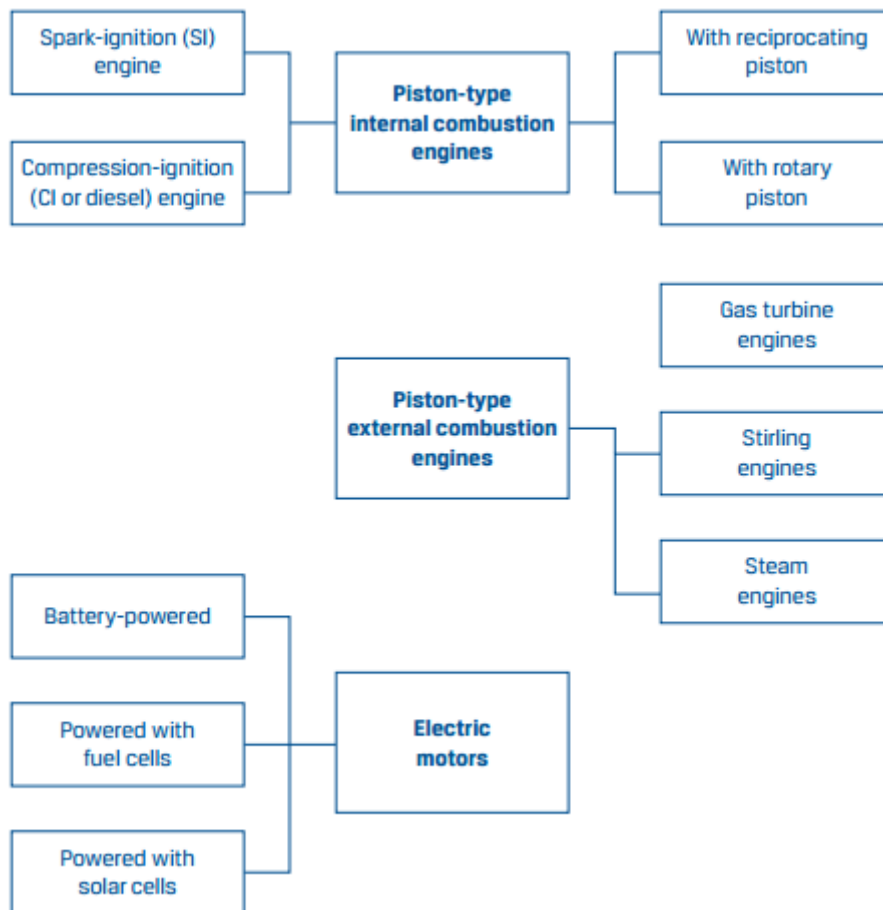
Nagu viimaste aastate põhjal on näha on igal aastal energia kallinenud. Nii võib ennustada, et tulevikus on energia veel kallim ja kui mõeldakse 50 aastat edasi, võib juhtuda et fossiilsed kütused on üleüldse otsas või on tegemist defitsiidiga. Lisaks sellele eraldub taastumatu kütuse põletamisel kahjulikke gaase (CO_2 , CH_4 , N_2O), mis põhjustavad kasvuhooneefekti [7]. Viimaste aastate jooksul on maailmas üha enam inimesi kolinud maakohtadest linna, mis põhjustab linnastumist ning see omakorda toob kaasa ruumipuuduse linnas [8].

Tulenevalt hetke populaarseimast autost ja erinevatest probleemidest, mida tulevik endaga kaasa võib tuua, võiks tulevikuauto olla järgmistele tingimustele vastav.

- Suhteliselt traditsioonilise välimusega – välimus ei või inimest hirmutada
- Turvaline – mida turvalisem seda parem
- Mugav – inimene on tahes või tahtmata olemuselt mugav
- Sisepõlemismootor tuleks asendada
- Väikeste gabariitmõõtudega - linnastumine
- Suure efektiivsusega – väiksema energiatarbe jaoks peab auto kaalu langetama ja õhutakistustegurit vähendama

1.4.1. Tulevikuauto mootor

Selleks, et kindlaks teha, millise mootoriga võiks auto tulevikus sõita, tuleks esmalt vaadata, millised erinevad mootorid on olemas. Selel 1.13 on välja toodud erinevad mootorid, mida võib kasutada liikumisvahendi liikuma panemiseks [9].



Sele 1.13. Erinevad mootorid [9]

Nagu eelnevalt mainitud, siis hetkel on enim kasutusel sise põlemismootor, kuid viimastel aastatel on üha rohkem kasutust leidnud ka erinevad elektrimootorid. Hetkel on elektrimootori suurimaks miinuseks väikene sõiduulatus ning pikk laadimisaeg. Kui bensiinimootoriga autoga saab paagitäiega keskmiselt sõita 700 km ning järgmise 700 km läbimiseks kulub auto täitmiseks maksimaalselt 5 minutit, siis elektriauto maksimaalne sõiduulatus jääb hetkel 200 km kanti ja selleks, et läbida järgmised paarsada kilomeetrit kulub kiirlaadijat kasutades 30 minutit või tavalaadimist pruukides 8 kuni 10 tundi [10]. Sellist võrdlust kasutades, ei kutsu miski ostma autot, millel on kasutusel elektrimootor. Sellest hoolimata on sellel ka häid omadusi. Näiteks kasutab elektriauto 100 km läbimiseks 24 kWh energiat, ning selle maksumus on 2,5 eurot.

Bensiinimootoriga auto kulutab 100 km läbimiseks 130 kWh energiat ja sellele kuluva bensiini maksumus on 12 eurot [11]. Lisaks sellele on elektriauto palju keskkonnasõbralikum, sest elektrimootor ei väljasta CO₂ gaase ja ka kahjulikke mikroosakeste hulk on väike.

Tänapäeval on teadlased jõudnud arusaamale, et siseõlemismootoritega, mis tekitavad palju süsinikdioksiid gaase, pole otstarbekas edasi tegeleda ning tuleb vaadata alternatiivsete jõuallikate poole. Peale selle, et väljutatakse kasvuhooneefekti põhjustavat CO₂ gaasi, jõuavad atmosfääri ka inimesele kahjulikud ained PM₁₀, NO_x ja VOC. Selle kõige tulemusena kaldutakse taoliste lahenduste poole, mille saastatus on nullilähedane ja nii peetakse tulevikuautodeks vaid kolme praegu olemasolevat lahendust ja nendeks on [12]:

1. Patareidega elektriautod
2. Vesinikkütuseelementidega elektriautod
3. Vesinikkütuseelementidega ja patareiga elektrilised hübriidautod

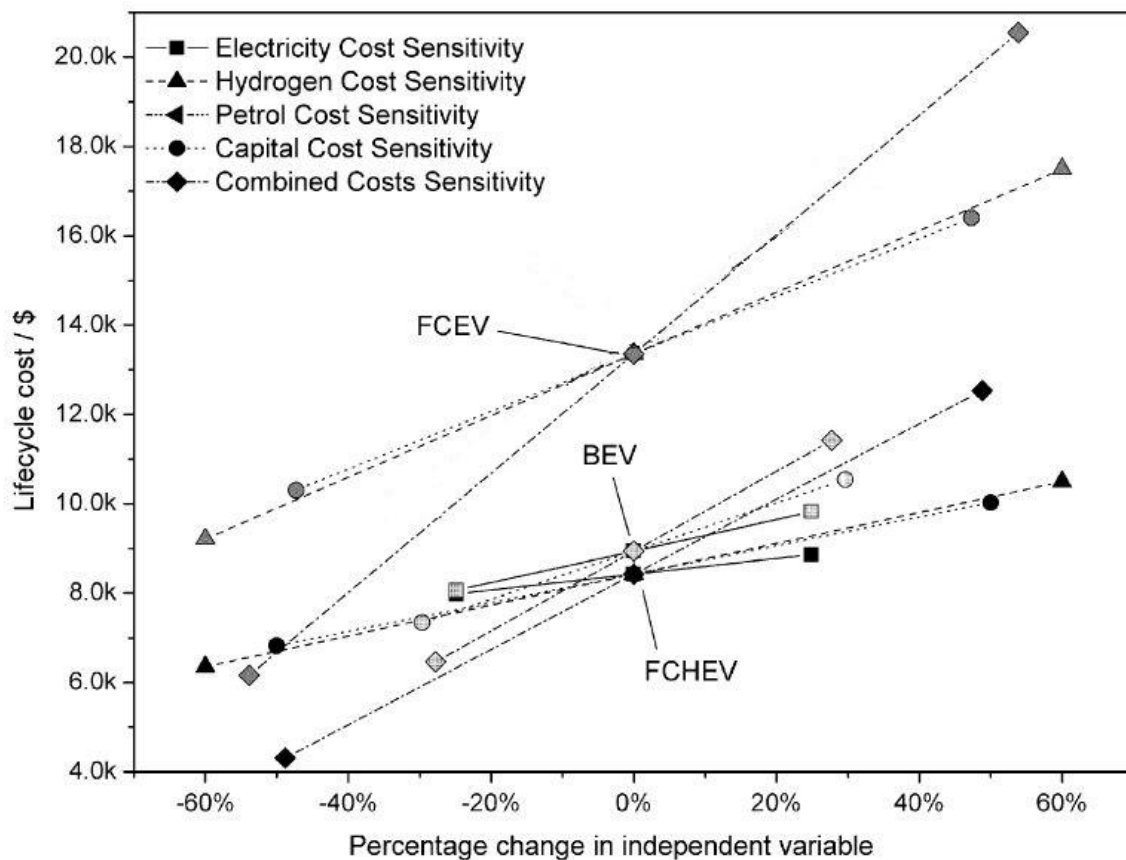
Patareidega elektrimootorid teevad juba suuri samme tänapäeval, kui vesinikkütuseelementidega elektrimootorid on alles algusaastates. Nüüd kui elektriautod on tänapäeval nähtavad olnud mitmed aastad, hakkavad ilmema kõige suuremad murekohad taolise lahenduse juures ning selleks on kujunenud akude kestvus. Praegu olemasolevate autodega on võimalik pärast täislaadimist sõita 60-180 km, mis pole isegi piisav Tallinnast Tartusse sõitmiseks. Vesinikkütuseelementidega elektrimootorite üheks plussiks on see-eest just energia kestvus, kui näitajateks juba praegu müügil olevatel mudelitel on 80-160 miili kg⁻¹H₂, mis annab autole võimaluse läbida ühe tankimisega 370-450 km.

Taolistel mootoritel on aga üks viga – lahenduse jõudlus on piiratud seoses mitte kõige suurema kasuteguriga. Seega on vaja suuremaid kütuseelemente, et saada suurem jõudlus, mis omakorda on aga väga kallid. Patareidega töötaval mootoril on see parameeter väga hea, sest kasutegur on oluliselt parem kui eelneval. Seda näitab ka asjaolu, et patareidega elektrimootori kasumlikkus on 1630 km/GJ⁻¹ ja vesinikkütuseelementidega elektrimootoril 814 km/GJ⁻¹ [12].

Tabel 1.3. Patareidega elektrimootori ja vesinikkütuseelementidega elektrimootori võrdlus

	Patareidega elektrimootor	Vesinikkütuseelementidega elektrimootor
Jõudlus	Hea - tänu mootori kõrgele kasutegurile	Keskmine – kasutegur halvem kui patareidega elektrimootoril
Energia kestvus	3 – 6 kWh ⁻¹	80 – 160 miili kg ⁻¹ H ₂
Maksumus	Aastal 2010 = 26 700 \$ Aastal 2030 = ~7865 \$	Aastal 2010 = 47 400 \$ Aastal 2030 = ~10 530\$
Jooksvad kulud	Aastal 2010 = 36 \$/GJ ⁻¹ Aastal 2030 = ~36 \$/GJ ⁻¹	Aastal 2010 = 42 \$/GJ ⁻¹ Aastal 2030 = ~35 \$/GJ ⁻¹
Energia kasumlikkus	1630 km/GJ ⁻¹	814 km/GJ ⁻¹

Kütuseelementide suure kalliduse tõttu maksavad ka nende komponentidega töötavad mootorid palju ning sellepärast usutakse, et tulevikus on neil mootoris küll koht olemas, kuid nende suurus oleks väike [12]. Patareide hinnakäiku arvatakse minevat langevas trendis, sest aina enam minnakse elektriautode peale ning tootjate seas tuleb rohkem konkurentsi, mistõttu otsitakse odavamaid lahendusi [Sele 1.14].



Sele 1.14. Prognositavad muutused aastaks 2030 erinevatel mootoritel [12]

Kuna nii patareidega kui ka vesinikkütuseelementidega elektrimootoritel on omad nõrgad kohad, siis kõige mõistlikum tundub nende kahe jõuallika hübriid, mis tagaks mootori hea jõudluse (patareid) ning energia kestvuse (vesinikkütuseelement). Sellise lahenduse kasuks räägivad veel mitmed asjaolud ning tuginedes antud faktidele, on mõistlik projekteeritava auto jõuallikaks valida just vesinikkütuseelementidega ja patareiga elektriline hübriidmootor.

1.4.2. Visioonid tulevikuautodest

Disainerid on joonistanud erinevaid visandeid sellest, millised võiksid autod tulevikus välja näha juba aastaid. Erinevaid lahendusi vaadates on kõigil üks joon siiski sarnane – nimelt üritatakse luua auto, mis saastaks loodust võimalikult vähe või ei teeks seda üldse. Järgnevalt vaadataksegi, milliseid lahendusi erinevad disainerid auto jaoks tulevikuks on välja pakkunud ning millised prototüübid on juba ilmavalgust näinud.

„Wheelie“

„Wheelie“ on kahel suurel rattal elektrimootoritel liikuv sõiduvahend, mida inglise keeles kutsutakse *diwheel*. Eesti keeles nimetatuna võiks teda kutsuda kaksrattaks, mis koosneb kahest suurest välimisest rattast, mille keskele on asetatud sisemine raam, mis saab välimiste rataste vahel pöörelda.

Algseks visiooniks oli sõidukiga pakkuda inimestele suuresti meelelahutust. Selle tegi võimalikuks asjaolu, et „Wheelie“ juhtimisega saavad hakkama praktiliselt kõik. Eesmärgiks on pakkuda erinevatele inimestele kogemust, mis ei jäta kedagi külmaks.

Meelelahutuslikust aspektist kujunes välja siiski idee, et sõidukit on võimalik ka kasutada praktilises võtmes ning sellele antud töö keskendubki. Näiteks oli prototüübi pealt näha, et selle vastu tunnevad väga huvi liikumisvaegusega inimesed, kellele „Wheelie“ meenutab veidi ratastooli – aga seda huvitavas ning praktilises võtmes. Sõiduk on teistele tulevikuautode visioonidele sarnane oma ümarate joonte poolest, mida on ka järgnevatel ideeautodel näha.



Sele 1.15. „Wheelie“

General Motors visioon „EN-V concept“

General Motors on käima pannud projekti, mida teatakse kui „EN-V concept of the future“ [Sele 1.16]. Tegemist on elektrilise mootoriga kahekojalise 8 hobujõulise sõidukiga. Autod saavad oma jõu liitiumakult, mis suunatakse kahte nelja hobujõulisse mootorisse, mootorid asuvad ratastes. Antud tulevikuautod on isesõitvad, seega kui programmeerida parदारvutisse kindel teekond, võivad autod selle läbida iseseisvalt ja näiteks järgi sõita sõbrale või sõidukiomanikule endale. Autol on peal ka kõikvõimalikud kokkupõrkeandurid, mis teevad antud autoga avariisse sattumise peaaegu võimatuks. General Motors väidab, et tegemist on väga hea manööverlusvõimega sõidukiga ning auto võtab veerand ruumist, mis võtaks tavaline sõiduauto [13].

Tabel 1.4. „EN-V concept“ ja tänapäeva auto võrdlus

	Kaal, kg	Pikkus, m	Võimsus, Hp
„EN-V concept“	Alla 500	1,5	8
Tänapäeva auto	1500	4,5	115



Sele 1.16. „EN-V concept“ [13]

„eRingo“

Nagu eelnevalt mainitud, siis väga populaarseks ideeks tulevikuautodel on osutunud ümarad kered ning „eRinGo“ [Sele 1.17] on üks ideaalsemaid näiteid taolisest valdkonnast [14]. Huvitavaks teeb sõiduki see, et sellel on kokku kolm ratast, mis asuvad üksteisega kõrvuti. Antud idee disaineriks Iraanist pärit Mohammad Ghezeli, kes on spetsialiseerunud tulevikusõidukite projekteerimisele ja võitnud mitmeid esikohti oma kontseptsioonidega. Nagu enamikel tulevikuautodel, on ka sellele sõidukile mõeldud kaks istekohta, kuid erinevalt teistest, käib selles juhtimine siiski inimese poolt. Juhtimispuul on paigaldatud mõlemale reisijale, kuid korraga saab töötada neist ainult üks. Taoline kontseptsioon töötab elektrimootoriga ja põhilisel liikumisel suudab hoida tasakaalu keskmisel rattal. Välimisi rattaid kasutatakse vaid kitsastes oludes manööverdamiseks. Väga palju sarnaseid jooni on sõidukil „Wheeler“ liikumisvahendiga, mis näitab antud töös käsitletava sõiduki potentsiaali tulevikuautona.



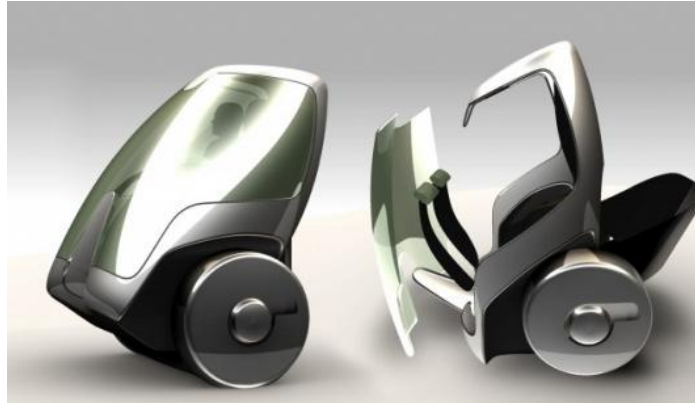
Sele 1.17. „eRingo“ [14]

Segway „P.U.M.A.“

Tänapäeva linnapildis juba tüüpiliseks saanud omanäolise liikumisvahendi projekteerimistiim Segway on otsustanud minna sammu edasi ja teha midagi taolist ka autotööstuses. Projektile on oma rahastuse andnud ka General Motors [15]. 2009. aastal juba näidati maailmale prototüüpi varsti ilmuvast projektist P.U.M.A. (Personal Urban Mobility & Accessibility) [Sele 1.18]. Sellist ideed võib pidada edasiarenduseks nende põhitootest Segway PT, sest ka see sõiduk on kahe rattaline ning hoiab tasakaalu güroskoobi abil.

Selline auto töötab patareidelt jõudlust saavate elektrimootoritega ning suudab arendada kiirust kuni 55 km/h. Juba 2009. aasta prototüübil suutis sõiduvahend läbida ühe laadimisega umbes 50 kilomeetrit. Akude täislaadimiseks kulub maksimaalselt kolm tundi.

Tulevikuauto peaks kaaluma umbes 270 kg ja olema võimeline ka teiste omasuguste sõidukitega „suhtlema“, et vältida kokkupõrkeid. Samuti loodetakse lisada funktsioonid, millega P.U.M.A. suudaks iseseisvalt parkida ja otsida ka laadimispunkte.



Sele 1.18. Segway „P.U.M.A.“

Google'i isesõitva auto projekt

Tänapäeval kõige rohkem meediakära tekitanud projektiks on Google'i korporatsiooni välja arendatud projekt isesõitvast autost. Tegemist pole küll otseselt eraldiseisva autoga, kui rohkem tarkvaraga, mis paneb ükskõik millise auto iseseisvalt sõitma.

Hetkel on demonstreeritud üldsusele programmi võimekust Toyota Prius'e näitel [Sele 1.19]. 2014. aasta detsembris toimunud testsõit läks edukalt ning juba 2015. aastal loodab Google viia sama auto linnapilti – seda küll vaid jälle testsõiduks. Kõigile kättesaadavaks loodetakse projekti käigus tulnud lahendus teha 2020. aastaks [16].

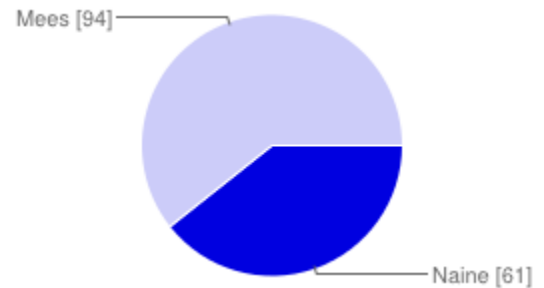


Sele 1.19. Google'i isesõitva auto prototüüp [16]

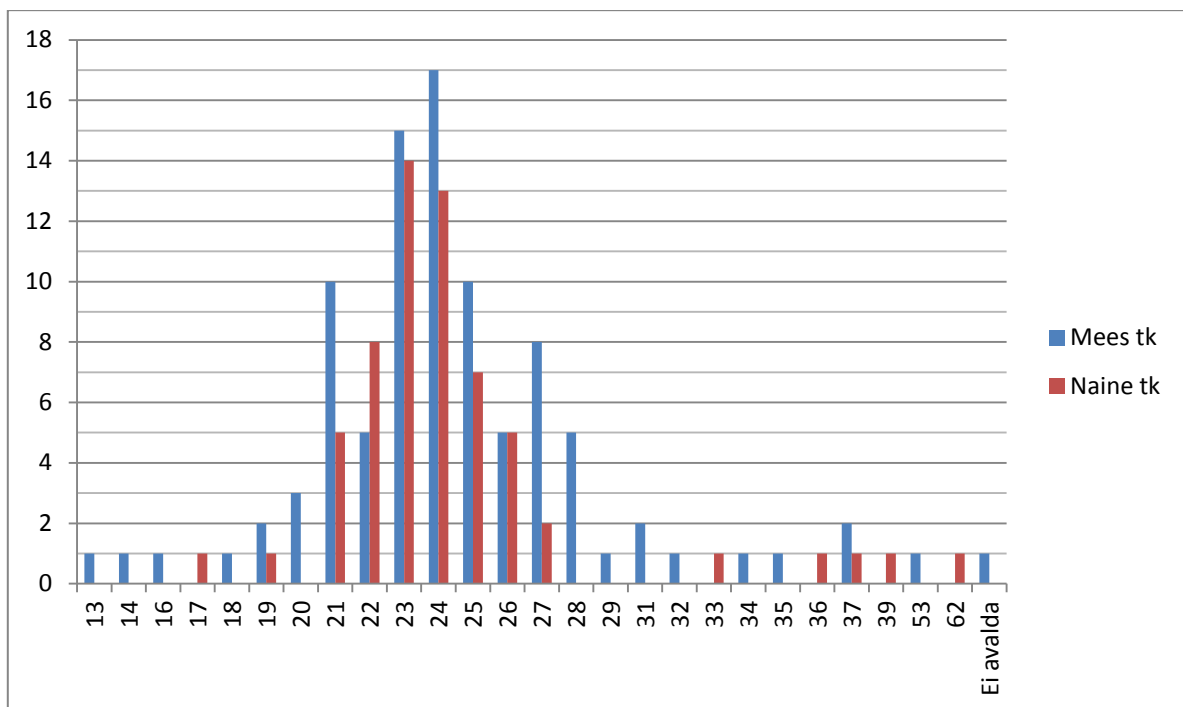
1.5. Küsitlus

Taolist teemat juba uurides, viidi läbi küsitlus tavainimeste seas, mida levitati sotsiaalmeedia lehekülgedel Facebook ja Twitter. Küsimustiku eesmärgiks oli saada ülevaade Eesti inimeste vaatest, millised nende arust peaksid välja nägema tulevikuautod 50 aasta pärast. Küsitlus viidi läbi kasutades Google Docs küsimustiku koostamise lehekülge ja sellega saab tutvuda tööle liidetud lisa [Lisa 7.1].

Kokku vastas küsitlusele 155 inimest, kellest 61% olid mehed ja 39% naised [Sele 1.20]. Järgnevalt uuriti vastanute vanust, et hiljem saada uurida sellest lähtuvaid eelistusi ning tulenevalt jagatud keskkonnast, olid vanuses 21-27 eluaastat inimesed ülekaalus [Sele 1.21].

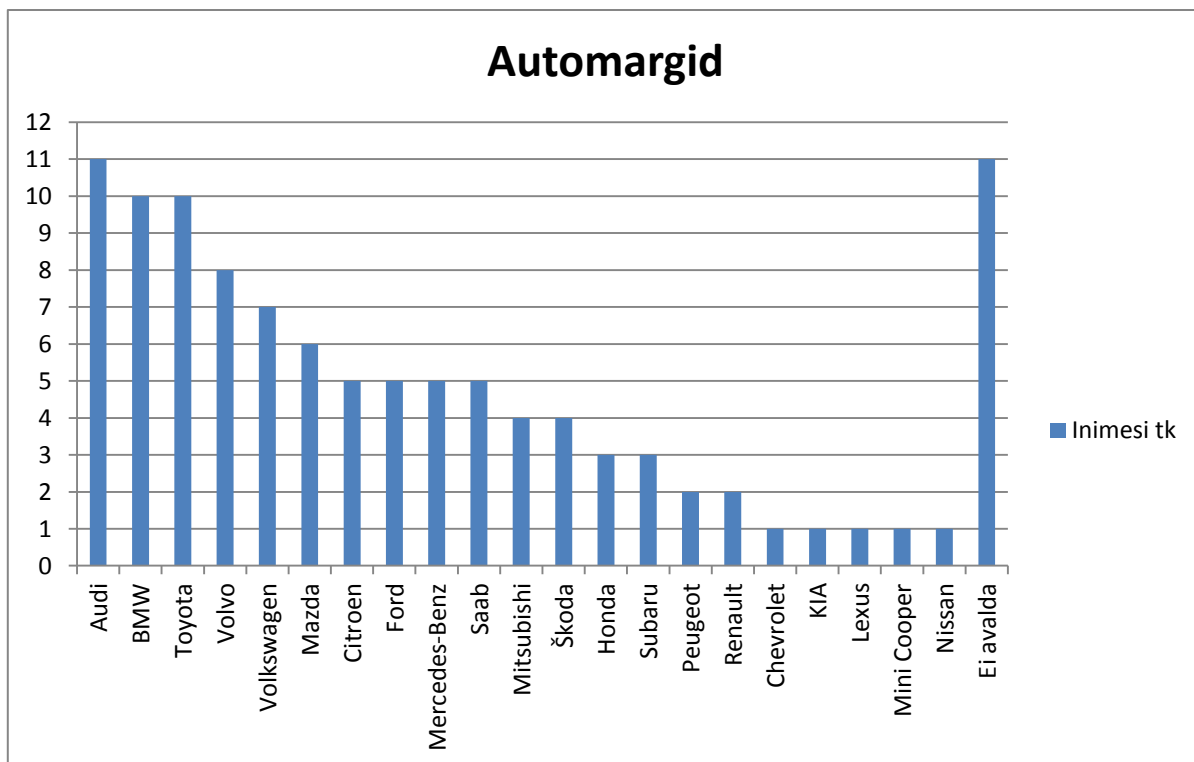


Sele 1.20. Küsitlusele vastanud inimeste arv ja sugu



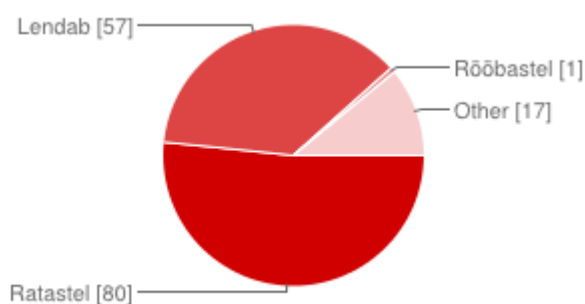
Sele 1.21. Küsitlusele vastanud inimeste vanus

Seejärel uuriti vastanute praegust autoolukorda – kas omab autot või mitte ning kui jah, siis millist automarki. 32% vastanutest enda autot polnud ning 68% küsitluses osalenute populaarseimad automargid olid Audi, BMW ja Toyota [Sele 1.22].

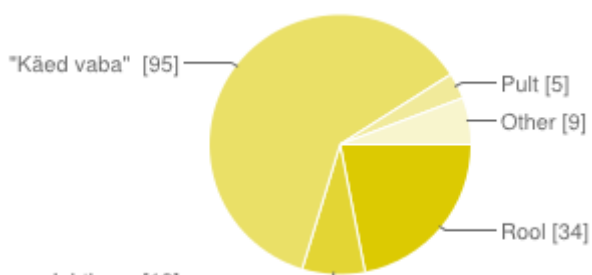


Sele 1.22. Küsitlusele vastanute automargid

Järgnevalt hakati siis uurima vastajate kujutlust tulevikuautodest. Esmalt küsiti, et kuidas nende arust võiks liikuda autod 50 aasta pärast [Sele 1.23]. Populaarseimaks vastusevariandiks kujunes traditsiooniline ratastel liikuv auto, kui kogus 52% häältest. 57 inimest 155-st aga uskus ka, et tulevikuautod lendavad. Enda ideid pakkusid 17 vastajat, kellest 9 pakkusid hõljumise varianti, mille võiks ühildada lendamisega.



Sele 1.23. Tulevikuautode liikumise moodus vastanute arust

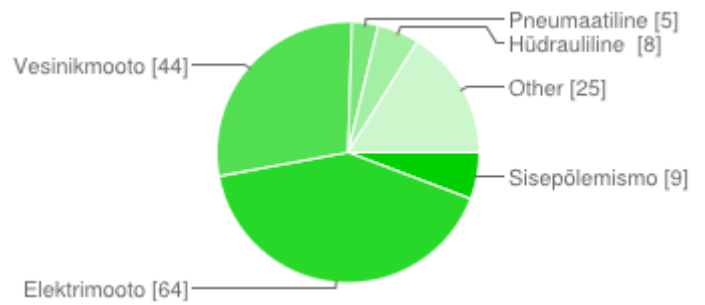


Sele 1.24. Tulevikuautode juhtimissüsteem vastanute arust

Pärast seda uuriti vastanute kujutlusvõimes oleva tulevikuauto juhtimissüsteemi ehk siis millega antud sõidukit juhitakse [Sele 1.24]. Vastatuimaks variandiks osutus „käed vaba“ juhtimine, kui seda vastas nii palju kui 61% osalenutest. Huvitav on asjaolu, et inimesed on täiesti nõus andma siis kogu juhtimise arvutile.

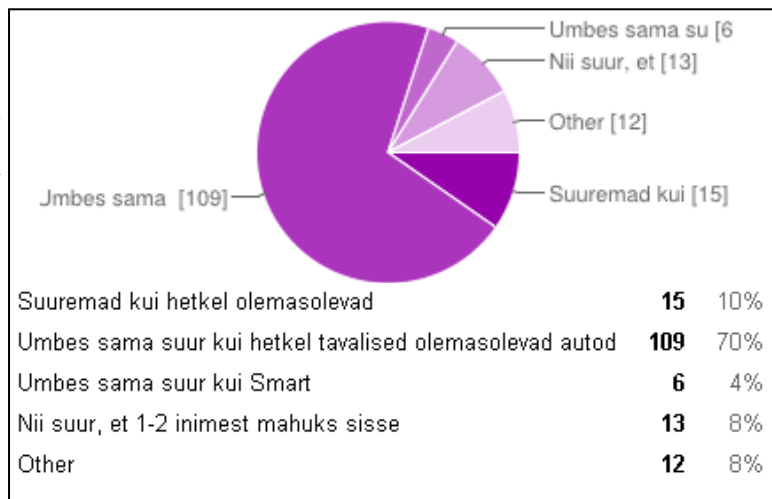
34 inimest aga loodavad, et rool ei kao kuhugi. Oma variandi kirjutanud vastanute seas oli isegi kolm inimest, kes loodavad 50 aasta pärast juhtida autot mõttejõul.

Jõuallikaks peavad Eesti inimesed kõige perspektiivsemaks elektri- ja vesinikmootoreid [Sele 1.25]. 25 inimest jällegi ei olnud etteantud variantidega nõus ning pakkusid enda ideid. Populaarseimateks nende seas olid mini-tuumamootor ning hübriidid erinevatest jõuallikatest.

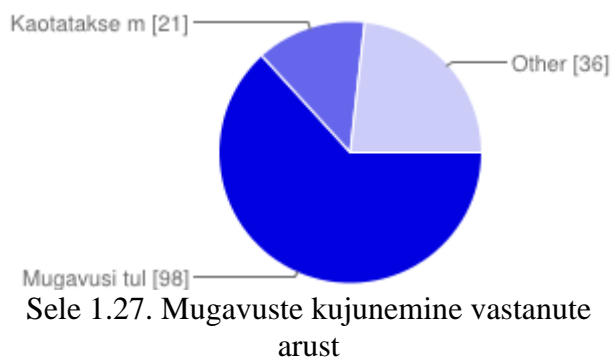


Sele 1.25. Tulevikuautode jõuallikas vastanute arust

Seejärel prooviti saada aimu, kui suured need tulevikuautod siis vastanute meelest on [Sele 1.26]. 70% osalenutest usuvad, et sõiduki suurus ei muutu ja kõigil on võimalik nagu praegugi erinevaid mudeleid valida. Küll aga oli ka neid, kes uskusid erinevalt üldlevinud arvamusele, et autod lähevad väiksemaks, on tulevikuautod hoopis suuremad kui praegused. Mõned olid põhjendanud valikut sellega, et arvatakse, et auto ja eluase ühildatakse.



Sele 1.26. Tulevikuauto suurus vastanute arust

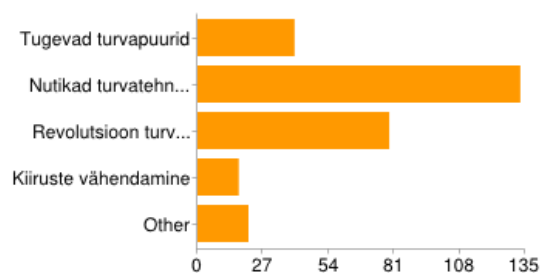


Sele 1.27. Mugavuste kujunemine vastanute arust

Nüüd kui väike eelaimdus tulevikuauto liikumisest oli selge, siis uuriti vastanute arvamust lisafunktsioonide kohta ning esimesena küsiti mugavuste lisamise või vähendamise koha pealt [Sele 1.27]. Variantideks oli ainult kaks vastuse võimalust: „kaotatakse mugavusi ja sellega kaalu“ ning „mugavusi tuleb juurde ja sellega

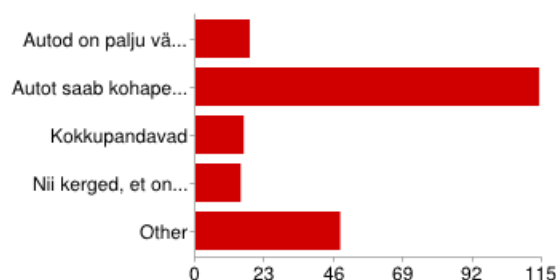
ka kaalu“. Enamik inimesi arvas siiski, et mugavusi tuleb juurde ja sellega kaasneb ka kaalu suurenemine. Küll aga 33 vastanut pakkus enda variandiks selle, et tehnoloogia arenguga suudetakse tuua mugavusi juurde, ilma et kaalu lisanduks.

Seejärel uuriti vastanute käest nende nägemust turvalisuse koha pealt ning millised on kõige tõenäolisemad uuendused selles valdkonnas [Sele 1.28]. Siin küsimusel oli muidugi võimalik valida ka mitu vastusevarianti ning tublimad lisasid veel omapoolseid. Populaarseimaks (86% vastanutest) variandiks usuti olevat nutikad turvatehnoloogiad. Selle all peeti siis silmas kõiksugu andureid ja hoiatussüsteeme. Üle poolte vastanutest (51%) arvas ka, et revolutsiooniline läbimurre tuleb turvarihmades ja –patjades, mis aitavad kokkupõrkel päästa palju elusid. Teiste variantidena oli pakutud veidi ulmelisi ideid, nagu näitaks autode omavaheline suhtlus. Võib-olla oli mõndadel juba meelest läinud, et jutt käib 50 aasta pärast tulevatest autodest.



Sele 1.28. Turvalisuse tagamine tulevikuautodel vastanute arust

Viimaseks uuriti vastanute käest nende lahendust hetkel väga teravale probleemile nagu seda on parkimine. Kuna suurtes linnades toimub ülerahvastumine, siis ka autodele pole enam ruumi ning sellega tuleb kindlapeale tulevikus tegeleda. Nii sai siis ka vastanutelt küsitud selle probleemi lahendust. Väljapakutud variantidest kõige populaarsemaks sai ülekalukalt see, et autot saab 360 kraadi kohapeal keerata, kui varianti valiti 74% kordadest [Sele 1.29]. Sellega kindlasti suudetaks manööverdada raskemini ligipääsetavatesse kohtadesse. Huvitaval kombel pakuti väga palju enda ideeks just iseparkivaid autosid, mis juba tänapäeval on tänavapildis leitavad. Samuti oli üheks levinud ideeks liftidega autoparklad, nagu need on olemas juba Hiinas ja Jaapanis.



Sele 1.29. Parkimise ja manööverdavuse lahendamine tulevikuautol vastanute arust

Sellega saadi küsitluses osalenute vastustest kokku Eesti inimese keskmine kujutus tulevikuautost, mis näeks välja järgmine. Auto liigub ratastel ning juhitakse seda nõ „käed vabad“ süsteemiga. Jõuallikaks on tulevikuatol elektrimootor ja auto gabariit võrreldes praegu olemasolevatega ei muutu. Mugavusi tuleb kindlasti autole juurde ning lisatakse veel nutikaid turvatehnoloogiaid, samal ajal täiustades ka turvarihmasid ja –patju. Manööverdavuse parandamise tagab 360 kraadise kohapealse pöörde võimalus.

Analüüsid eelnevalt hüpoteetiliselt kokkupanud sõidukit, siis võib öelda, et eestlased on väga kahe jalaga maa peal olev rahvas ning oodatavad uuendused on juba tänapäeval küll olemas, aga veel algusjärgus. „Wheelie“ vastab enamikele küsitlusest välja tulnud aspektidele ning kuna Google'i projekt on näidanud, siis ka „käed vaba“ süsteemi on võimalik juba olemasolevatele sõidukitele paigaldada. Suurimaks plussiks saabki „Wheelie“ puhul välja tuua 360 kraadise kohapeale pöörde võimaluse ja tulenevalt sellest hea manööverdavuse, millega saab sõidukid üksteisele väga lähedale parkida ning nii ruumi kokku hoida.

2. OPTIMEERIMINE

Eelmises peatükis sai selgeks asjaolu, et „Wheelie“ on potentsiaalne tulevikuauto projekt. Antud punktis uuritakse sõiduki optimeerimist käsitletuna nii majandusliku kui ka konstruktsiooni seisukohalt. Taoline analüüs on vajalik, et hakata tulevikus tootma liikumisvahendit nii keskkonnasõbralikult, odavalt ja kvaliteetselt kui võimalik. Uurimus teostatakse valmistatud „Wheelie“ prototüübile ja pakutakse välja paremad lahendused. Selliste tulemuste saamiseks viiakse läbi sõiduki LCA analüüs ja konstruktsiooni tugevusarvutuste põhjal ka optimeerimised.

2.1. LCA analüüs

Antud punktis käsitletakse „Wheelie“ raami elutsükli. Alustuseks vaadatakse toote kogu elutsükli terviklikuna ning antakse sellest ülevaade. Seejärel otsustatakse piirid, millele selles töös rohkem keskendutakse.

Järgnevalt otsustatakse funktsionaalse ühiku valimine ning millel see põhineb. Pärast seda valitakse antud toote juures kõige olulisemad KPI-d (Key Performance Indicators) ja antakse neist põgus ülevaade. Viimasena pakutakse välja tootmises olevatele kriitilistele kohtadele alternatiivsed lahendused.

2.1.1. Toote elutsükli kirjeldus

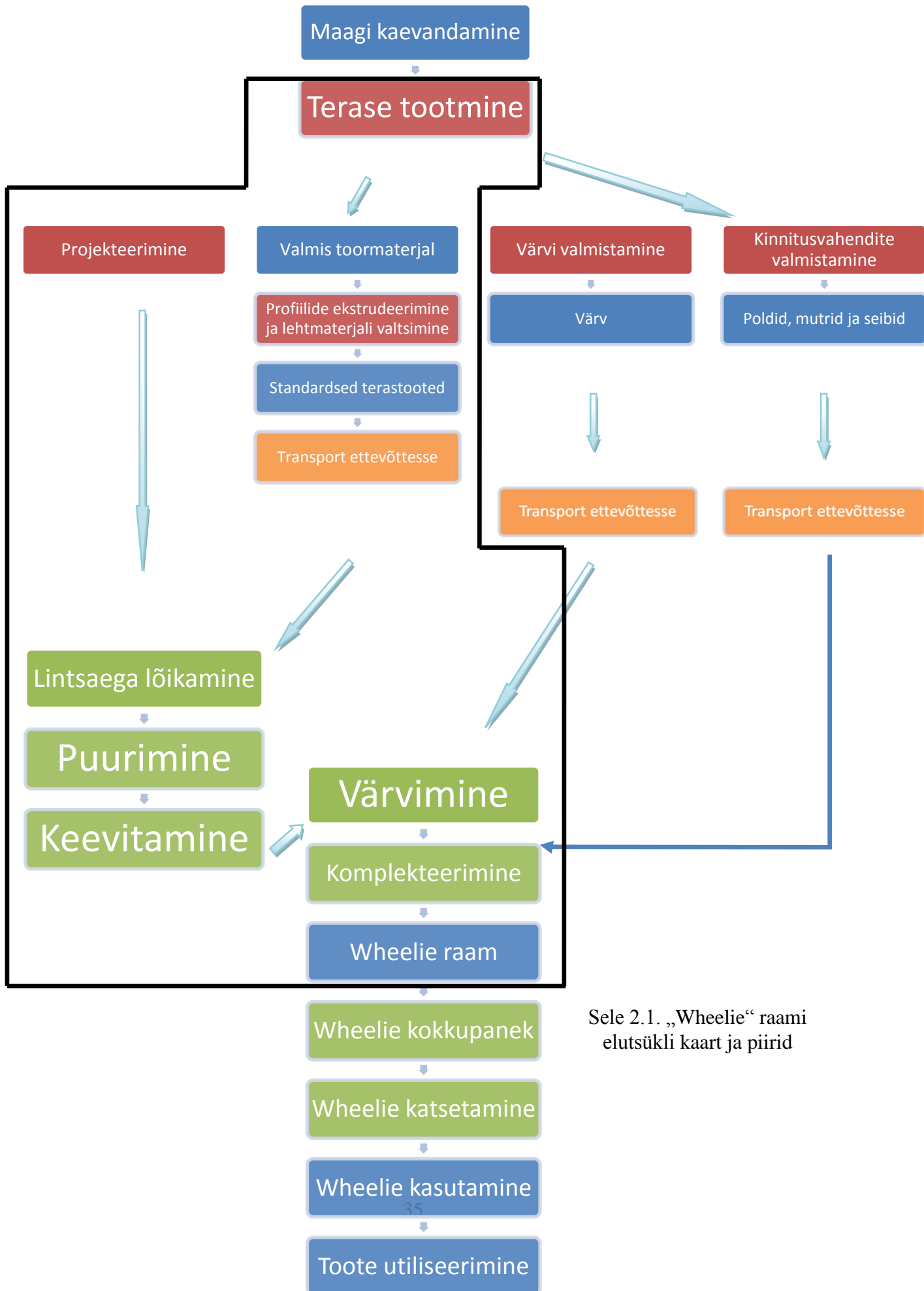
„Wheelie“ raam on valmistatud üleni terasest ning toote elutsükkel algab maagi kaevandamisest. Pärast maagi kaevandamist toodetakse maavarast terast, mille tulemusena saadakse toormaterjal. Alustatakse prototüübi projekteerimist inseneride poolt. „Wheelie“ raam hõlmab endas kahte moodi terastooteid - terasprofiilid ja lehtmaterjalid. Terasprofiile valmistatakse peamiselt ekstrudeerimisega, lehtmaterjale tehakse valtsimise teel. Paralleelharuna toimub ka kinnitusvahendite valmistamine terasest. Nendeks on poldid, mutrid ja seibid, mis aitavad konstruktsiooni lõpp-produktis koos hoida. Eraldi haruna toimub värviette võttes vajaliku värvi valmistamine.

Terastooted, kinnitusvahendid ja värv transporditakse ettevõttesse, kus hakkab valmima „Wheelie“ prototüüp. Materjali hoiustamiseks on vaja ruumi ja ettevõttesisest transporti. Standartsed terastooted lõigatakse vajaminevatesse mõõtudesse lintsaega. Puurimist vajavad detailid viiakse puurpingi alla, kus puuritakse neile vajalikud avad. Seejärel transporditakse terasdetailid keevitamisesse, mille käigus liidetakse jupid suuremateks osadeks.

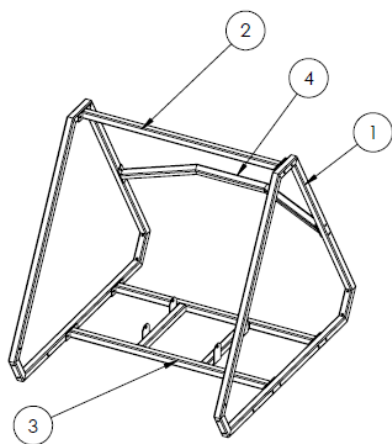
Pärast seda tuleb raami osad viia värvimisse. Värvimine toimub pulbervärviga. Seejärel alustatakse komplekteerimisega, mille käigus kasutatakse mehaanilisi tööriistu ja kokku pannakse prototüüp käsitsi. Kogu selle protsessi tulemusena valmib terviklik raam.

Paralleelselt raami komplekteerimisega valmisid „Wheelie“ teised osad ja hakatakse panema kokku kogu konstruktsiooni. Pärast toote valmis saamist tehakse esimesed katsetused, et veenduda sõiduki turvalisuses ja kvaliteedis. Pärast testi edukat läbimist saab prototüüpi hakata kasutama. Pärast seda toode utiliseeritakse ja taaskäideldakse kõik selleks sobivad detailid.

2.1.2. Toote elutsükli kaart ja piirid



Sele 2.1. „Wheelie“ raami elutsükli kaart ja piirid



Nr.	Nimetus	QTY.
1	Kolmnurkraam	2
2	Jõikustala	1
3	Alumine raam	1
4	Turvatala	1

Sele 2.2. „Wheelie“ sisemise raami detailid

Kuna tegemist on ainuexemplari ehk prototüübiga, valitakse toote funktsionaalseks ühikuks 1.

2.1.3. Key Performance Indicators (KPI)

Key Performance Indicator (edaspidi KPI) tähendab otsetõlkes võtme jõudluse/tootluse indikaatorit. Nimi vihjab sellele, et KPI-de abil on võimalik midagi kirjeldada ja võrrelda. Lihtsalt öeldes võibki öelda, et KPI on üks tulemuslikkuse mõõtmise viise. KPI abil on võimalik mõõta ettevõtte edukust mingil kindlalt tegevusalal. Üldiselt on KPI-ks mingisugune parameeter või väärtus, mida on võimalik mõõta. KPI-d võidakse jagada erinevatesse gruppidesse, näiteks on olemas: keskkonna, majanduslikud ja kvaliteedi KPI-d. KPI-d kasutatakse nii tootmises, müügis kui ka infotehnoloogias [17].

Keskkonna KPI-d

Antud töös käsitletakse kuut keskkonna KPI-d. Nendeks on:

- Energiakulu – palju kulub energiat nii taaskasutatava kui ka mitte-taaskasutatava vara peale (Ühik – kWh/fü)
- Globaalse soojenemise potentsiaal – CO₂ emissioon (Ühik – kg/fü)
- Hapestumise potentsiaal- SO₂ ekvivalent (Ühik – g/fü)
- Ohtlikud jäätmed – (Ühik – g/fü)
- Materjali jääk – (Ühik – kg/fü)
- Puhta vee kulu – (Ühik – l/fü)

Majanduslikud KPI-d

Majanduslikke näitajaid analüüsid keskendutakse järgmistele KPI-dele:

- Tööjõukulu – Tööjõule kuluv raha (Ühik - €/fü)
- Elektri maksumus – Elektrienergiale kuluv raha (Ühik - €/fü)
- Omahind – Toote maksumus (Ühik - €/fü)

Kvaliteedi KPI-d

Kvaliteedi näitajaid analüüsid keskendutakse järgmisele KPI-le:

- Ajakulu ehk efektiivsus (Ühik – h/fü)

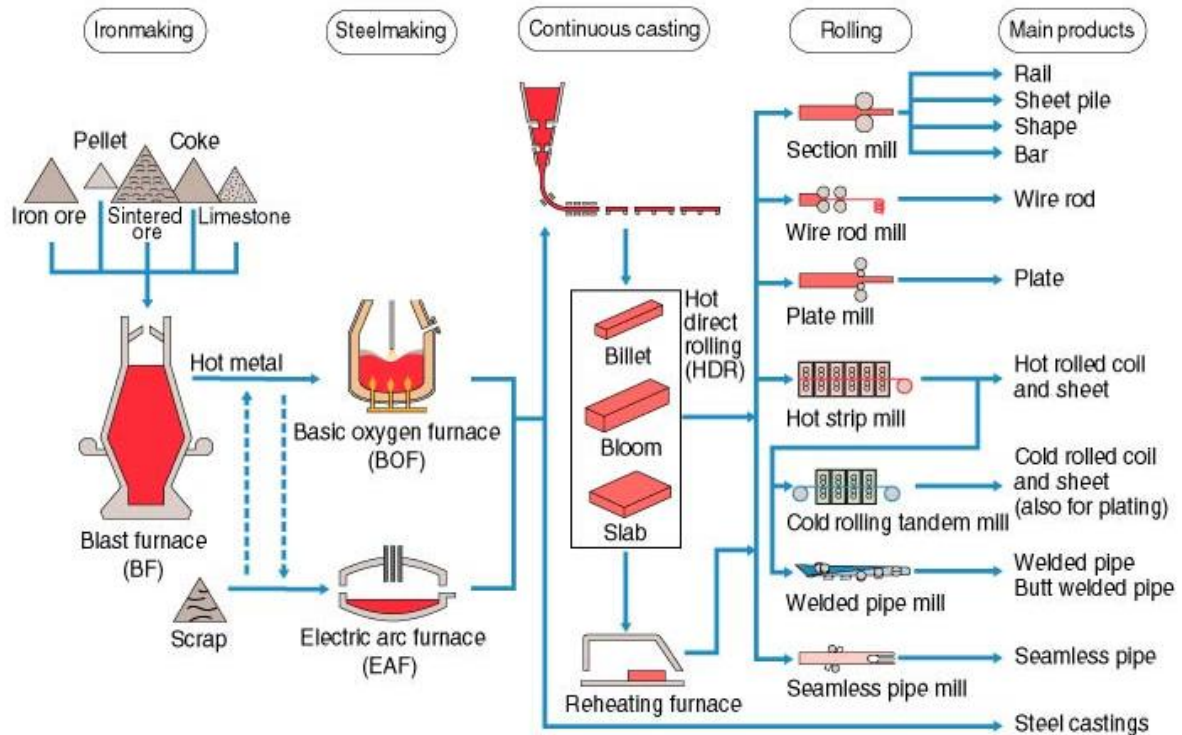
2.2. Toote elutsükli kirjeldus

2.2.1. Teras tootmine

„Wheelie“ raamil kasutati mõlemal profiilil S235 terasemarki. Järgnevalt tuuakse välja terase tootmise protsessi tähtsamad sisendid ja väljundid 1 kg terase kohta. Samuti tuuakse välja kogus „Wheelie“ prototüübi raami valmistamise kohta.

Teras tootmine jagatakse kahte erinevasse protsessi. Esimeses protsessis valmistatakse kõrgahjus malm. Sisenditeks sellel on rikastatud rauamaak, mangaanimaak, rübusti (lubjakivi), koks, kõrgahjugaas ja hapnik. Väjunditeks on malm, räbu, kõrgahjugaas ja tolm.

Teises protsessis sulatatakse malm ümber teraseks. Selle käigus eraldatakse tekkinud lisandid. Pürometallurgilise astme algatamiseks viiakse protsessi puhast hapnikku. Hapniku abil oksüdeerimise käigus saadakse soovitud süsiniku sisalduse ja kõrvalainete konsistentsiga teras. Valminud teras vormitakse/tõmmatakse standartsetesse mõõtudesse [Sele 2.3].



Sele 2.3. Terasse tootmise protsessid [18]

Terasse tootmise sisenditeks on taaskasutatav raud, vesinik, lubjakivi, magevesi, õhk, taastuenergia ja taastumatu energia [Tabel 2.1].

Tabel 2.1. Terasse tootmise protsessi sisendid

Nimi	Ühik	Kogus 1 kg terasest kohta	Kogus 1 fü kohta
Taaskasutatav raud	kg	$1,721 \cdot 10^{-5}$	$1,067 \cdot 10^{-3}$
Vesinik		$7,430 \cdot 10^{-7}$	$4,607 \cdot 10^{-5}$
Lubjakivi		$2,605 \cdot 10^{-7}$	$1,615 \cdot 10^{-5}$
Magevee kulu		6,268	388,616
Õhk		1,686	104,532
Taastuenergia	MJ	0,432	26,784
Taastumatu energia		2,568	159,216
Energiakulu kokku		3,000	186,000

Terasse tootmise väljunditeks on teras, vesi, veeaur, CO₂, N₂O, O₃, CH₄, ohtlikud jäätmed, radioaktiivsed jäätmed, elavhõbe, vingugaas, CH₃ ja SO₂ [Tabel 2.2].

Tabel 2.2. Terase tootmise protsessi väljundid

Nimi	Kogus 1 kg terase kohta (kg)	Kogus 1 fü kohta (kg)	CO ₂ koefitsent	CO ₂ (kg)
Vesi	1,182	73,284		
Veeaur	0,636	39,432		
CO ₂	0,862	53,444	1	53,444
N ₂ O	$2,872 \cdot 10^{-6}$	$1,781 \cdot 10^{-5}$	298	0,053
O ₃	0	0	8	0
CH ₄	0,002	0,124	25	3,100
Ohtlik mitte- orgaaniline jääde	$6,229 \cdot 10^{-4}$	0,0386198		
Muu ohtlik jääde	0,002	0,124		
Tugevalt radioaktiivne jääde	$7,122 \cdot 10^{-7}$	$4,416 \cdot 10^{-5}$		
Keskmiselt ja kergelt radioaktiivne jääde	$8,523 \cdot 10^{-7}$	$5,284 \cdot 10^{-5}$		
Elavhõbe	$7,825 \cdot 10^{-8}$	$4,851 \cdot 10^{-6}$		
CO	0,006	0,372		
Ammoniaak CH ₃	$9,680 \cdot 10^{-6}$	$6,002 \cdot 10^{-4}$		
SO ₂	0,001	0,062		

Tabel 2.3. Terase tootmise KPI-d

KPI	Kogus	Märkused
Energiakulu	186 kWh	Elektrienergia kulu
Puhta vee kulu	18 606 l	Elektrienergia tootmisel kuluv vesi + tootmises kasutatav vesi
CO ₂ emissioon	53,4 kg	Globaalse soojenemise potentsiaal
SO ₂ ekvivalent	0,062 kg	Hapestumise potentsiaal
Ohtlikud jäätmed	0,16 kg	
Tööjõukulu	-	Tööjõule kuluv raha
Fü omahinna lisa	34,1 €	Kulud kokku
Ajakulu	-	Ei arvestata
Materjali jääk	-	
Elektri maksumus	773 senti	Elektrienergiale kuluv summa

2.2.2. Kasutusel olevad materjalid

Kogu materjal, mida antud projekti käigus kasutati, osteti Ruukki Products AS-ilt. „Wheelie“ raami valmistamisel kasutatakse kahte erinevat materjali.

- S235JRH terasest nelikanttoru 40x40x3 mm, mida osteti raami valmistamiseks 18 m. Osteti kolm kuue meetrist toru.
- S235JR ribateras 40x6000x4 mm, mida osteti ettevõtte vastutulekul 2 meetrit, seega osteti ribaterast mõõduga 40x2000x4 mm.

Tabel 2.4. Kasutusel olevad terased [19] [20] [21]

	Terasmark	Standard	Teoreetiline kaal, kg/m	Kilohind, €/kg	Voolavuspiir, MPa	Tõmbetugevus, N/mm²
Terastoru	S235JRH	EN 10219	3,3	1,2	235	360-510
Ribateras	S235JR	EN 10025-2	1,3	1	235	360-460

Sobivad ostukogused saadi kätte kasutades raami 3D mudelit, mis valmistati Solidworksis. Tabelist 2.5 on võimalik leida projekteerimise käigus saadud andmed ning orjenteeruva materjali maksumuse.

Tabel 2.5. 3D mudeli abil saadud materjali kogused ja ligikaudne maksumus

	Pikkus, m	Kaal, kg	Materjali kilohind, €/kg	Maksumus, €
Terastoru	13,9	45,9	1,2	55,08
Ribateras	1,4	1,82	1	1,82
Kogu raam	15,3	47,72		56,9

Kuna materjali ei ole kunagi võimalik osta täpselt, tekkis ka antud projekti raames teatud materjali ülejääk. Tabelites 2.6 ja 2.7 on võimalik näha võrdlust ostetud materjali ja teoreetiliselt kuluva materjali vahel.

Tabel 2.6. Ostetud ja kulunud ribamaterjali võrdlus

	Ribamaterjal, m	Kaal, kg	Maksumus, €
Ostetud ribamaterjal	2	2,6	2,6
Kulutatud ribamaterjal	1,4	1,82	1,82
Jääk	0,6	0,78	0,78

Tabel 2.7. Ostetud ja kulunud torumaterjali võrdlus

	Torumaterjal, m	Kaal, kg	Maksumus, €
Ostetud torumaterjal	18	59,4	71,28
Kulutatud torumaterjal	13,9	45,9	55,08
Jääk	4,1	13,5	16,2

Informatsiooni terasmaterjali keskkonnamõjude kohta on võimalik saada Ruukki kodulehelt. Tabelis 2.8 on keskkonnamõjurid kirjas nii 1 kg toote kohta, kui ka kogu „Wheelie“ raami kohta.

Tabel 2.8. Materjali keskkonnamõjud 1 kg ja ühe toote kohta [22] [23]

	1 kg tootmise kohta	1 kg tootmise kohta		„Wheelie“ raami kohta	
		Ribateras	Nelikanttoru	Ribateras	Nelikanttoru
	Energia, kW/h	4,6	5	8,4	229,5
Paisatakse õhku, g					
	CO ₂ , kg	0,9	1,1	1,6	50,5
	CO	8,3	13,0	15,1	596,7
	SO ₄	2,2	2,3	4	105,6
	Nox	0,4	0,3	0,7	13,8
	CH ₄	1,1	0,8	2,0	36,7
	Rasked metallid	1,6	0,07	2,9	3,2
	Tolm/lendtuhk	1,8	2,0	3,3	91,8
Paisatakse vette, g					
	Sulfaadid	0,05	0,05	0,1	2,3
Ladustatakse, g					
	Ohtlikud jäätmed	1,2	1,2	2,2	55,1

2.2.3. Kinnitusdetailid

„Wheelie“ raami kinnituseks kasutatakse kokku 16 poltliidet. Kasutusel on DIN933 M12x65 poldid, ning iga kinnituse kohta 2 DIN125 seibi ja üks DIN985 M12 mutter. Antud töös aga ei vaadelda ostutoodete mõju keskkonnale, kuna nende kaal moodustab kogu raami kaalust ainult väikese osa. Tabelis 2.9 on välja toodud kasutatud poldid, seibid ja mutrid. Poldid, seibid ja mutrid on pärit Baltic Bolt Oü-st.

Tabel 2.9. Kinnitusdetailid

Tüüp	Kogus, tk	Hind, €/tk	Kaal, g/tk	Hind kokku, €	Kaal kokku, kg
Polt M12x65 DIN933	16	0,3	9,5	4,8	0,152
Mutter M12 Din 985	16	0,15	2,9	2,4	0,0464
Seib M12 DIN125	32	0,07	1,4	2,24	0,0448
Kokku	64			9,44	0,2432

2.2.4. Projekteerimine

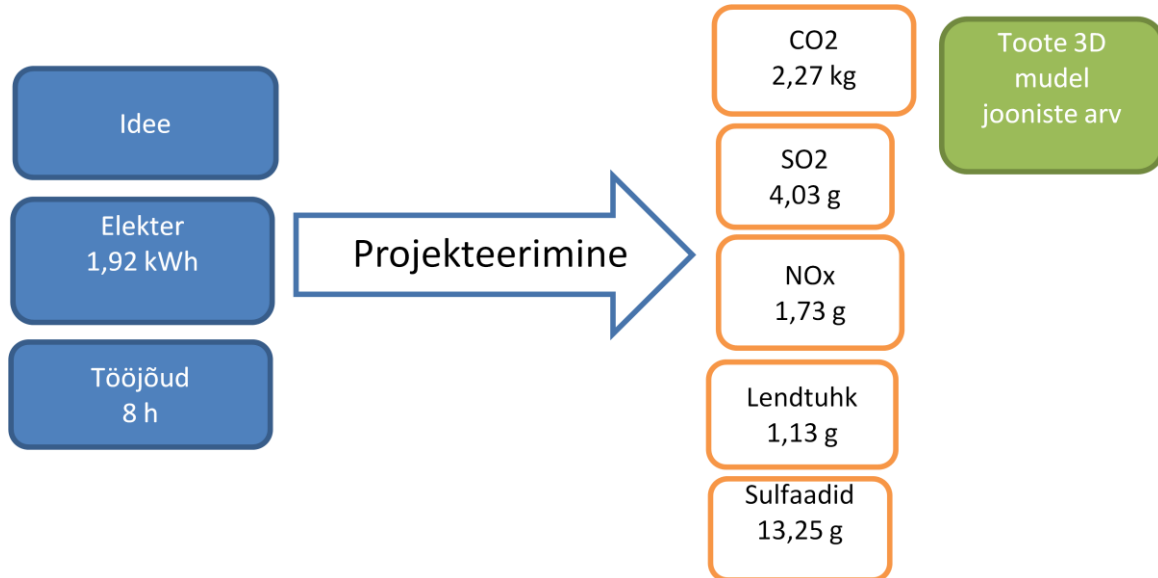
„Wheelie“ raami projekteerimine toimub kahe töötaja koostöös. Raami projekteerimisel pannakse paika selle materjal, mõõtmed, ligikaudne materjalikulu, kasutatavad valmistustehnoloogiad, kinnitusvahendid ja orienteeruv mass. Projekteerimise sisenditeks võtame idee tootest, elektrikulu (arvuti) ja tööjõu. Väljundiks „Wheelie“ raami 3D mudeli ja elektri tootmiseks kulunud saaste. Projekteerimisele kuluv aeg töötundides ühe inimese kohta on 8 tundi, tööjõukulu on ~15 €/h, seega $2 \times 8 \times 15 = 240$ €. Arvuti võimsuseks on 120 W, kasutusel oli 2 arvutit. Elektritarbimine tuleb seega $2 \times 8 \times 0,120 = 1,92$ kWh. Sellest lähtub, et elektrile kulub $1,92 \times 4,13 = 7,93$ senti. Kokku kulub projekteerimisele $240 + 0,08 = 240,08$ €. Kuna elektrit kulus 1,92 kWh ning on teada, 1 kWh tootmiseks kulub $0,1 \text{ m}^3$ vett, siis $0,1 \times 1,92 = 0,192 \text{ m}^3$ ehk 192 liitrit vett.

Õhku paisatakse:

- $1,18 \text{ kg CO}_2 \rightarrow 1,18 \times 1,92 = 2,27 \text{ kg}$
- $2,1 \text{ g SO}_2 \rightarrow 2,1 \times 1,92 = 4,03 \text{ g}$
- $0,9 \text{ g NO}_x \rightarrow 0,9 \times 1,92 = 1,73 \text{ g}$
- $0,59 \text{ g Lendtuhka} \rightarrow 0,59 \times 1,92 = 1,13 \text{ g}$

Vette:

- 6,9 g Sulfaate-> $6,9 \times 1,92 = 13,25$ g



Sele 2.4. Projekteerimise sisendid ja väljundid

Tabel 2.10. Projekteerimise KPI

KPI	Kogus 1/fü	Märkused
Energiakulu	1,92 kWh	Elektrienergia kulu
Puhta vee kulu	192 liitrit	Elektrienergia tootmisel kuluv vesi
CO ₂ emissioon	2,27 kg	Globaase soojenemise potentsiaal
SO ₂ ekvivalent	4,03 g	Hapestumise potentsiaal
Ohtlike jäätmed	16,11 g	
Tööjõukulu	240 €	Tööjõule kuluv raha
Fü omahinna lisa	240,08 €	Kulud kokku
Ajakulu	8 h	Aeg mis kulub protsessi jaoks
Materjali jääk	-	
Elektrienergia maksumus	7,91 senti	Elektrienergiale kuluv summa

2.2.5. Lintsaega lõikamine

Saagimine toimub Bomar lintsaega, võimsusega 3 kW [24]. Lintsaega saetakse nii ruuttorud kui ribamaterjal sobivasse mõõtu.

40x40x3 terastorudest lõigatakse välja järgmise pikkusega jupid:

- Kolmnurkraam: 4 x 1235 mm, 4 x 161 mm, 2 x 172 mm ja 2 x 1246 mm
- Alumine raam: 2 x 1112 mm ja 2 x 450mm
- Turvatala: 2 x 380 mm ja 400 mm
- Jäikustala: 1112 mm

Raamile kulub kokku nelikanttoru 13,9 m ning raam koosneb 20 erineva suurusega torujupist ning torude saagimiseks tuleb sooritada 24 lõiget.

40x2000x4 ribamaterjalist lõigatakse välja järgmised osad:

- Torude kinnitus: 8 x 120 mm
- Istme kinnitus : 4 x 100 mm

Kokku kulub ribamaterjali 1360 mm ehk ligikaudu 1,4 meetrit ning sooritada tuleb 12 lõiget.

Võttes arvesse, et ühe lõike tegemiseks kulub 20 sekundit ning kui sinna lisada seadistusaeg ~30 sekundit, saame summaarseks lõikele kuluvaks ajaks 55 sekundit. Kokku tuleb ühe toote jaoks sooritada 36 lõiget, seega sellele kuluv aeg on $36 \times 55 = 1980$ sekundit = 33 minutit.

Energiat kulub ühe toote lõikamiseks $3 \text{ kW} \times 0,55 \text{ h} = 1,56 \text{ kWh}$ ning kui võtta arvesse, et keskmine elektrienergia maksumus on 4,13 senti/kWh, siis $4,13 \text{ senti/kWh} \times 1,56 \text{ kWh} = 6,5$ senti. Selle elektrienergia tootmiseks kulub $1,56 \times 0,1 = 156$ liitrit vett.

Tööjõukulu on umbes 10 €/h, seega lõikamisele kulub $10 \text{ €/h} \times 0,55 \text{ h} = 5,5 \text{ €}$ tööjõukulu. Sellest lähtuvalt võib öelda, et lintsaega lõikamise protsessi sisenditeks on materjal, tööjõud ja elekter. Seega kulub lõikamiseks kokku $5,5 \text{ €} + 0,065 \text{ €} = 5,565 \text{ €}$.

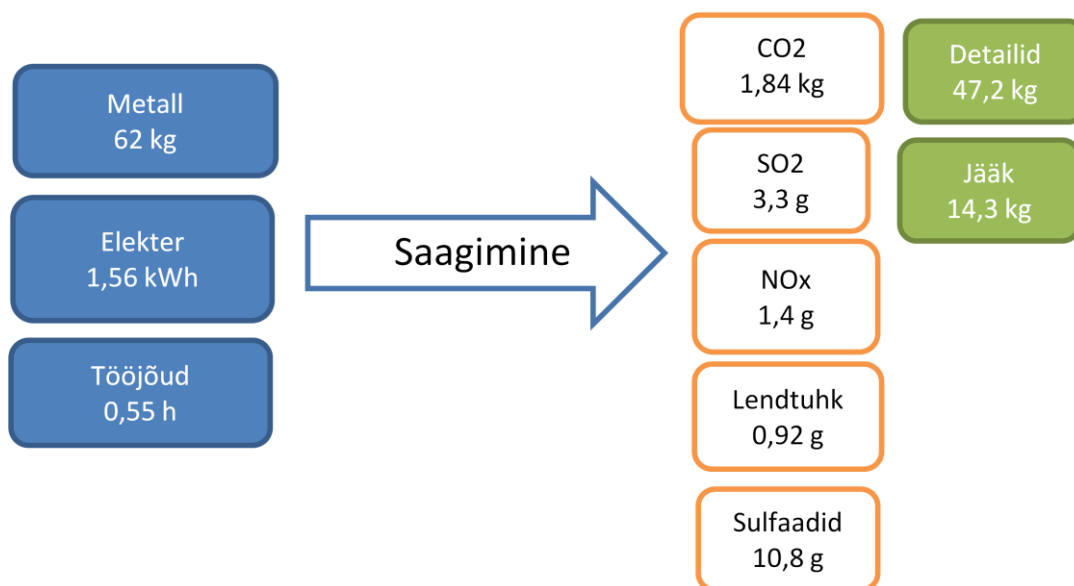
Lintsaagimise väljunditeks on saadud detailid, materjali jääk ning saaste. Saadud detailide kaal kokku on 47,2 kg jäägiks 14,28 kg metalli. Elektrienergia tootmise käigus tekkinud saaste on järgmine:

Õhku paisatakse:

- 1,18 kg CO₂ -> 1,18 x 1,56 = 1,84 kg
- 2,1 g SO₂-> 2,1 x 1,56 = 3,3 g
- 0,9 g NO_x-> 0,9 x 1,56 = 1,4 g
- 0,59 g Lendtuha-> 0,59 x 1,56 = 0,92 g

Vette:

- 6,9 g Sulfaate-> 6,9 x 1,56 = 10,8 g



Sele 2.6. Lintsaega saagimise sisendid ja väljundid

Tabel 2.11. Lintsaega saagimise KPI

KPI	Kogus 1/fü	Märkused
Energiakulu	1,56 kWh	Elektrienergia kulu
Puhta vee kulu	156 liitrit	Elektrienergia tootmisel kuluv vesi
CO ₂ emissioon	1,84 kg	Globaalse soojenemise potentsiaal
SO ₂ ekvivalent	3,3 g	Hapestumise potentsiaal
Ohtlike jäätmed	13,12 g	
Tööjõukulu	5,5 €	Tööjõule kuluv raha
Fü omahinna lisa	5,565 €	Kulud kokku
Ajakulu	0,55 h	Aeg mis kulub protsessi jaoks
Materjali jääk	14,3 kg	Jääk, palju materjali läheb raisku
Elektrienergia maksumus	6,5 senti	Elektrienergiale kuluv summa

2.2.6. Puurimine

Puurimisel kasutatakse puurpinki võimsusega 5,5 kW. Ühele tootele tuleb kokku puurida (toruprofiil ja lehtmaterjal) 40 ava diameetriga 11 mm. Sellest lähtuvalt arvestame pingi koormuseks 30 %. Seega tarbib puurpink võimsust $5,5 \times 0,3 = 1,65$ kW. Korraga puuritakse 1 auk ning ühe augu puurimiseks koos ettevalmistusajaga (seadistamine) kulub umbes 45 sekundit. Seega 40 augu puurimiseks kulub $40 \times 45 = 1800$ sekundit ehk 30 minutit aega. Järelikult kulub elektrienergiat raami puurimiseks $1,65 \text{ kW} \times 0,5 \text{ h} = 0,825 \text{ kWh}$. Elektrienergia maksumuseks tuleb seega $0,825 \text{ kWh} \times 4,13 \text{ senti/kWh} = 3,41$ senti. Elektrienergia tootmiseks kulutatakse vett $0,825 \times 0,1 = 0,0825 \text{ m}^3$ ehk 82,5 liitrit. Tööjõu kuluks arvestatakse jälle umbes 10 €/h, seega on tööjõukuluks puurimisel $10 \text{ €/h} \times 0,5 \text{ h} = 5 \text{ €}$. Eelnevalt nimetatud tegurid on puurimise sisendid. Sellest lähtuvalt tuleb puurimise maksumuseks kokku $0,0341 \text{ €} + 5 \text{ €} = 5,034 \text{ €}$

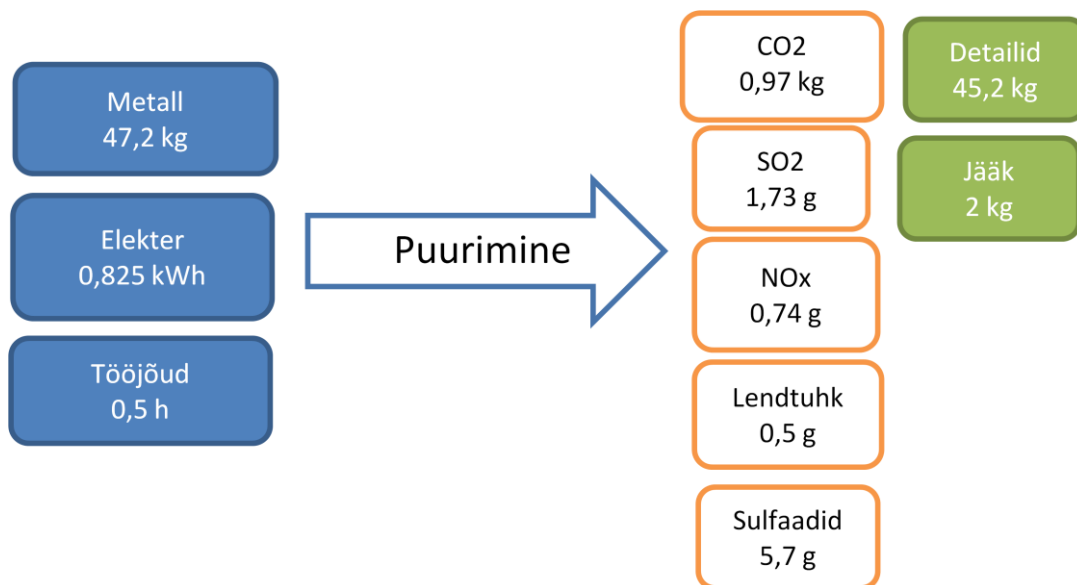
Puurimise väljunditeks on saadud detailid, materjali jääk ning saaste. Saadud detailide kaal kokku on 45,2 kg, jäägiks 2 kg metalli. Elektrienergia tootmise käigus tekkinud saaste on järgmine:

Õhku paisatakse:

- $1,18 \text{ kg CO}_2 \rightarrow 1,18 \times 0,825 = 0,97 \text{ kg}$
- $2,1 \text{ g SO}_2 \rightarrow 2,1 \times 0,825 = 1,73 \text{ g}$
- $0,9 \text{ g NO}_x \rightarrow 0,9 \times 0,825 = 0,74 \text{ g}$
- $0,59 \text{ g Lendtuha} \rightarrow 0,59 \times 0,825 = 0,5 \text{ g}$

Vette:

- $6,9 \text{ g Sulfaate} \rightarrow 6,9 \times 0,825 = 5,7 \text{ g}$



Sele 2.7. Puurimise sisendid ja väljundid

Tabel 2.12. Puurimise KPI

KPI	Kogus 1/fü	Märkused
Energiakulu	0,825 kWh	Elektrienergia kulu
Puhta vee kulu	82,5liitrit	Elektrienergia tootmisel kuluv vesti
CO ₂ emissioon	0,97 kg	Globaase soojenemise potentsiaal
SO ₂ ekvivalent	1,73 g	Hapestumise potentsiaal
Ohtlike jäätmed	6,94 g	
Tööjõukulu	5 €	Tööjõule kuluv raha
Fü omahinna lisa	5,034 €	Kulud kokku
Ajakulu	0,5 h	Aeg mis kulub protsessi jaoks
Materjali jääk	2 kg	Jääk, palju materjali läheb raisku
Elektrienergia maksumus	3,41 senti	Elektrienergiale kuluv summa

2.2.7. Keevitamine

„Wheelie“ raami detailide kokku keevitamiseks kasutatakse MIG- keevitust, mille võimsustarve keevitamisel on 2,3 kW. Kokku on vaja teha 28 keevisõblust, iga õmbluse pikkus on 160 mm, sellest lähtuvalt on keevisõmbluste pikkus kokku $28 \times 160 = 4480$ mm. Ühe õmbluse keevitamiseks kulub keevitajal aega ~150 sekundit (koos abiaegadega), seega kogu keevituseks kuluv aeg on $28 \times 150 = 4200$ sekundit = 70 minutit. Kaitsegaasina kasutatakse 80 % Ar + 20 % CO₂ gaasi ja keevitustradina 0,8 mm traati.

Keevitusprotsessi sisenditeks on tööjõud, eleker, kaitsegaas ning keevitustraad. Väljunditeks on keevitussuits, elektrienergia tootmisel tekkinud jäägid. Keevitussuits koosneb mitmedest ühenditest ja gaasidest, kuigi tegu on inimesele ohtlike ühenditega, siis keevitussuits töökohtadel kogutakse ja filtreeritakse.

Kogused on väikesed, sellest lähtuvalt usutakse, et laiemat keskkonnamõju keevitussuitsul ei ole ja jäetakse see analüüsis arvestamata. Sisenddetailid ja väljunddetailide kaalu vahe on minimaalne, seega ka seda siin ei arvestata.

Keskmine gaasikulu on 13 l/min ehk $0,013 \text{ m}^3/\text{min}$. 80% Ar + 20% CO₂ gaasi maksumus on $2,28 \text{ €/m}^3$. Keevitaja kulu on $\sim 15 \text{ €/h}$. Traadi kulu on 6,3 m/min, traad kaalub 0,004 kg/m, traadi hind on 1,69 €/kg.

Töötajal kulub ühe raami valmistamiseks 70 minutit (1,166 h) ehk tööjõukulu on $1,166 \text{ h} \times 15 \text{ €/h} = 17,5 \text{ €}$. Elektrienergiat kulub $2,3 \times 1,166 = 2,68 \text{ kWh}$. Elektrienergia maksumus on $2,68 \times 4,13 = 11,01$ senti. Gaasi kulu kokku on $0,013 \times 70 = 0,91 \text{ m}^3$, selle maksumuseks tuleb $0,91 \times 2,28 = 2,07 \text{ €}$. Keevitustraadi kulu on $6,3 \times 70 = 441 \text{ m}$, kaaluga $0,004 \times 441 = 1,764 \text{ kg}$, maksumuseks tuleb seega $1,764 \times 1,9 = 3,35 \text{ €}$. Seega kulub keevitusele kokku $17,5 \text{ €} + 0,1101 \text{ €} + 2,07 \text{ €} + 3,35 \text{ €} = 23,0301 \text{ €}$

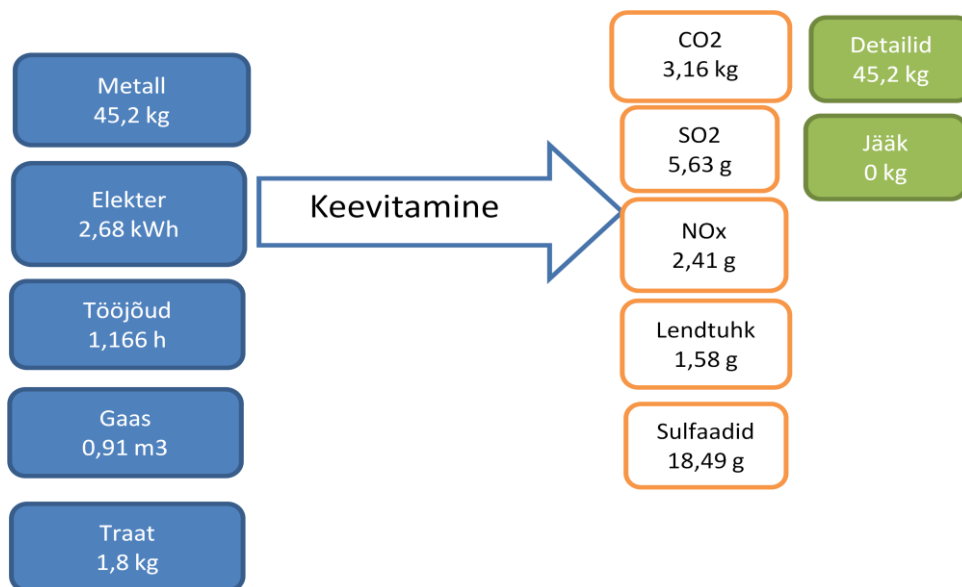
Elektri tootmisel tekib:

Õhku paisatakse:

- $1,18 \text{ kg CO}_2 \rightarrow 1,18 \times 2,68 = 3,1624 \text{ kg}$
- $2,1 \text{ g SO}_2 \rightarrow 2,1 \times 2,68 = 5,628 \text{ g}$
- $0,9 \text{ g NO}_x \rightarrow 0,9 \times 2,68 = 2,412 \text{ g}$
- $0,59 \text{ g Lendtuha} \rightarrow 0,59 \times 2,68 = 1,581 \text{ g}$

Vette:

- $6,9 \text{ g Sulfaate} \rightarrow 6,9 \times 2,68 = 18,492 \text{ g}$



Sele 2.8. Keevitamise sisendid ja väljundid

Tabel 2.13. Keevitamise KPI

KPI	Kogus 1/fü	Märkused
Energiakulu	2,68 kWh	Elektrienergia kulu
Puhta vee kulu	268 liitrit	Elektrienergia tootmisel kuluv vesi
CO ₂ emissioon	3,16 kg	Globaase soojenemise potentsiaal
SO ₂ ekvivalent	5,63 g	Hapestumise potentsiaal
Ohtlike jäätmed	22,48 g	
Tööjõukulu	17,5 €	Tööjõule kuluv raha
Fü omahinna lisa	23,03 €	Kulud kokku
Ajakulu	1,166 h	Aeg mis kulub protsessi jaoks
Materjali jääk	1,8 kg	Jääk, palju materjali läheb raisku (traadi kulu)
Elektrienergia maksumus	11,01 senti	Elektrienergiale kuluv summa

2.2.8. Värvimine

„Wheelie“ raami osad transpordib üks tööline värvimisruumi, kus toimub aerosoolvärvidega erinevate osade katmine. Tööjõukuluks on siin ühe inimese töö ja seda umbes 1 tund. Aerosoolvärvidena kasutatakse Maston COLORmix Spray COLOR [Sele 2.9] 400ml suuruseid purke. Raami värvitakse kolme erineva värviga – sinine, must ja valge. Sellepärast läheb kogu raami värvimiseks vaja kolme 400ml suurust aerosoolvärvi purki. Antud toote päritolumaa on Ecuador.



Sele 9 Maston COLORmix Spray COLOR [25]

Tegemist on mitmeotstarbelise, kiiresti kuivava alküüdvärviga. Sobib puit-, kivi-, metall- ja klaaspindadele ning enamikule plastpindadest. Aerosoolvärvi saab kasutada nii sise- kui ka välisviimistluseks.

Värvi ostetakse maaletoojalt K-Rauta hinnaga 4,10 €/tk (10,25 €/l). Kõiki kolme värvi kulub umbes 300 ml ühe „Wheelie“ raami värvimiseks. Seega realselt kasutatava värvi kulu on $3 \times 300 = 900$ ml, mis teeb hinnaks $0,9 \times 10,25 = 9,225$ €. Kuna värvi müüakse 400 ml purkidenä, siis tuleb osta $3 \times 400 = 1200$ ml ja selle hinnaks kujuneb $1,2 \times 10,25 = 12,30$ €.

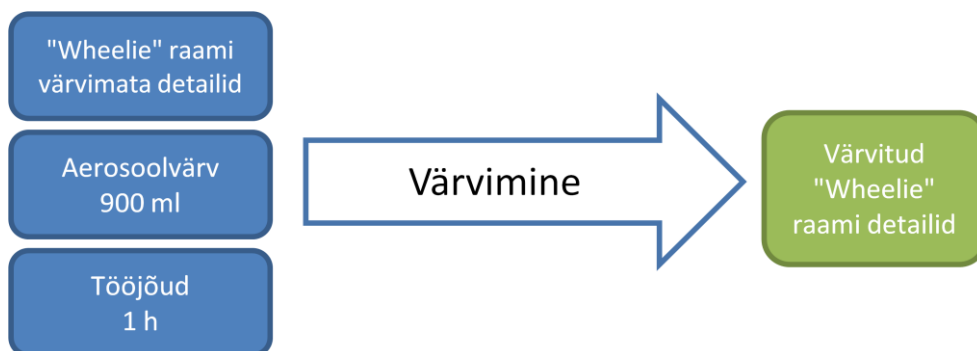
Tabel 2.14. Aerosoolvärvi majanduslik analüüs

Nimi	€/tk	€/l	€/fü	Jääk (ml)
Aerosoolvärv sinine	4,10	10,25	3,075	100
Aerosoolvärv must	4,10	10,25	3,075	100
Aerosoolvärv valge	4,10	10,25	3,075	100
Kokku	12,30		9,225	300

Tootjapoolses infolehes on näidatud ära värvimistehnika, mis spetsifitseerib ära nii kauguse kui ka kaitsevahendite kasutamise. Toode on kontrollitud vastavalt CHIP regulatsioonile ja on klassifitseeritud vastavalt toksikoloogilistele ohtudele. Aerosoolvärville on antud märgistused:

- R10 – tuleohtlik
- R52/53 – kahjulik veeorganismidele
- R66 – korduv toime võib põhjustada naha kuivust või lõhenemist

Taoliste hoiatustega tuleb arvestada ning jälgida, et värvimine toimuks piisavalt suletud keskkonnas, millel on hea ventileeritavus. Tootjapoolsete ohutusnõuete järgimine on kohustuslik, sest vastasel juhul võivad töötajad enda tervist kahjustada. Tootja ei avalda infot, kui palju on erinevaid kemikaale aerosoolvärvi purgis olevas gaasis.



Sele 2.10. Värvimise sisendid ja väljundid

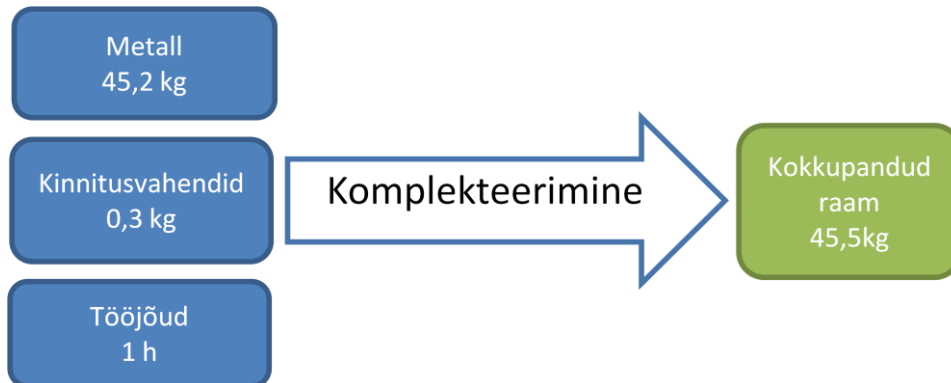
Tabel 2.15. Värvimise KPI

KPI	Kogus 1/fü	Märkused
Energiakulu	-	Elektrienergia kulu
Puhta vee kulu	-	Elektrienergia tootmisel kuluv vesi
CO ₂ emissioon	-	Globaalse soojenemise potentsiaal
SO ₂ ekvivalent	-	Hapestumise potentsiaal
Ohtlike jäätmed	-	
Tööjõukulu	10 €	Tööjõule kuluv raha
Fü omahinna lisa	22,3 €	Kulud kokku
Ajakulu	4 h	Aeg mis kulub protsessi jaoks
Materjali jääk	0,3 kg	Jääk, palju materjali läheb raisku
Elektrienergia maksumus	-	Elektrienergiale kuluv summa

2.2.9. Komplekteerimine

„Wheelie“ raami komplekteerimiseks kasutatakse käsitööriistu (mutrivõti, narrekomplekt). Seega ainuke kulu raami kokku panekul on tööjõukulu. Arvestades tööjõukuluks 10 €/h ning raami kokkupaneku ajaks kahe inimese poolt 1 tund, saame tööjõukuluks raami kokkupanemisel 20 €.

Raami komplekteerimise sisendiks on raami osad, kinnitusvahendid ja tööjõud ning väljundiks on kokku pandud raam.



Sele 2.11. Komplekteerimise sisendid ja väljundid

Tabel 2.16. Komplekteerimise KPI-d

KPI	Kogus 1/fü	Märkused
Energiakulu	-	Elektrienergia kulu
Puhta vee kulu	-	Elektrienergia tootmisel kuluv vesti
CO ₂ emissioon	-	Globaase soojenemise potentsiaal
SO ₂ ekvivalent	-	Hapestumise potentsiaal
Ohtlike jäätmed	-	
Tööjõukulu	20 €	Tööjõule kuluv raha
Fü omahinna lisa	20 €	Kulud kokku
Ajakulu	1 h	Aeg mis kulub protsessi jaoks
Materjali jääk	-	Jääk, palju materjali läheb raisku
Elektrienergia maksumus	-	Elektrienergiale kuluv summa

2.2.10. Analüüsi kokkuvõte

Eelnevate tabelite ja seledel alusel saadakse teha kokkuvõtte LCA analüüsi tulemustest. Eesmärgiks oli uurida erinevaid KPI-sid „Wheelie“ raami koostamisel. Järgnevalt tuuakse välja kogu protsessi kitsaskohad, mida saab tõenäoliselt parandada ning tegevused, kus on olukord hea.

Keskkonna KPI-de analüüsi tulemusena leiti kuue protsessi energiakulu, puhta vee kulu, CO₂ emissioon, SO₂ ekvivalent, ohtlikud jäätmed ja materjalikulu. Üheks suurimaks materjali raiskamise protsessiks on lintsaega lõikamine, mille käigus on materjalikuluks 14,3 kg. Keskkonda paiskab kõige rohkem CO₂ ja SO₂ gaase keevitamine.

Keevitamisel kulub ka kõige rohkem puhast vett ning tekib suurim ohtlike jäätmete kogus. Keskkonda ei ohusta aga üldse komplekteerimine, sest tegevus käib inimjõul ja mehaaniliste tööriistadega.

Majandusliikude KPI-de analüüs käsitles tööjõukulu, füüsilise ühiku omahinna lisa ja elektri maksumust. Selles valdkonnas on kõige kriitsemaks kohaks projekteerimine. Protsessile kulub ülekaalukalt kõige rohkem tööjõukulu, millega kaasneb ka füüsilise ühiku omahinna kasv. Elektrit kulub kõige rohkem keevitamisele. Kvaliteedi KPI-dest oli vaatluse all ajakulu. Projekteerimisele läheb ka selles valdkonnas rohkem, kui teistele protsessidele.

Selliste andmete põhjal saadakse kätte kogu protsessi probleemsed kohad ning hakatakse nende asemele leidma alternatiivseid võimalusi.

2.2.11. Simulatsioonid

Antud punktis vaadeldakse eelmises osas leitud probleemseid protsesse ja asendatakse neid nende alternatiividega. Simulatsiooni eesmärgiks on uurida, kuidas hakkavad erinevad KPI-d käituma, kui asendada protsesse.

Esimene simulatsioon

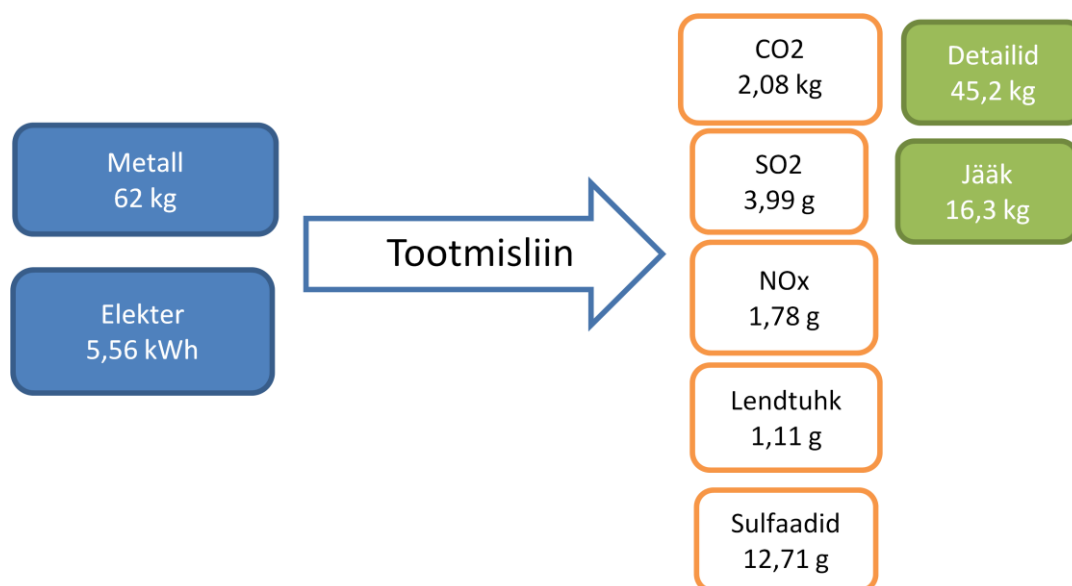
Eelneva töö käigus leiti „Wheelie“ raami ühe toote valmistamise KPI-d. Kuna toodet on mõistlik hakata tootma massidele, siis simuleeritakse tootmine automaatseks. Eeldatavalt saab sellisel moodusel radikaalselt vähendada tööjõukulu ja ühe toote valmimise kiirust.

Tootmistehasesse installeeritakse pikk tootmisliini, mille protsessideks saavad olema:

- Materjali paigutus lindile
- Materjali lõikamine sobivasse pikkusesse
- Jäägi eemaldamine
- Puurimine
- Raami detailide valmimine

Keevitusrobot töötaks peale tootmisliini ning seda hetkel siinses simulatsioonis ei käsitleta.

Kogu tootmisliini sisenditeks on standardsed metalltooted ja elekter. Väljunditeks saavad raami valmistamiseks vajaminevad detailid, metallijääk ja erinevad protsesside käigus tekkinud gaasid ja ained [Sele 2.12].



Sele 2.12. Tootmisliini sisendid ja väljundid

Simulatsiooni tulemusena otsitakse erinevate masinate karakteristikud ja luuakse üldkokkuvõttes tabel KPI-dest, mis on olnud vaatluse all ka selle töö eelnevates osades [Tabel 2.17].

Tabel 2.17. Tootmisliini KPI

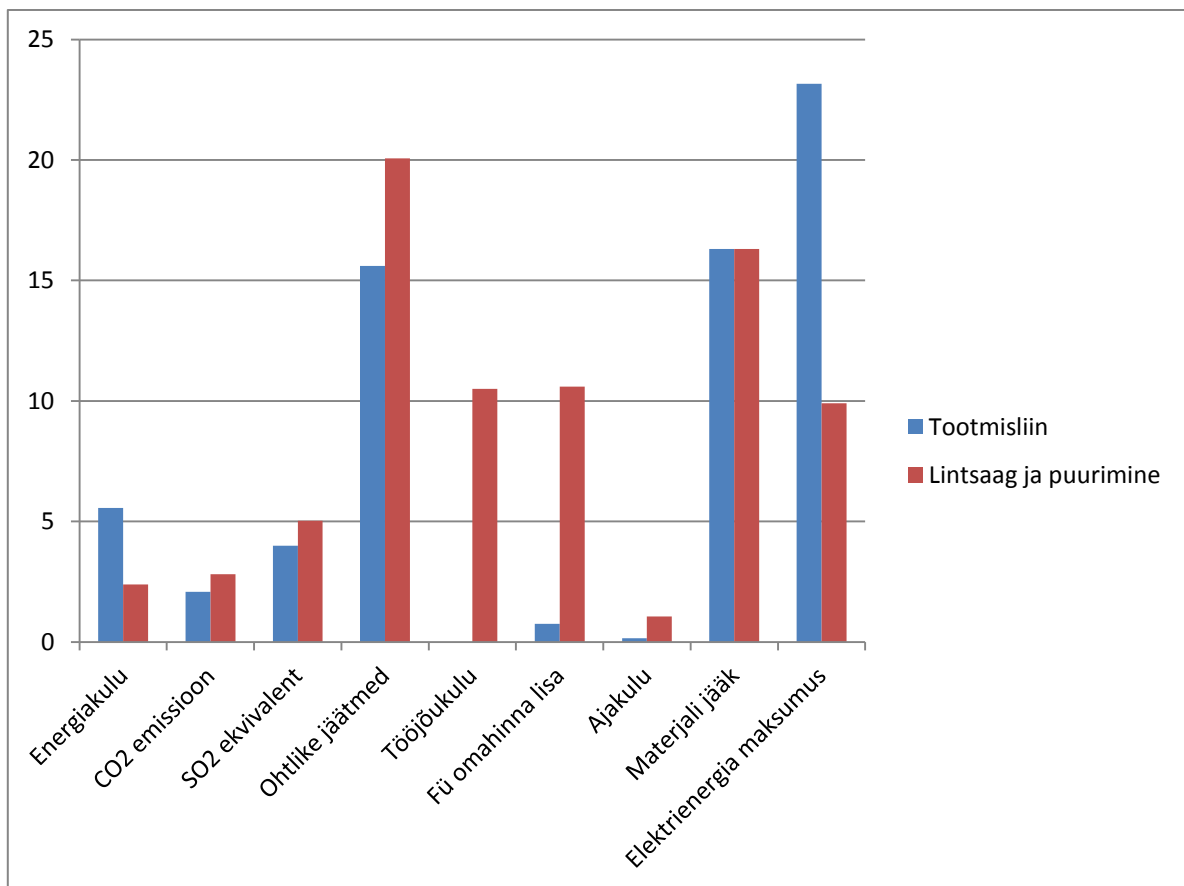
KPI	Kogus 1/fü	Märkused
Energiakulu	5,56 kWh	Elektrienergia kulu
Puhta vee kulu	556 liitrit	Elektrienergia tootmisel kuluv vesti
CO ₂ emissioon	2,08 kg	Globaase soojenemise potentsiaal
SO ₂ ekvivalent	3,99 g	Hapestumise potentsiaal
Ohtlike jäätmed	15,60 g	
Tööjõukulu	-	Tööjõule kuluv raha
Fü omahinna lisa	0,75 €	Kulud kokku
Ajakulu	0,15 h	Aeg mis kulub protsessi jaoks
Materjali jääk	16,3 kg	Jääk, palju materjali läheb raisku
Elektrienergia maksumus	23,16 senti	Elektrienergiale kuluv summa

Taolise tootmisliini paigaldamisega kaetakse hetkel kahes erinevas osas olevat protsessi – lõikamine ja puurimine. Selle jaoks, et arvud oleksid omavahel võrreldavad, liidame eelnevalt leitud saagimise KPI-d [Tabel 2.11] puurimise omadega [Tabel 2.12] ning võrreldakse neid summaarselt [Tabel 2.18].

Tabel 2.18 Lintsa ja puurimise summaarne KPI

KPI	Kogus 1/fü	Märkused
Energiakulu	2,385 kWh	Elektrienergia kulu
Puhta vee kulu	238,5 liitrit	Elektrienergia tootmisel kuluv vesi
CO ₂ emissioon	2,81 kg	Globaalse soojenemise potentsiaal
SO ₂ ekvivalent	5,03 g	Hapestumise potentsiaal
Ohtlike jäätmed	20,06 g	
Tööjõukulu	10,5 €	Tööjõule kuluv raha
Fü omahinna lisa	10,599 €	Kulud kokku
Ajakulu	1,05 h	Aeg mis kulub protsessi jaoks
Materjali jääk	16,3 kg	Jääk, palju materjali läheb raisku
Elektrienergia maksumus	9,91 senti	Elektrienergiale kuluv summa

Järgnevalt saadakse viia KPI-d ühele graafikule ja võrrelda kahte moodust.



Sele 2.13. Tootmisliini ning lintsa ja puurimise KPI-de võrdlus

Eelnevalt seelt [Sele 2.13] ja ka tabelitest 2.17 ning 2.18 on näha, et tootmisliini installeerimisega saaks tootmist optimeerida. Seda näitab asjaolu, et üldkokkuvõttes väheneb CO₂ emissioon, SO₂ ekvivalent, ohtlike jäätmete teke, füüsilise ühiku omahinna lisa ja ajakulu. Tootmisliini kaotaks näiteks tööjõukulu täiesti ära, sest kogu töö teevad masinad ja robotid.

Tootmisliini tooks siiski kaasa suurema energiakulu ja sellega tulenevalt ka elektrienergia maksumuse. Ainuke KPI, mis jääks muutumatuks tootmisliini käiku toomisel, oleks materjalijääk.

Simulatsiooni tulemusena võib kinnitada eelnevalt oletatud, et tootmisliini installeerimisega võidetakse nii ajas, kuludes kui ka keskkonda saastavates tegurites.

Teine simulatsioon

Järgnevalt simuleeritakse projekteerimist. Uuritakse kas prototüübi omahinda oleks võimalik langedata, kui kasutada kahe projekteerija asemel kolme või ühte ning tuuakse välja keskkonna KPI-de muutus ning reaalne ajakulu.

„Wheelie“ raami projekteerimisel 3 töötaja koostöös, kui eeldada, et kokku kulub töötajatel projekteerimiseks aega 16 töötundi teeb ühe inimese töötundide arvuks eelneva 8 tunni asemel 5,33 tundi. Seega tööjõukulu oleks $3 \times 5,33 \times 15 = 239,85\text{€}$. Arvuti võimsuseks on jätkuvalt 120 W, kuid nüüd on kasutusel 3 arvutit, seega elektritarbimine on $3 \times 5,33 \times 0,120 = 1,92\text{€ kWh}$. Siit järeldub, et elektrile kulub $1,92 \times 3,14 = 7,93$ senti. Kokku kulub projekteerimisele kolme projekteeriaga $239,85 + 0,08 = 239,93\text{€}$. Kuna elektrit kulus 1,92 kWh ning on teada, 1 kWh tootmiseks kulub 0,1 m³ vett, siis $0,1 \times 1,92 = 0,192$ m³ ehk 192 liitrit vett.

Õhku paisatakse:

- 1,18 kg CO₂ -> $1,18 \times 1,92 = 2,27$ kg
- 2,1 g SO₂-> $2,1 \times 1,92 = 4,03$ g
- 0,9 g NO_x-> $0,9 \times 1,92 = 1,73$ g
- 0,59 g Lendtuhka-> $0,59 \times 1,92 = 1,13$ g

Vette:

- 6,9 g Sulfaate-> $6,9 \times 1,92 = 13,25$ g

Tabel 2.19. Projekteerimise KPI kolme projekteerijaga

KPI	Kogus 1/fü	Märkused
Energiakulu	1,92 kWh	Elektrienergia kulu
Puhta vee kulu	192 liitrit	Elektrienergia tootmisel kuluv vesi
CO ₂ emissioon	2,27 kg	Globaalse soojenemise potentsiaal
SO ₂ ekvivalent	4,03 g	Hapestumise potentsiaal
Ohtlike jäätmed	16,11 g	
Tööjõukulu	239,85* € (ümardamise täpsus)	Tööjõule kuluv raha
Fü omahinna lisa	239,93*€ (ümardamise täpsus)	Kulud kokku
Ajakulu	5,333 h	Aeg mis kulub protsessi jaoks
Materjali jääk	-	
Elektrienergia maksumus	7,91 senti	Elektrienergiale kuluv summa

„Wheele“ raami projekteerimisel 1 projekteerijaga, kui projekteerimiseks kulub 16 töötundi. Tööjõukuluks tuleks $1 \times 16 \times 15 = 240$ €. Arvuti võimsuseks on jätkuvalt 120 W, kuid nüüd on kasutusel 1 arvuti, seega elektritarbimine on $1 \times 16 \times 0,120 = 1,92$ kWh. Siit järeldub, et elektrile kulub $1,92 \times 3,14 = 7,93$ senti. Kokku kulub projekteerimisele ühe projekteerijaga $240 + 0,08 = 240,08$ €. Kuna elektrit kulus 1,92 kWh ning on teada, 1 kWh tootmiseks kulub 0,1 m³ vett, siis $0,1 \times 1,92 = 0,192$ m³ ehk 192 liitrit vett.

Kuna antud arvud on täpselt samad, mis kahe projekteerija puhul ei hakata siinkohal täpsemaid tabeleid välja tooma, vaid tehakse kohe kokkuvõtte.

Kui võrrelda projekteerimist ühe, kahe ja kolme projekteerijaga, näeme, et keskkonnamõjurid jäävad iga variandi puhul samaks. Mis puudutab majanduslikku võitu, siis kõige kasulikum oleks olnud antud prototüübi projekteerimiseks kasutada kolme projekteerijat, sest sellisel juhul oleks võitnud 0,15* senti (*- ümardamise täpsus). Ühe ja kahe projekteerija kasutamisel olid tööjõukulud muutumatud. Reaalne võit erinevate arvu projekteerijate kasutamisele võtmisel seisneb siiski ainult ajakulus. Kui 1 projekteerija teeb tööd 16 tundi, kahe projekteerija koostöös valmib mudel 8 tunniga ning kolme projekteerija koostööl oleks võimalik antud töö valmis teha 5,333 tunniga ehk ajaline võit oleks 2,66 tundi.

2.3. Konstruksiooni analüüs

Konstruksiooni analüüsi peatükis uuritakse „Wheelie“ parameetreid ning tehakse ettepanekuid, mida oleks võimalik parandada, et tulevikus „Wheeliet“ kergemaks, kiiremaks, äkilisemaks ja vastupidavamaks muuta. Erinevad arvutused teostatakse, kuna „Wheelie“ koostati limiteeritud aja jooksul ning seetõttu jäid paljud vajalikud arvutused teostamata ning materjalid valiti konstruktiivselt. Tehtavate arvutuste põhjal on võimalik teada saada konstruktiivselt valitud materjalide tugevusvarud, laagrite eluiga, arvutuslik kiirus ja kiirendus ning teostada erinevaid parendusettepanekuid.

Esmalt teostatakse „Wheelie“, kui terviku, tugevusarvutused, et teada saada võimalikud pingekontsentraatorid ja suurimad deformatsioonid. Pinge ja deformatsiooni arvutused sooritatakse kasutades arvutitarkvara „ANSYS Workbench“. Tugevusarvutuste kiiremaks sooritamiseks lihtsustatakse esmalt diwheeli mudelit. Lihtsustuse lõppedes, laetakse CAD-iga valmistatud mudel üles „ANSYS“ keskkonda, kus teostatakse tugevusarvutused. Tugevusarvutuste teostamiseks pannakse paika rajatingimused ning seejärel saadakse tulemused, mida otsiti. Tähtis on märkida, et tugevusarvutused sisemisele ja välimisele raamile teostatakse eraldi.

2.3.1. Suurratta tugevusarvutused

„Wheelie“ suurrattad on tehtud sobiva läbimõõduga ja seinapaksusega ümartorudest, millest on painutatud välimised rattad. Ümartorud on ostetud metallitehasest Ruukki. Eelnevalt on leitud tugevusarvutustega sobiv ümartoru suurratate valmistamiseks.

Teostatud tugevusanalüüsidele „ANSYS 14.5 Workbench“ keskkonnas teostati välimise ratta ümartoru valik. Seda valimisprotsessi iseloomustab tabel 2.20. Välja on toodud kõik valikus olnud torud koos mõõtmetega ja materjali infoga. Lisaks on välja toodud valiku tegemisel tähtsad parameetrid.

Rohelisena välja toodud read tabelis märgivad parima hinna ja massi suhtega ümartorusid. Samas on jälgitud piisavat tugevusvaru. Meelde tuleb tuletada, et tugevusvaru oli sisse arvestatud ka mõjuvate jõudude suuruse valimisel eelnevalt. Seega sobivad tugevuselt kõik torud, mille suurima pinge väärtus on alla materjali voolavuspiiri väärtust. Voolavuspiiri väärtus on samuti tabelis 2.20 antud. Voolavuspiiri ületamise tõttu langesidki tabelis välja mõned ümartorud [26].

Tabel 2.20. Suurratta ümartoru valik

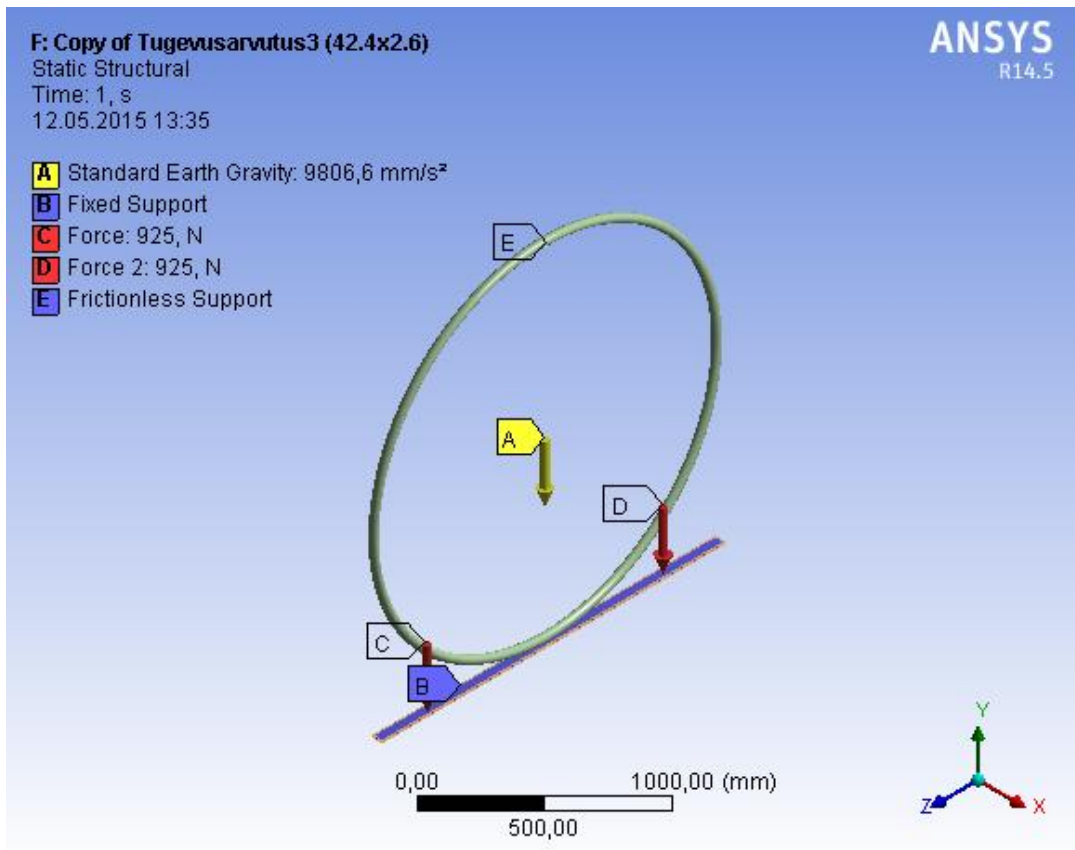
Toru	Materjal	Voolavuspiir [MPa]	Suurim pinge [MPa]	Läbipaine [mm]	Mass [kg/m]	1 ratta kaal[kg]	Hind [€/jm + km]	Hind 1 toru [€+km]
33.7x2.6	S420MH/S355J2H	420	312	7,3	1,90	11,4	1,95	11,7
33.7x3.2	Combi 200	200	281	6,55	2,41	14,46	2,25	13,5
42.4x2.6	S420MH/S355J2H	420	253	3,3	2,55	15,3	2,4	14,4
42.4x2.6	Combi 200	200	253	3,3	2,55	15,3	2,4	14,4
42.4x3.2	Combi 200	200	209	2,9	3,09	18,54	2,85	17,1
48.3x2.6	S355J2H	355	166	2,33	2,95	17,7	2,85	17,1
48.3x4	S355J2H	355	163	1,66	4,37	26,22	3,95	23,7

Parima hinna ja massi suhtega ning samas ka piisava tugevusvaruga toruks osutus ümartoru diameetriga 42,4 mm ning seinapaksusega 2,6 mm, mille analüüsi nüüd hakatakse teostama.

Tugevusarvutuste koormuseks võetakse 370 kg, millest 170 kg on sisemise raami mass, 150 kg inimese mass ja 50 kg lisavarustus (tool, mootorid, akud jne). Kuna arvutust teostatakse ühele rattale korraga, siis jagame massi kahega ning saadakse 185 kg ehk ligikaudu 1850 N ning jaotatakse see ära kahe punkti vahel, sest koormuse võtab ringjoonel vastu 2 rullikut [Sele 2.14]. Arvutuste lihtsustamiseks määratakse nendeks 2 punkti.

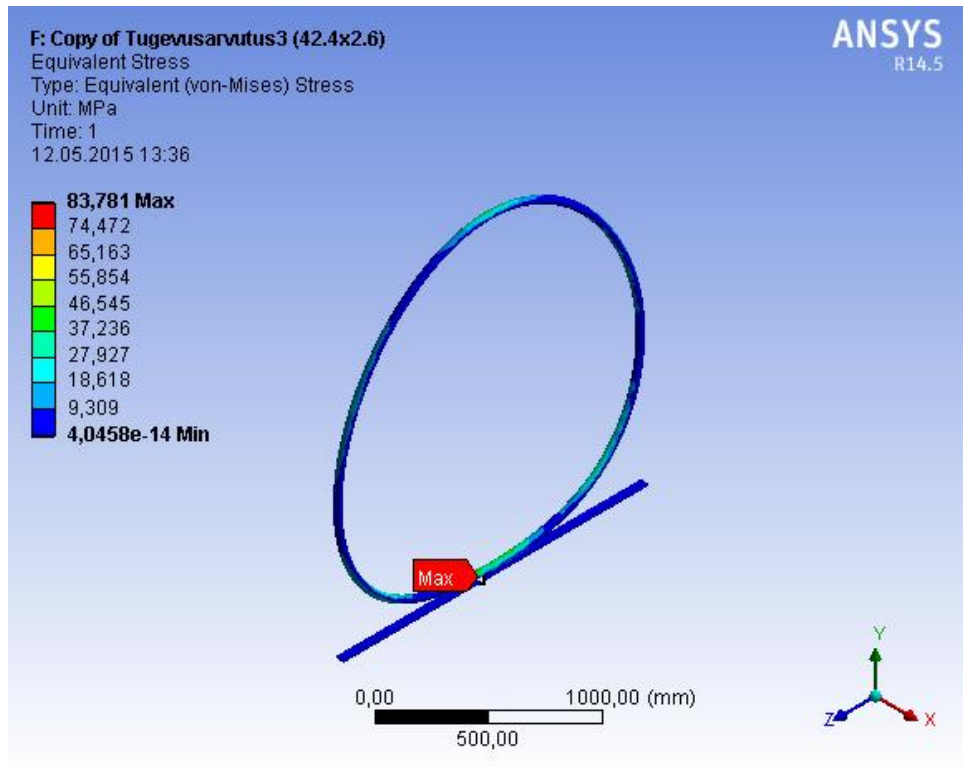
Järgnevalt on välja toodud erinevate reaalsete olukordade tugevusarvutuste tulemused. Taoliste olukordade tekkimine on teada vaadates „Wheelie“ sõitu praktikas. Ära peab mainima, et tugevusarvutust olukorras, kus sõitja on pea alaspidi sõidukis, ei tehta, sest reaalne elu on näidanud, et hetkel olemasolev sõiduk seda olukorda teostada ei suuda. Tähtsateks parameetriteks on tugevusarvutustes antud ratta valiku puhul maksimaalne pinge ja totaalne deformatsioon ehk läbipaine.

Järgneval seel 2.14 on näidatud rajatingimused, mida kasutatakse ratta tugevusarvutustel paigalolevas asendis. Punktid C ja D on rullikute mõjumise kohad ehk rajatingimustes mõjuvate jõudude kohad suuruses 925 N ühele rullikule. Punkt A on gravitatsioonikeskme punkt, kus mõjub Maa gravitatsiooni jõud rattale. Punkt E on toetuskohaks, kus toetab rattast kolmas rullik. Punkt B näitab ratta fikseerimise kohta, et teostada ratta staatiline tugevusarvutus.

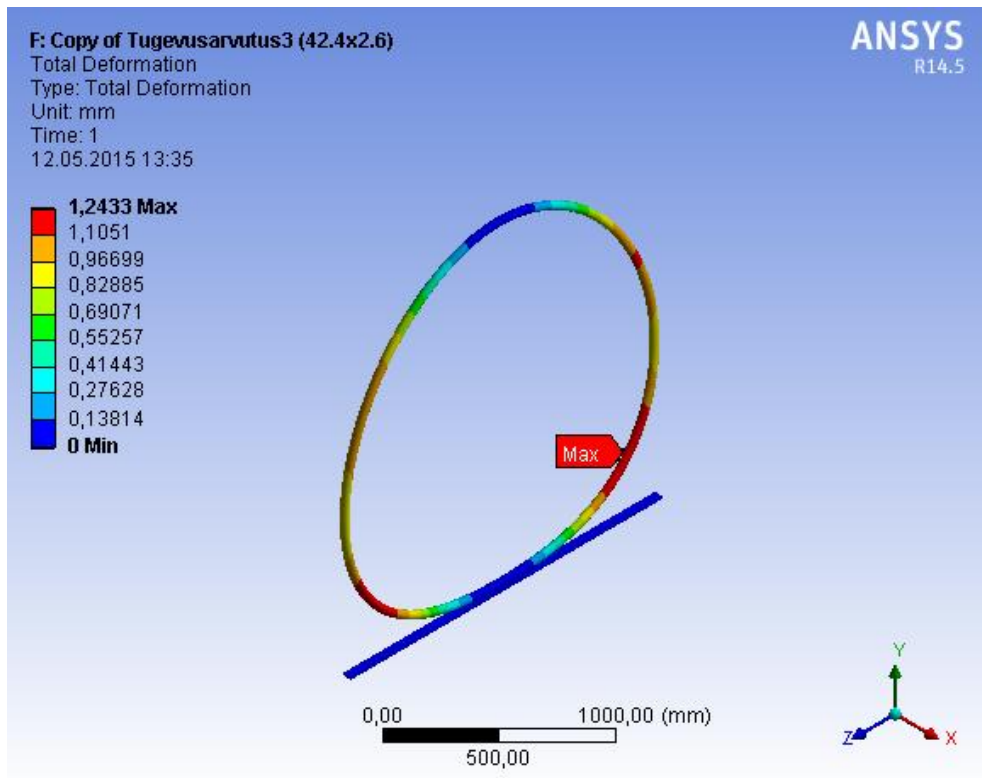


Sele 2.14. Rajatingimused

Tugevusarvutus tehakse olemasolevale ümartorule mõõtmetega 42,4x2,6 (toru välisläbimõõt, toru seinapaksus) maksimaalse totaalse deformatsiooni ja maksimaalse pinge leidmiseks.

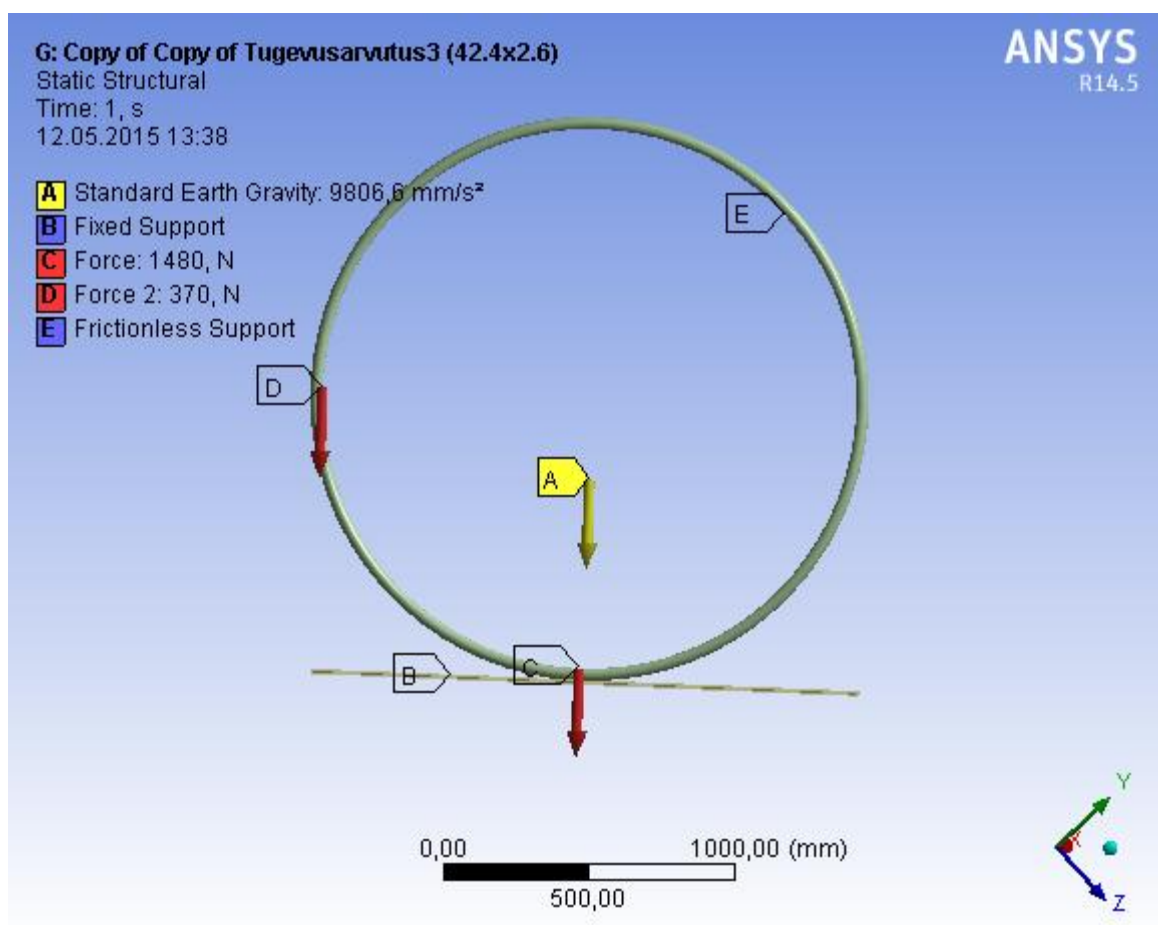


Sele 2.15. Maksimaalne pinged, MPa



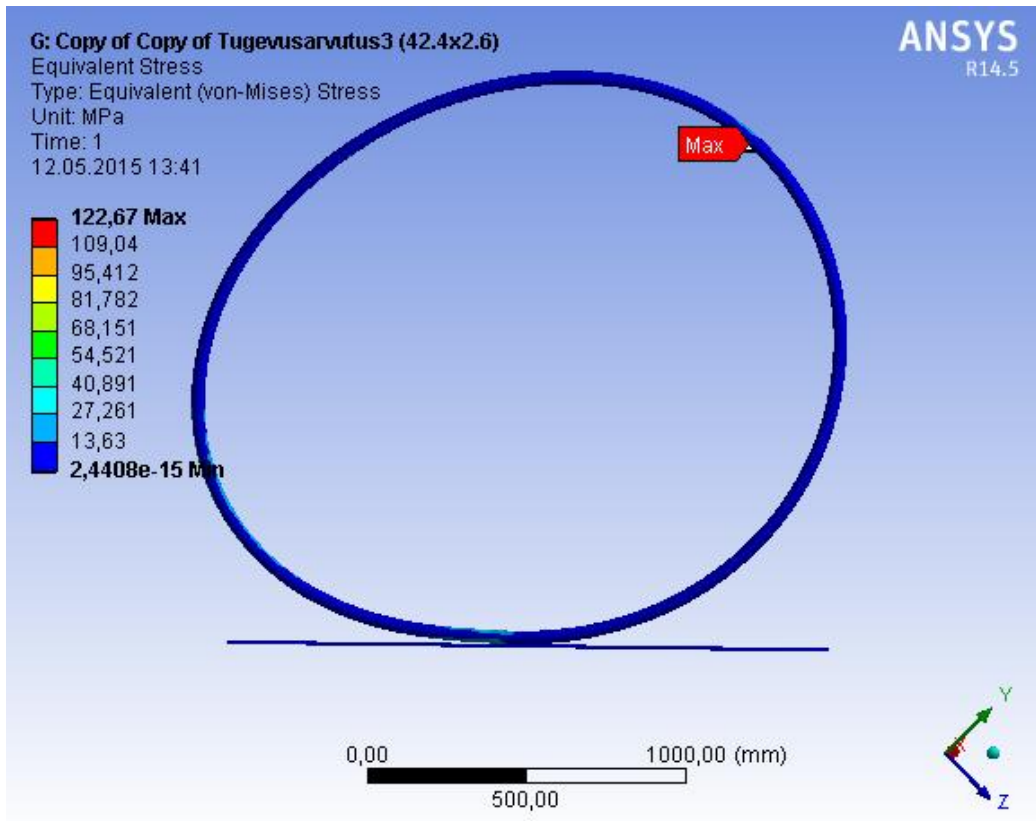
Sele 2.16. Totaalne deformatsioon, mm

Järgneval seel 2.17 on näidatud rajatingimused, mida kasutatakse ratta tugevusarvutustel maksimaalsel kiirendusel ja pidurdusel, kui üks rullikutest jõuab maapinnaga 0° peale. Punktid C ja D on rullikute mõjumise kohad ehk rajatingimustes mõjuvate jõudude kohad suuruses 1480 N alumisele rullikule ja 370 N külgmisele rullikule. Antud protsentuaalsed koormused on võetud üliõpilaste insenerikogemuste põhjal. Punkt A on gravitatsioonikeskme punkt, kus mõjub Maa gravitatsiooni jõud rattale. Punkt E on toetuskohaks, kus toetab ratast kolmas rullik. Punkt B näitab ratta fikseerimise kohta, et teostada ratta staatiline tugevusarvutus.

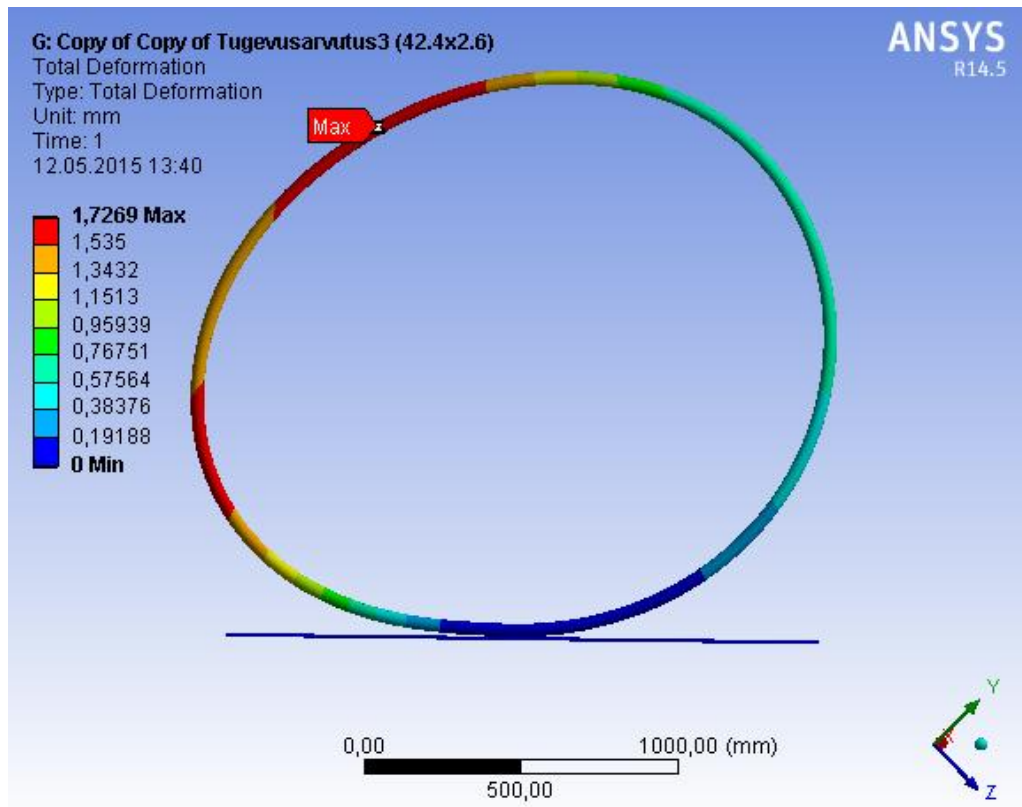


Sele 2.17. Rajatingimused

Tugevusarvutus tehakse olemasolevale ümartorule mõõtmetega 42,4x2,6 (toru välisläbimõõt, toru seinapaksus) maksimaalse totaalse deformatsiooni ja maksimaalse pingele leidmiseks.

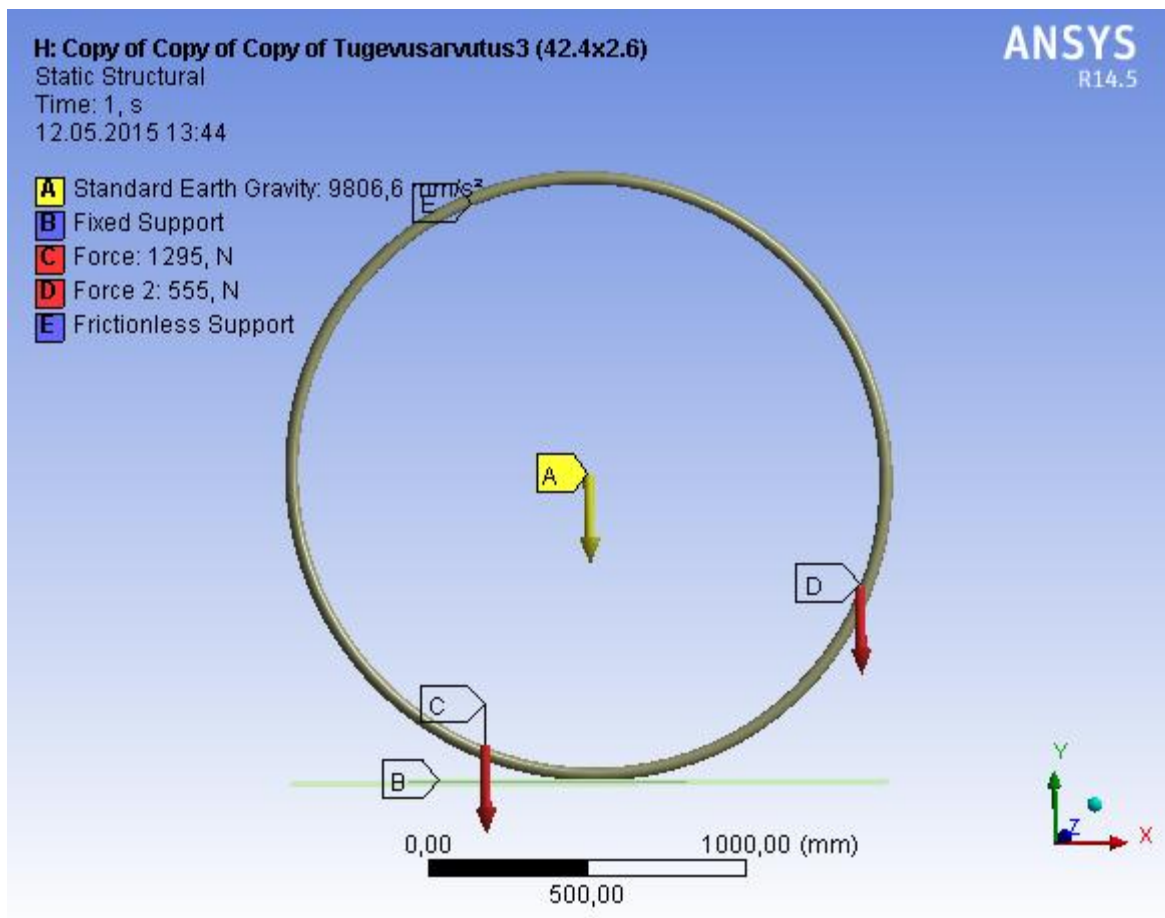


Sele 2.18. Maksimaalne pinged, MPa



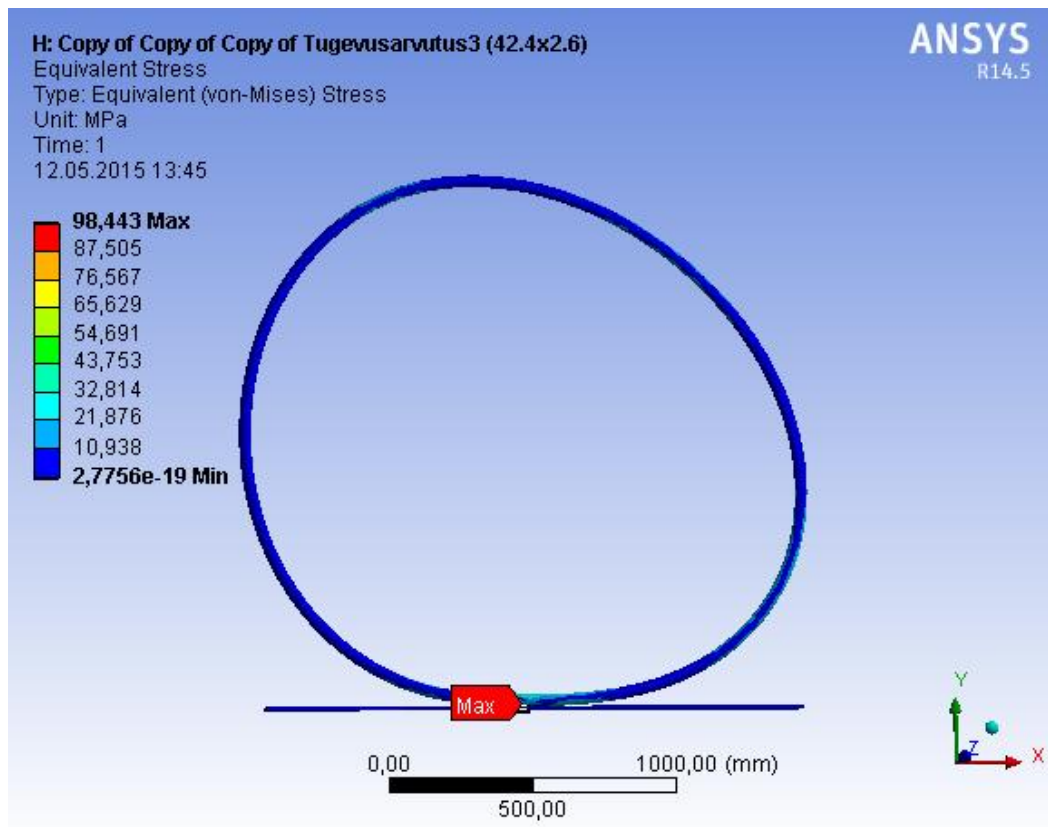
Sele 2.19. Totaalne deformatsioon, mm

Järgneval seel 2.20 on näidatud rajatingimused, mida kasutatakse ratta tugevusarvutustel, kui rullik C on läinud kiirendusel või pidurdusel $22,5^\circ$ peale ning maapind rullikut ei toeta. Rullik D on jõudnud seega $67,5^\circ$ peale ning mõjub rattale sealt kohast. Punktid C ja D on rullikute mõjumise kohad ehk rajatingimustes mõjuvate jõudude kohad suuruses 1295 N alumisele rullikule ja 555 N külgmisele rullikule. Antud protsentuaalsed koormused on võetud üliõpilaste insenerikogemuste põhjal. Punkt A on gravitatsioonikeskme punkt, kus mõjub Maa gravitatsiooni jõud rattale. Punkt E on toetuskohaks, kus toetab rattast kolmas rullik. Punkt B näitab ratta fikseerimise kohta, et teostada ratta staatiline tugevusarvutus.

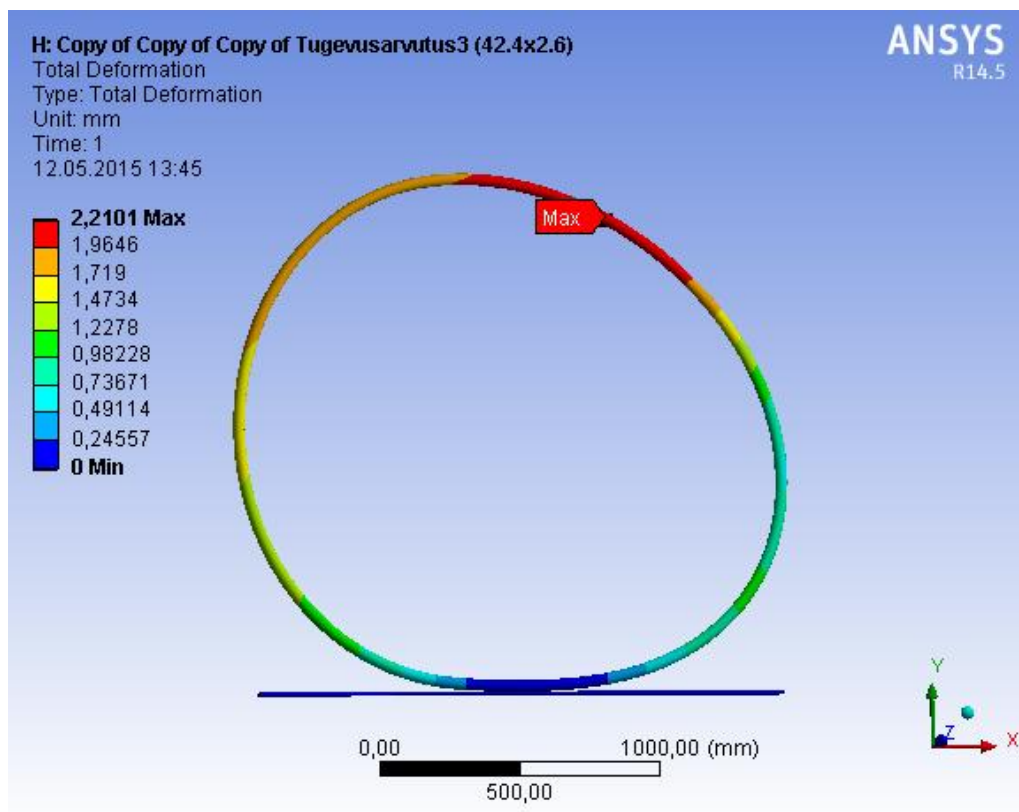


Sele 2.20. Rajatingimused

Tugevusarvutus tehakse olemasolevale ümartorule mõõtmetega 42,4x2,6 (toru välisläbimõõt, toru seinapaksus) maksimaalse totaalse deformatsiooni ja maksimaalse pinge leidmiseks.



Sele 2.21. Maksimaalne pinge, MPa



Sele 2.22. Totaalne deformatsioon, mm

Eelnevate tugevusarvutuste põhjal saab väita, et ratta tugevus on kindlasti ka kõige kriitilisemates olukordades tagatud, sest voolavuspiiri ei ületa maksimaalne pingekordagi. Kõige suurem pingetuli olukorras, kui sõidukil toimub äkkpidurdus või –kiirendus. Antud olukorras tekib ratta toetava rulliku juurde pingesuuruses 122,67 MPa, mis on peaaegu 3 korda väiksem lubatud kasutatud materjali pingest, milleks on 355 MPa. Selliste arvutuste põhjal saab „Wheelie” suurrattaid optimeerida kas siis maksumuse või kaalu poole pealt. Maksumust saab viia väiksemaks, kui kasutada terast S235, millega oleks konstruktsiooni tugevus ikka garanteeritud. Kaalu optimeerimise seisukohalt võiks välimised rattad teha ka alumiiniumtorudest, mis annaksid massis suure võidu.

2.3.2. Sisemise raami tugevusarvutus

Sisemine raam

„Wheelie“ sisemine raam koosneb: kahest kolmnurkraamist (küljeraam), kahest distantstorust ning redelraamist. Raam on valmistatud 40x40x3 ruutprofiilist.

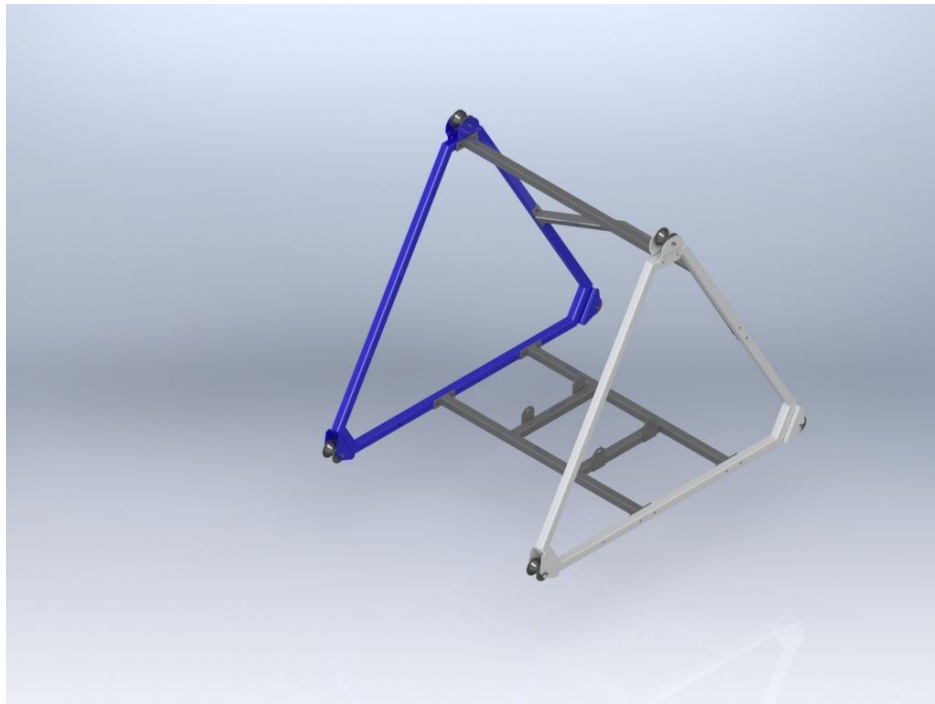
Kaksratta raami moodustavad küljeraam, keskmine raamiosa ning kaks distantstoru. Küljeraam toetub rullikute abil suurrattale. Alumiste rullikute kohad on ka suuremate jõudude mõjumise kohad, mille abil sai suurratta tugevusarvutus tehtud. Küljeraami koostamiseks kasutati kuute 40x40x3 mm ristlõike mõõtmetega nelikanttoru, mis ühendati omavahel keevitusega.

Keskmine raam nagu küljeraamgi on koostatud 40x40x3 mm nelikanttoru juppidest. Lõigatud torujupid on keevitatud ühtseks osaks. Lisatud on veel neli turvaistme kinnitusplaati ning pikemate torude otstesse küljeraami kinnitusplaadid. Redelraam kinnitub poltliidete abil küljeraamide külge.

Peale nende osade on raamil veel kaks distantstoru, mis mõlemad on 40x40x3 mm ristlõikega nelikanttorud nagu eelnevadki raamiosad. Keskmine tugitala koosneb kolmest kokku keevitatud torujupist. Ülemine tugitala on täispikkuses nelikanttoru. Mõlema tugitala otstes on kinnitusplaadid keevitatud lihtsaks monteerimiseks poltide abil.

Sisemise raami külge kinnituvad elektrimootorid koos ratastega, mootori kronsteinid, akud, turvatool jne. Antud esemed on lihtsustamise huvides eemaldatud, kuid nende massiga on arvutustes siiski arvestatud.

Lisavarustuse massiks on kokku arvestatud 50 kg ning antud raami massiks on 59,5 kg. Seel 2.23 on näidatud lihtsustatud raam, mida arvutuses kasutati.



Sele 2.23. Arvutustes kasutatav sisemine raam

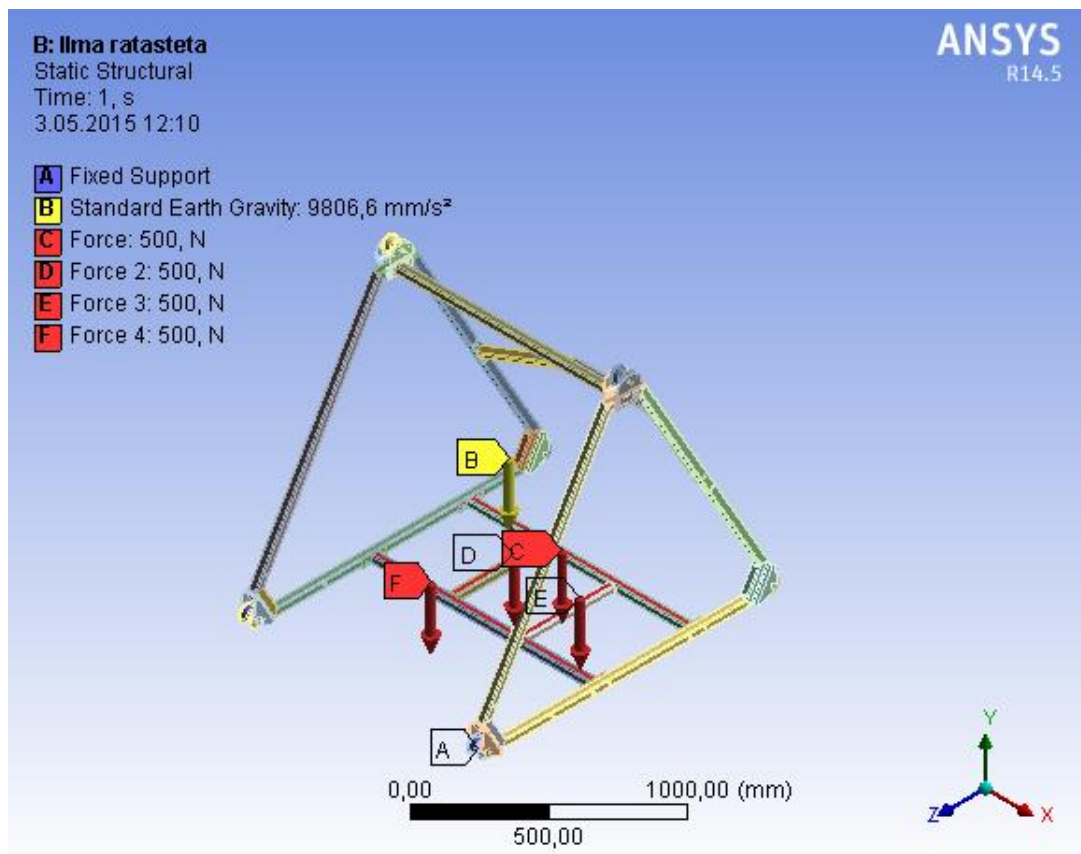
Esialgused tugevusarvutused

Tugevusarvutused teostatakse selleks, et teada saada, kas antud raami oleks võimalik optimeerida. Peamine kriteerium, mida oleks võimalik optimeerida on sisemise raami mass. Hetkel on sisemise raami juures kasutusel 40x40x3 ruutprofiil, arvutuste tulemusena saadakse teada, kas oleks võimalik kasutada ka väiksema küljepikkusega ruutprofiili. Toruprofiil materjaliks on teras 235JR ehk materjali voolepiiriks on 235 MPa.

Raami projekteeritakse kasutades programmi Solidworks2013. Antud programmi abil teostatakse raamile ka lihtsustused, et arvutusi oleks kergem teostada ning seejärel sisestatakse lihtsustatud raam ANSYS Workbench 14.5 keskkonda, kus teostatakse tugevusarvutused.

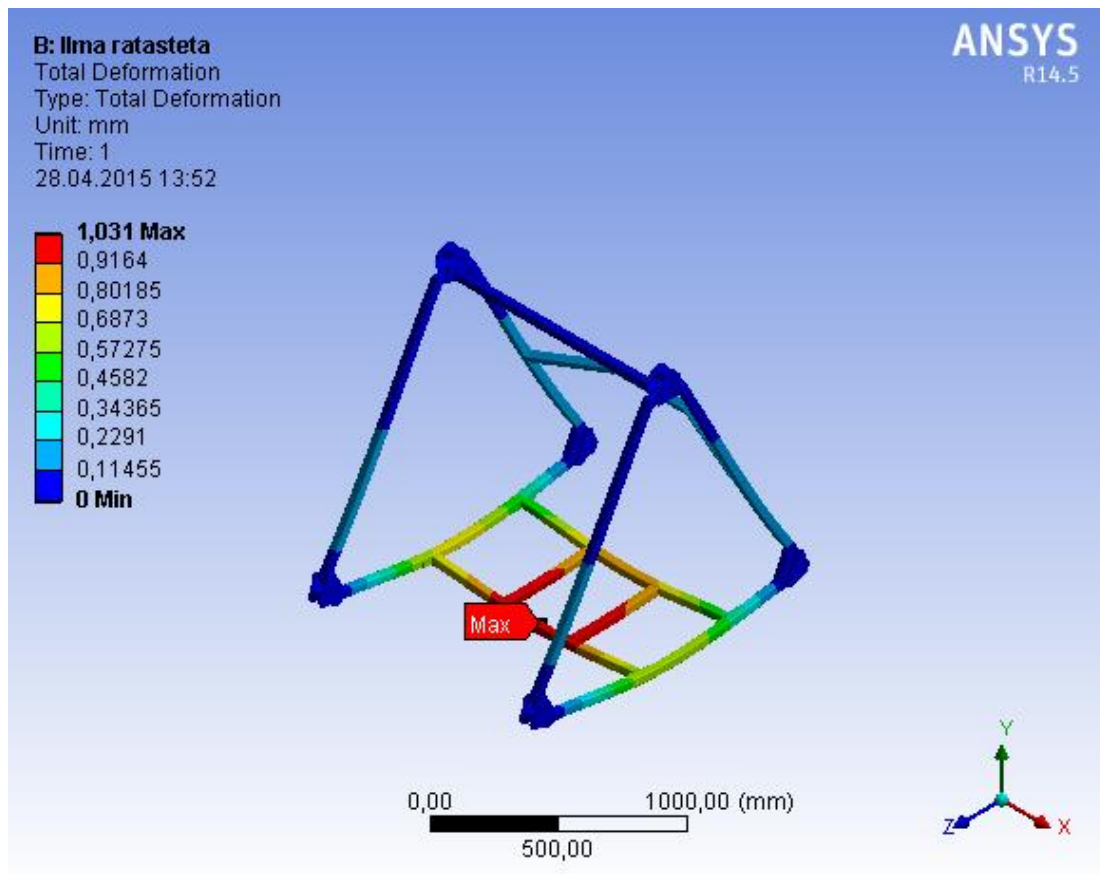
Esmalt teostatakse sisemise raami, kui terviku tugevusarvutused, et teada saada võimalikud pinge kontsentraatorid ja suurimad deformatsioonid. Tugevusarvutuste sooritamiseks tuleb kõigepealt valida sobivad rajatingimused.

Antud raami arvutustes kasutatud rajatingimused on näidatud seel 2.24. Kokku mõjub raamile jõud 2000 N, mis on ühtlaselt jaotatud redelraamile. Antud jõud sisaldab endas lisavarustust ja inimest kaaluga kuni 150 kg. Sisemine raam toetub neljale rullikule, mis omakorda toetuvad suurtele ratastele. Rullikute pinnad, mis toetuvad rattale on kinni pandud kasutades „fixes supporti“ ning selleks, et arvutustes arvestataks ka raami enda massiga on rajatingimuseks ka „standard earth gravity“.



Sele 2.24. Sisemise raami rajatingimused

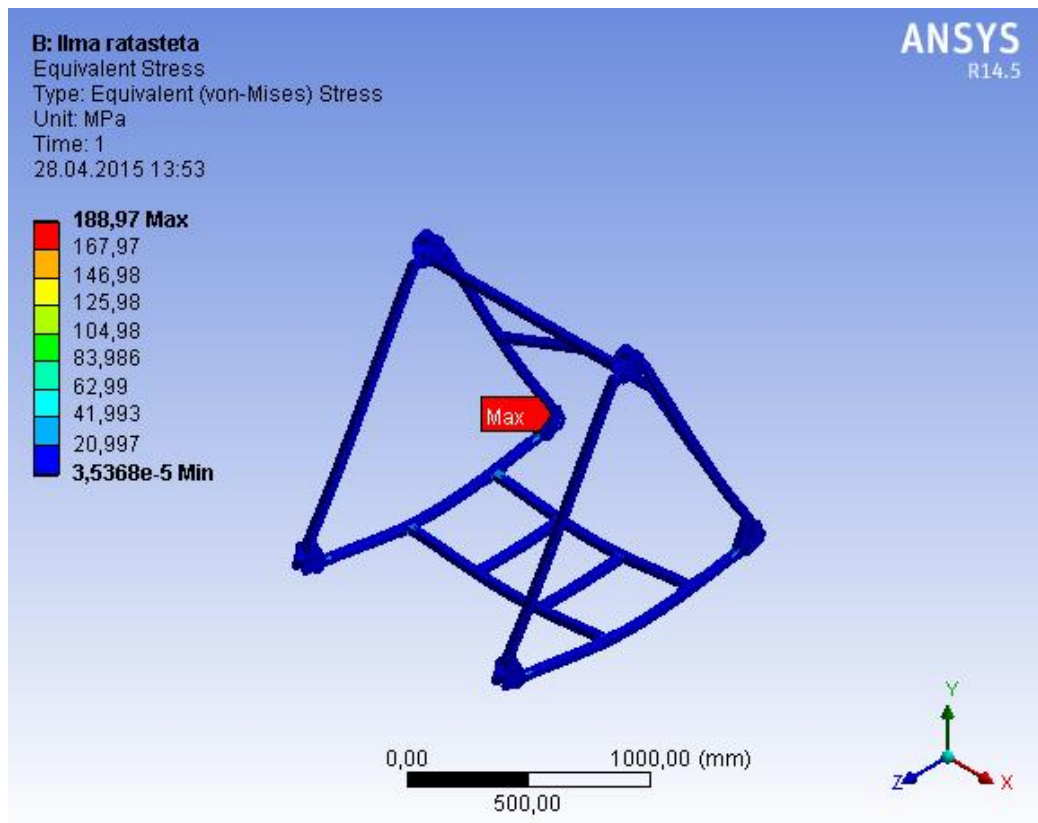
Esiatgu arvutakse välja sisemise raami maksimaalne deformatsioon. Arvutuste tulemusi on võimalik näha seel 2.25.



Sele 2.25. Sisemise raami deformatsioonid

Selet 2.25 on näha, et antud raami maksimaalne deformatsioon on 1,031 mm ning langeb redelraamile. Antud deformatsioon ei ole konstruktsioonile mitte kuidagi ohtlik.

Järgnevalt arvutatakse välja sisemise raami maksimaalne pinge, maksimaalne pinge ei tohi ületada materjali voolepiiri, milleks on 235 MPa. Pinge arvutuse tulemusi on võimalik näha selet 2.26.

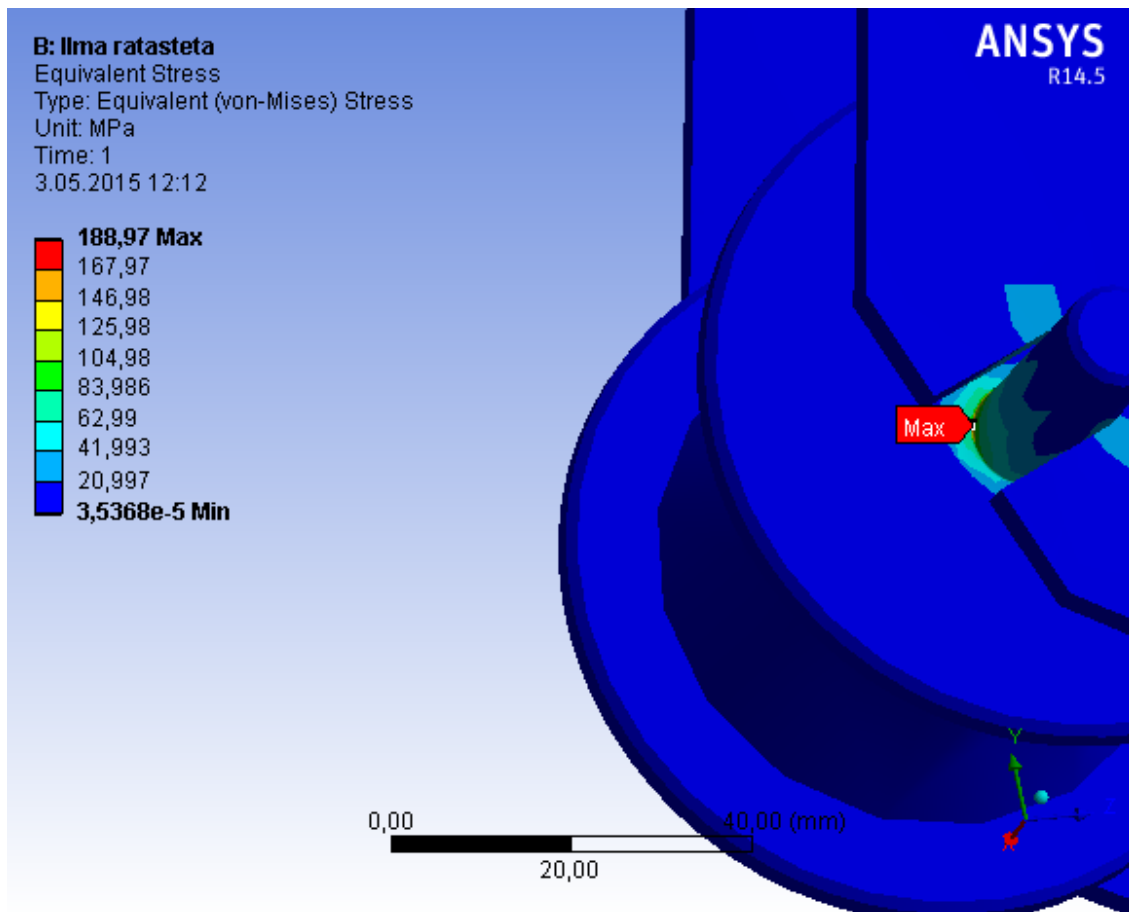


Sele 2.26. Sisemise raami pinge

Selet 2.26 on võimalik näha, et maksimaalne pinge langeb kuskile rulliku juurde, paremaks nägemiseks tuleb antud tulemust suurendada. Selet 2.27 on näha sisemise raami pinge kontsentraatorit.

Sisemise raami kokkuvõte

Arvutuste tulemustest on võimalik näha, et maksimaalne deformatsioon 1,031 mm langeb redelraamile ning maksimaalne pinge 189 MPa rulliku teljele. Selleks, et teada saada täpsemad tulemused, tuleb teostada uued tugevusarvutused, kus võrgustiku ruutude suurust vähendada, et saada täpsemad tulemused.

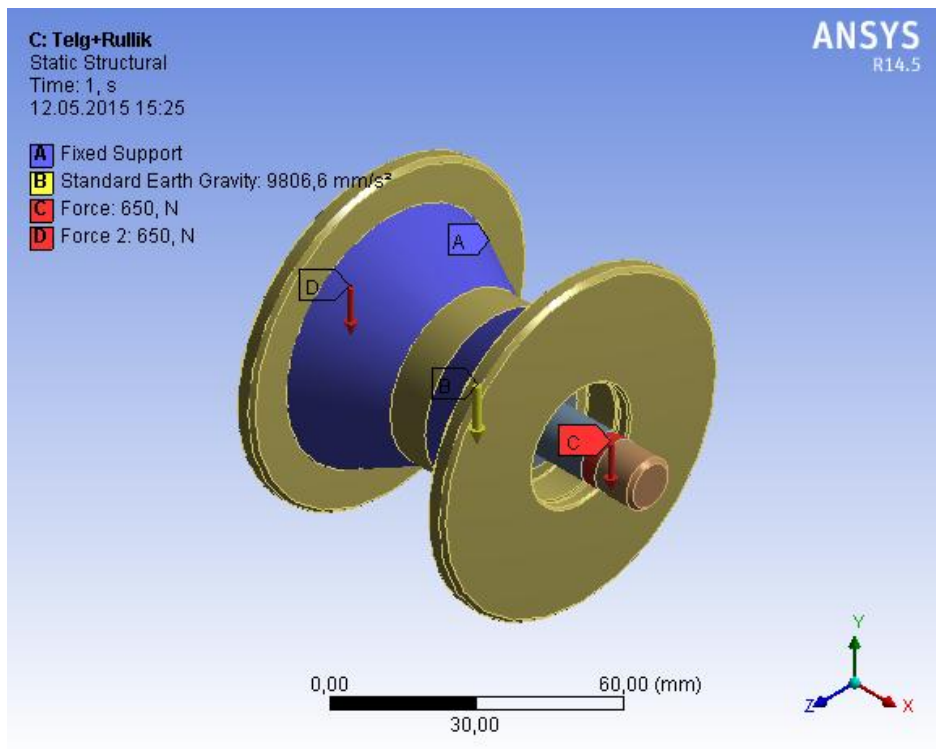


Sele 2.27. Sisemise raami maksimaalne pinge

Selet 2.27 on võimalik näha, et maksimaalne pinge langeb rulliku teljele. Maksimaalse pinge väärtuseks on 189 MPa, mis on väiksem kui 235 MPa, seega see ei ole antud konstruktsioonile ohtlik. Täpsema tulemuse saamiseks tuleb teha ka rullikule ja teljele tugevusarvutused.

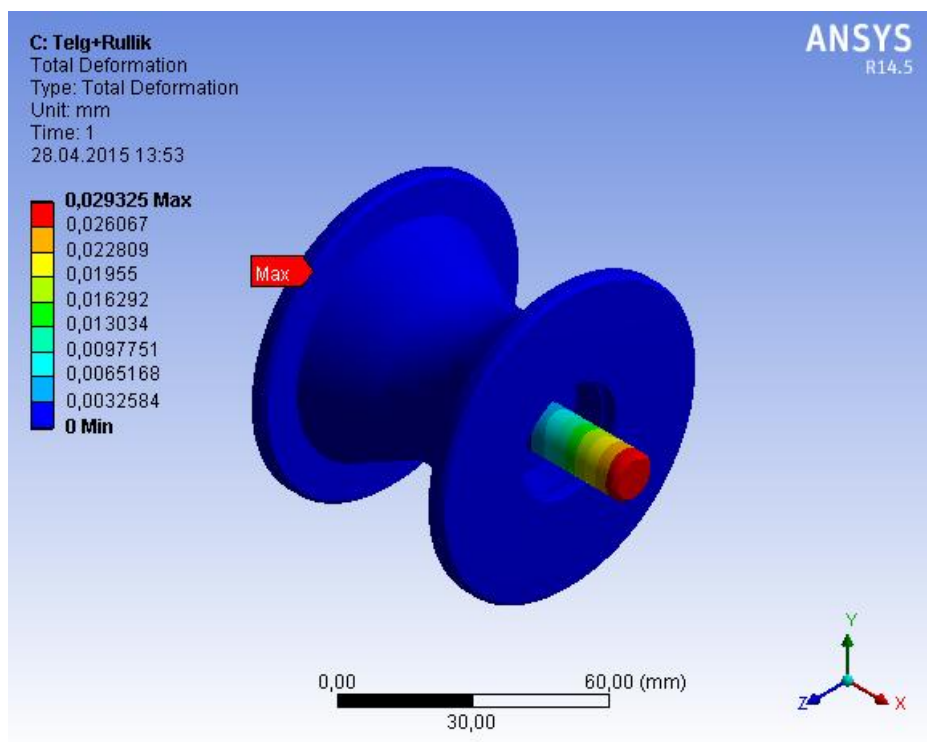
2.3.3. Rulliku ja telje tugevusarvutus

Rullik ja telg on mõlemad valmistatud terasest margitähisega S235JR. Materjali voolepiir on 235 MPa. Arvutusel on arvestatud koormuseks ühele telje toetuspinnale 650N. See sisaldab: inimese kaalu (150kg), lisavarustust(50 kg) ja raami massi (60 kg). Kokku 260kg, mis teeb ümardatult 2600 N. Kuna arvutatakse üks rullik korraga tuleb saadud jõud jagada neljaga, et teada saada, kui suur jõud mõjub ühele teljele. Tulemuseks saame 650 N. Täpsemad rajatingimused on välja toodud selet 2.28. Selet on näha, fikseeritud on rulliku pinnad, mis puutuvad kokku suurte ratastega. Koormus on pandud mõjuma telje kohtadele, millele telg toetub. Arvestatud on ka rulliku ja telje enda massi.



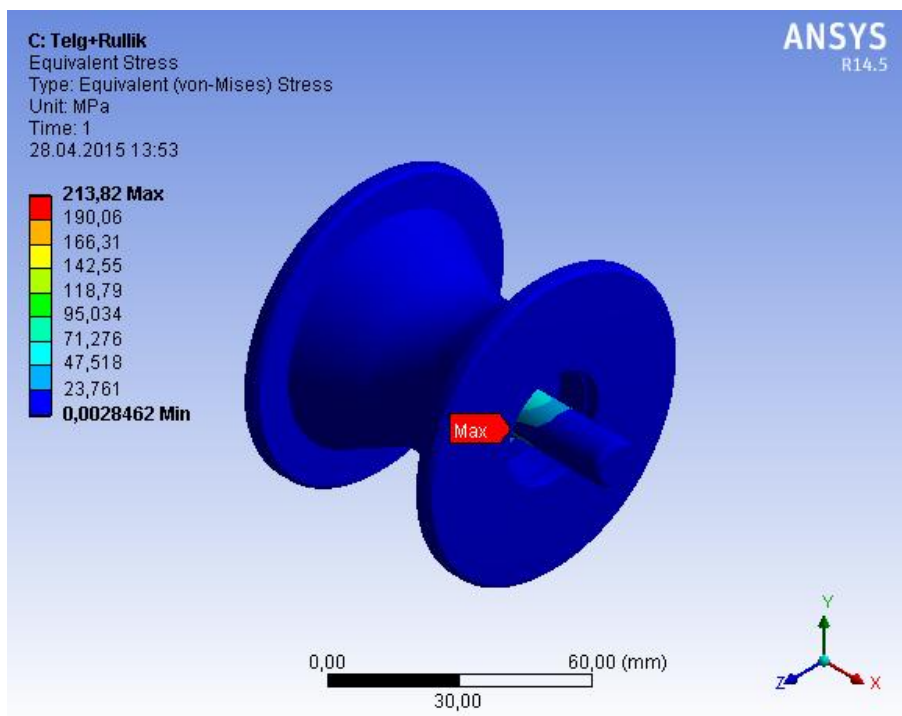
Sele 2.28. Rulliku ja telje rajatingimused

Deformatsiooni arvutuste tulemused on näha seel 2.29. Seelt on näha, et maksimaalne deformatsioon on 0,03 mm ning antud suurus ei ole mingil määral konstruktsioonile ohtlik.

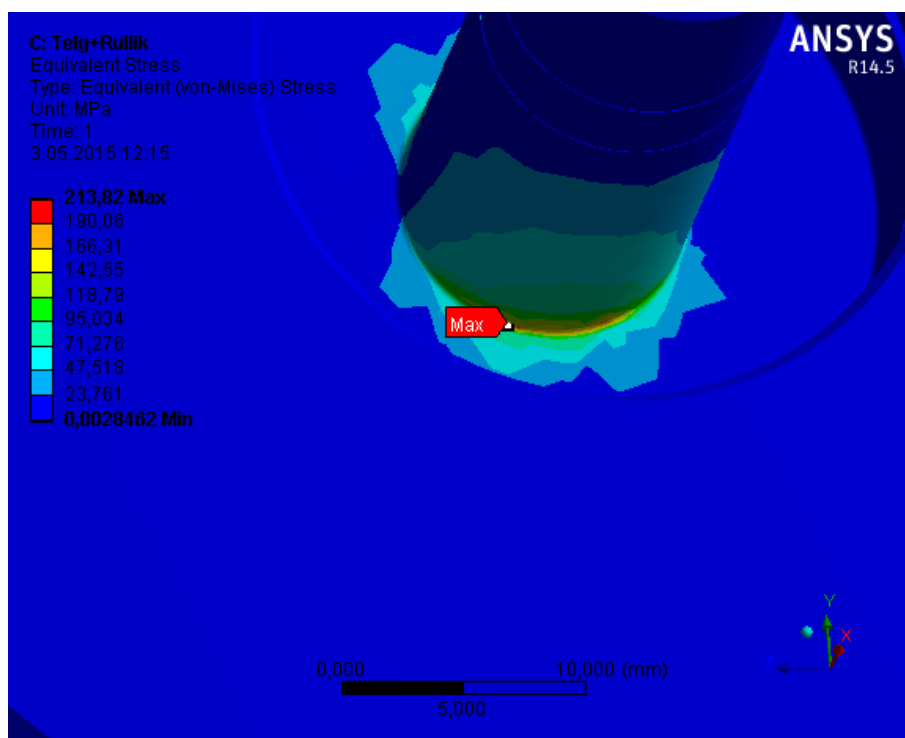


Sele 2.29. Telje maksimaalne deformatsioon

Maksimaalse pinge arvutuse tulemust on võimalik näha seel 2.30. Maksimaalseks pingeks on 214 MPa. Kuna materjali voolepiir on 235 MPa ei ole antud pinge teljele ohtlik. Pinge kontsentraatori asukoha nägemiseks on lisatud ka seel 2.31.



Sele 2.30. Telje pinge



Sele 2.31. Telje maksimaalne pinge

Järgnevalt teostatakse telje varuteguri arvutamine. Arvestades et materjaliks on S235JR tingliku voolavuspiiriga $R_{p0,2}=235\text{MPa}$, siis saab valemi 1.1 abil arvutada telje varuteguri [27].

$$S = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{max}} = \frac{235}{214} = 1,1, \quad (2.1)$$

kus S – varutegur;

$R_{p0,2}$ – voolepiir, MPa;

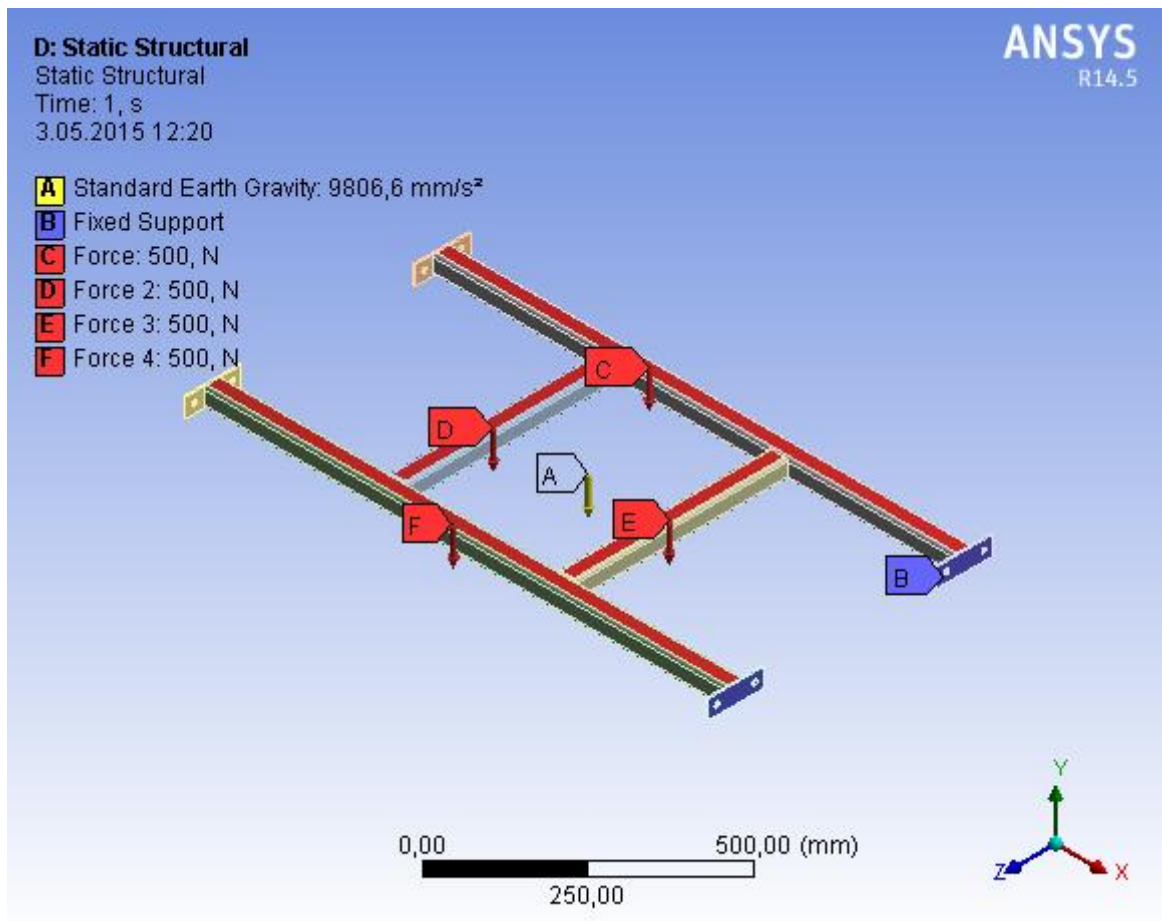
σ_{max} – suurim pinge, MPa.

Võttes arvesse, et arvutused on tehtud suurima koormusega, võib varuteguriga 1,1 rahule jääda.

2.3.4. Redelraami arvutused

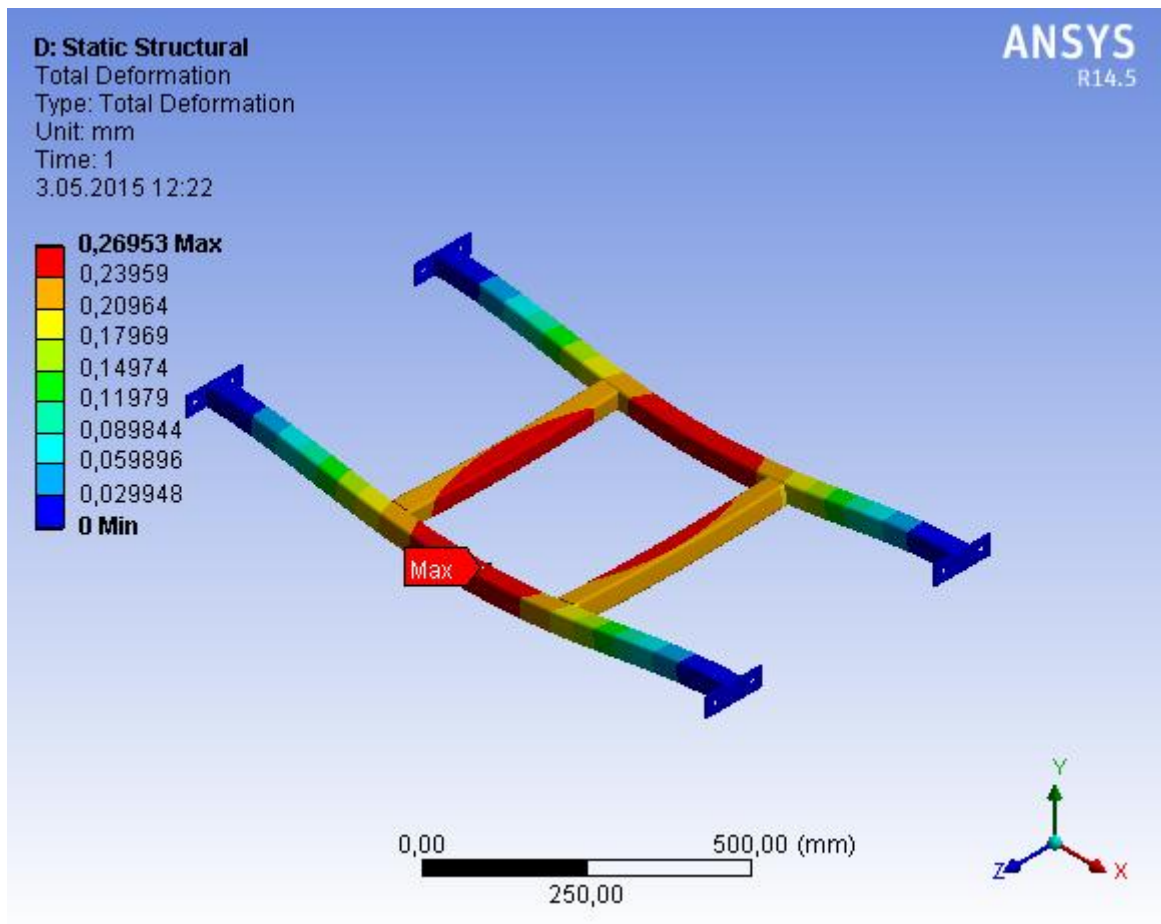
Redelraam on valmistatud terasest S235JR. Koostamiseks on kasutatud 40x40x3 ruutprofiili, kokku on kasutusel 4 lõigatud toru, mis on omavahel kokku keevitatud. Lisaks on raamile keevitatud kinnitusplaadid ja turvaistme plaadid, mis on samuti valmistatud S235JR terasest.

Raami arvutamiseks tuleb esmalt määrata rajatingimused. Rajatingimused on näidatud seel 2.32. Koormuseks on võetud 2000 N, mis on ühtlaselt jaotatud torudele. Raam on fikseeritud kinnitusplaatide abil ning arvestatud on ka raami enda massi.



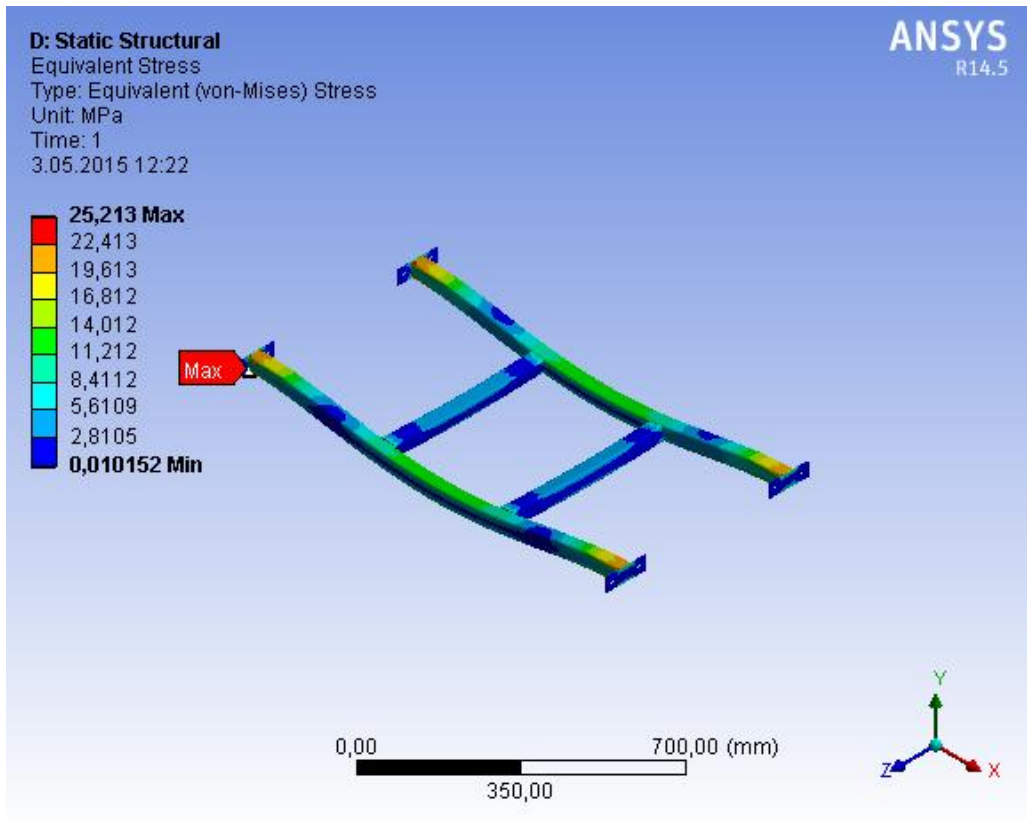
Sele 2.32. Redelraami rajatingimused

Maksimaalse deformatsiooni tulemusi on võimalik näha seel 2.33. Maksimaalseks deformatsiooniks on 0,3 mm ning langeb raami keskmisele osale (joonisel tähistatud punase värvusega).

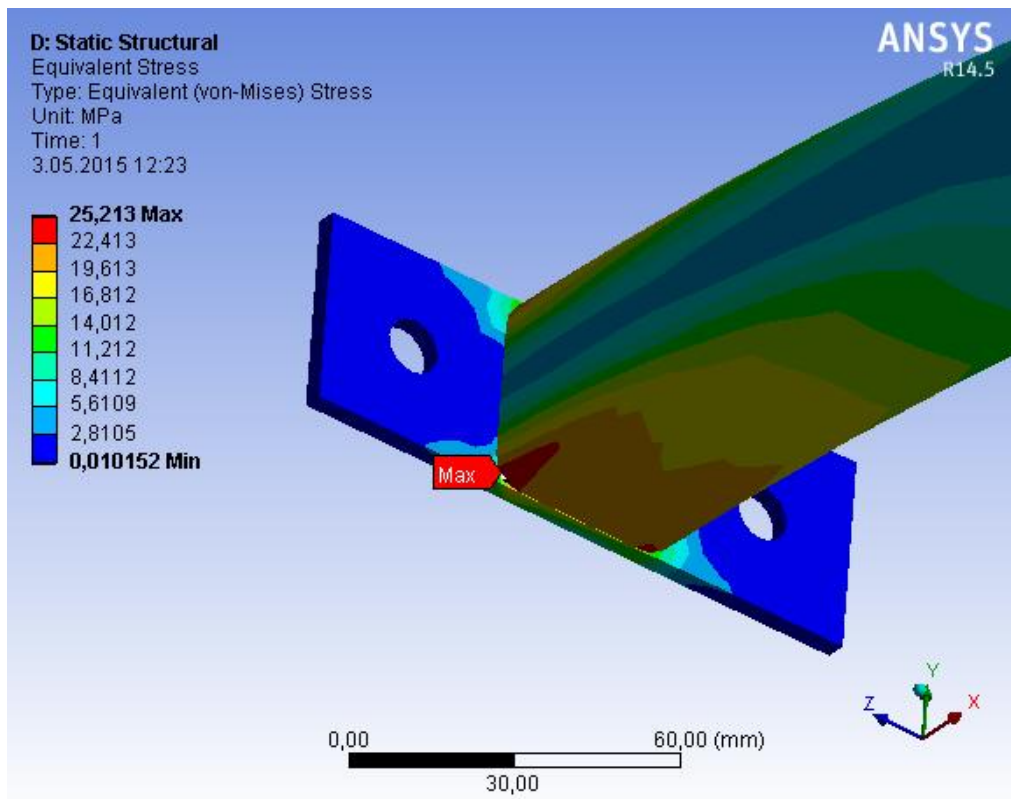


Sele 2.33. Redelraami deformatsioon

Raami maksimaalne pinge on välja toodud seel 2.34. Redelraami maksimaalseks pingeks on 25,3 MPa ning pinge kontsentraatoriks on kinnitusplaat. Pingekontsentraatori täpsemaks nägemiseks on tööle lisatud sele 2.35.



Sele 2.34. Redelraami pinge



Sele 2.35. Redelraami pingekontsentraator

Teades raami maksimaalset pinget ja materjali tingliku voolavuspiiri milleks on $R_{p0,2}=235\text{MPa}$, saab valemi 2.1 abil välja arvutada raami varuteguri.

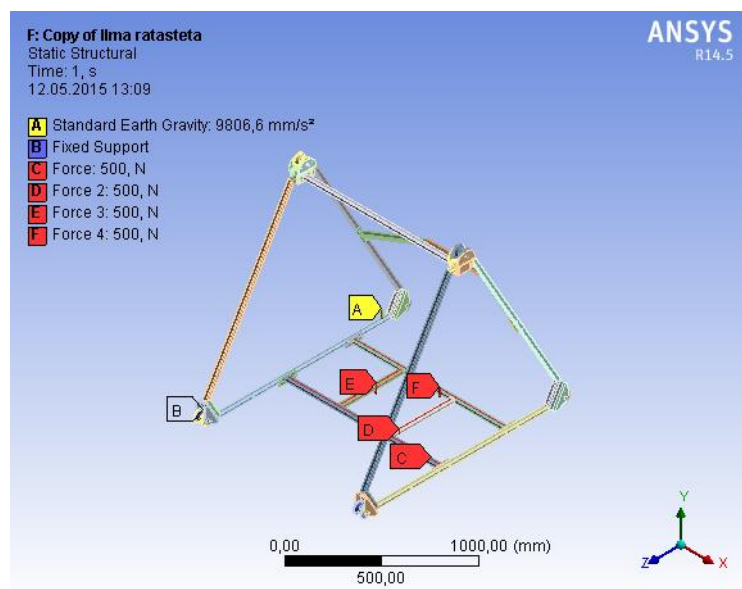
$$S = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{max}} = \frac{235}{25,3} = 9,3 \quad (2.1)$$

Varuteguri väärtuseks on 9,3, mis näitab, et antud raam on üledimensioneeritud ehk kasutada saaks ka väiksema seinapikkuse ja seinapaksusega profiili. Toruraami normaalne varutegur on 4.

2.3.5. Sisemise raami optimeerimine

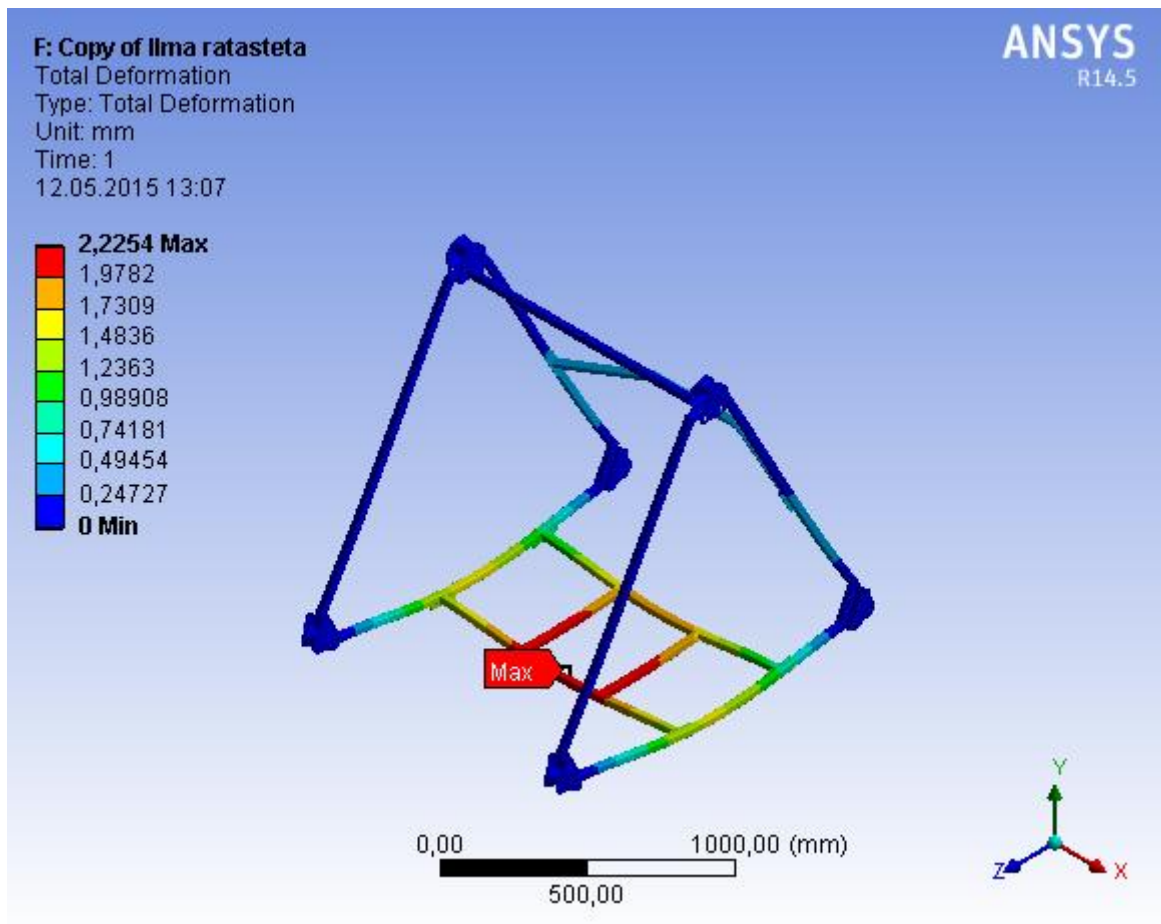
Hetkel on sisemine raam täielikult valmistatud 40x40x3 toruprofiilist (materjal S235JR) ning arvutustulemused näitavad, et antud raami varutegur on väga suur, sellest lähtuvalt tehakse arvutused toruprofiili 30x30x2,5 (materjal S235JR) kasutades. Arvutused teostatakse deformatsioonile ja pingele ning seejärel antakse hinnang, kas oleks võimalik väiksemat toruprofiili kasutada ning milline oleks varutegur ja mis peamine, kui suur oleks uut profiili kasutades kaaluvõit.

Raami muudetakse kasutades programmi Solidworks2013, seal teostatakse raamile lihtsustused ning seejärel sisestatakse raam ANSYS Workbench 14.5 keskkonda, kus teostatakse tugevusarvutused. Rajatingimused jäävad samaks, mis eelnevalt kasutatud ning neid on võimalik näha seel 2.36.



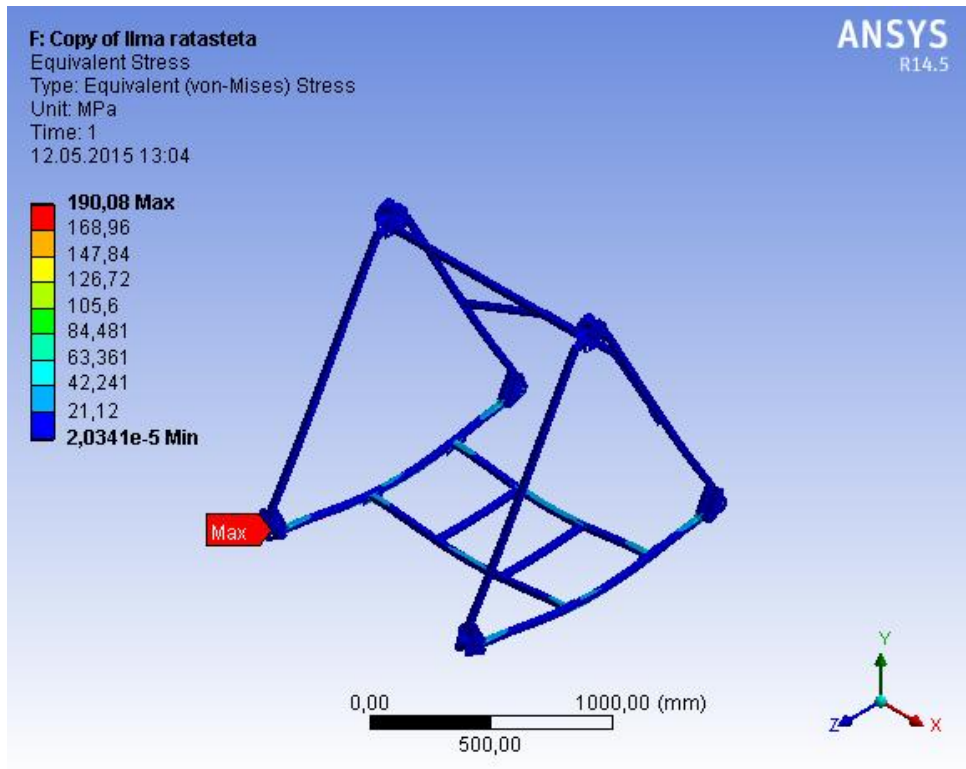
Sele 2.36. 30x30x2.6 toruprofiiliga raami rajatingimused

Antud raami suurim deformatsioon on välja toodud seel 2.37. Suurim deformatsioon on joonisel tähistatud punase värvusega ning maksimaalseks deformatsiooniks on 2,23 mm, mis on võrreldes esialgse suurima deformatsiooniga, milleks oli 1 mm, 1,23 mm suurem, kuid antud deformatsioon ei ole konstruktsioonile ohtlik.

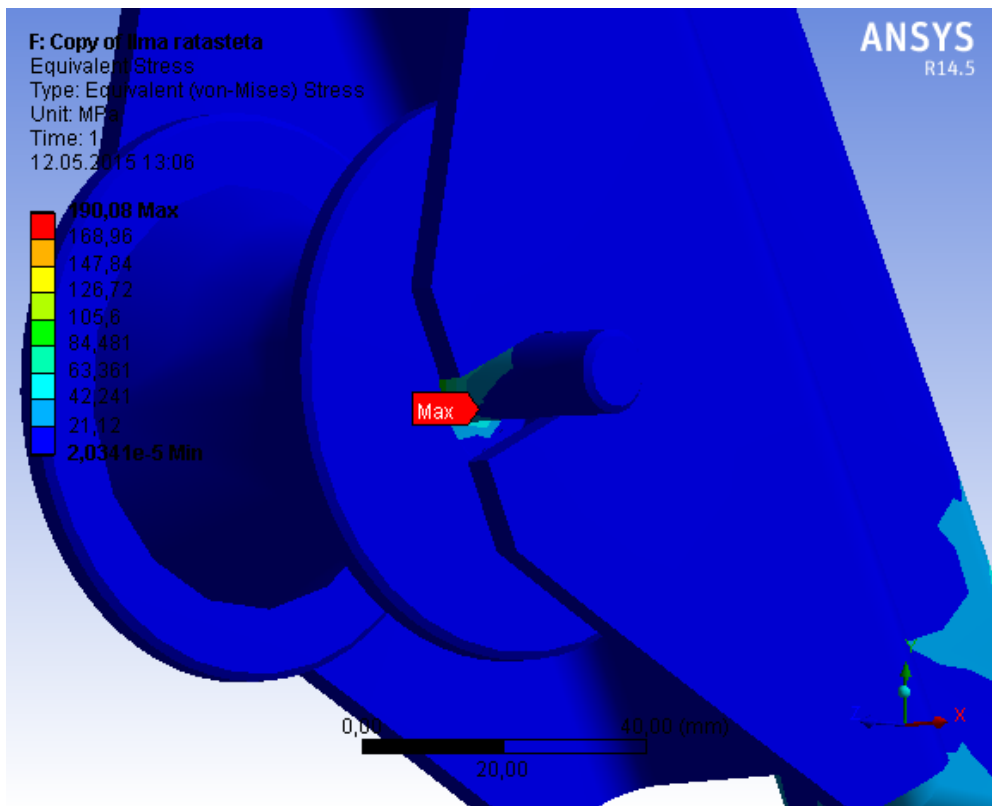


Sele 2.37. 30x30x2.6 raami deformatsioon

Optimeeritud raami pingeid on võimalik näha seel 2.38. Suurim pinge on seel tähistatud punase värvusega ning väärtuseks on 190 MPa. Pinge kontsentraatori nägemiseks on tööle lisatud sele 2.39.



Sele 2.38. 30x30x2.6 raami pinged



Sele 2.39. Pingekontsentraator

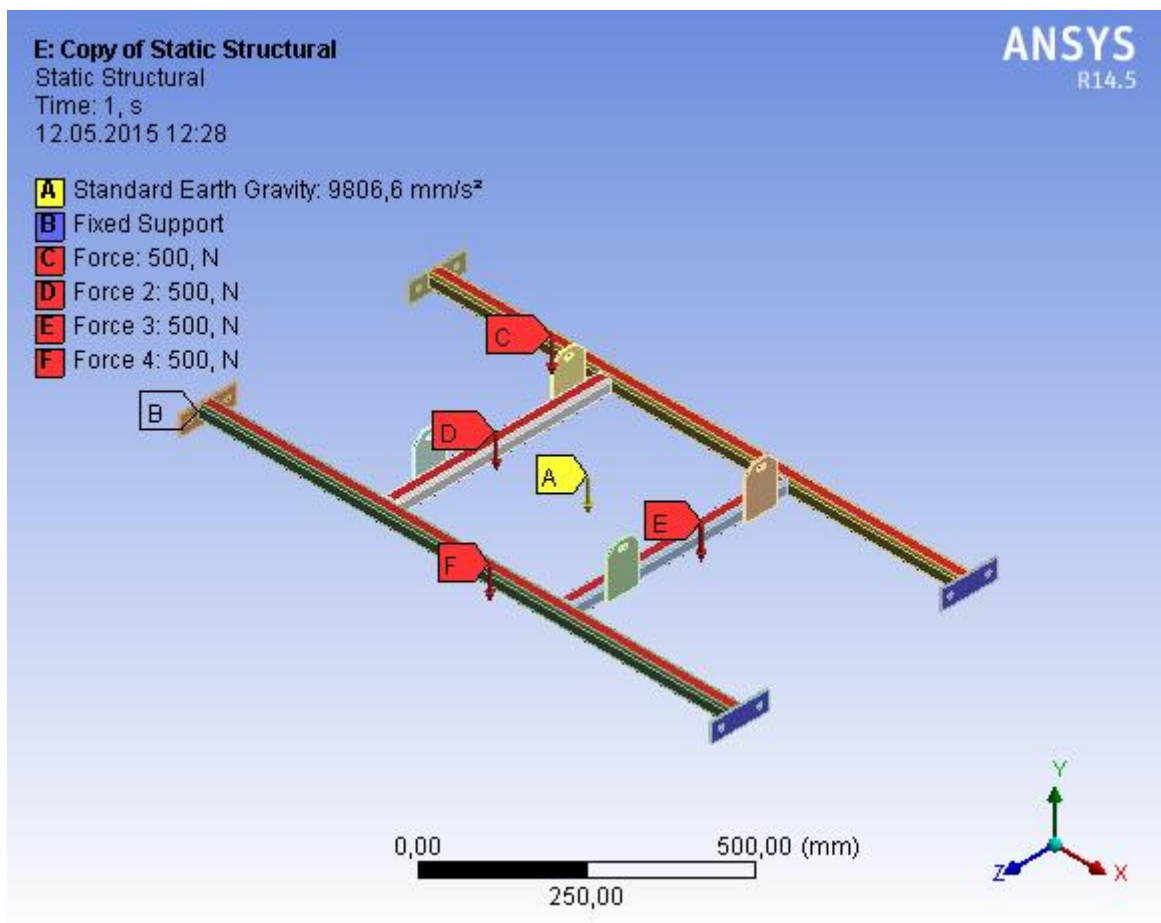
Suurim pinge langeb, nagu ka enne, rulliku teljele ning on samas suurusjärgus. Teostades varuteguri arvutus, saadakse:

$$S = \frac{235}{190} = 1,24. \quad (2.1)$$

Varutegur 1,24 on piisav ning maksimaalne deformatsioon 2,23 mm ei ole konstruktsioonile ohtlik.

2.3.6. Redelraami kontrollarvutus programmiga ANSYS

Redelraami eelnev varutegur oli 9,3. Võrdlusmomendi saamiseks teostatakse ka 30x30x2,6 profiiliga sarnane arvutus. Arvutuse rajatingimused on näidatud seel 2.40.



Sele 2.40. Redelraam 30x30x2,6 rajatingimused

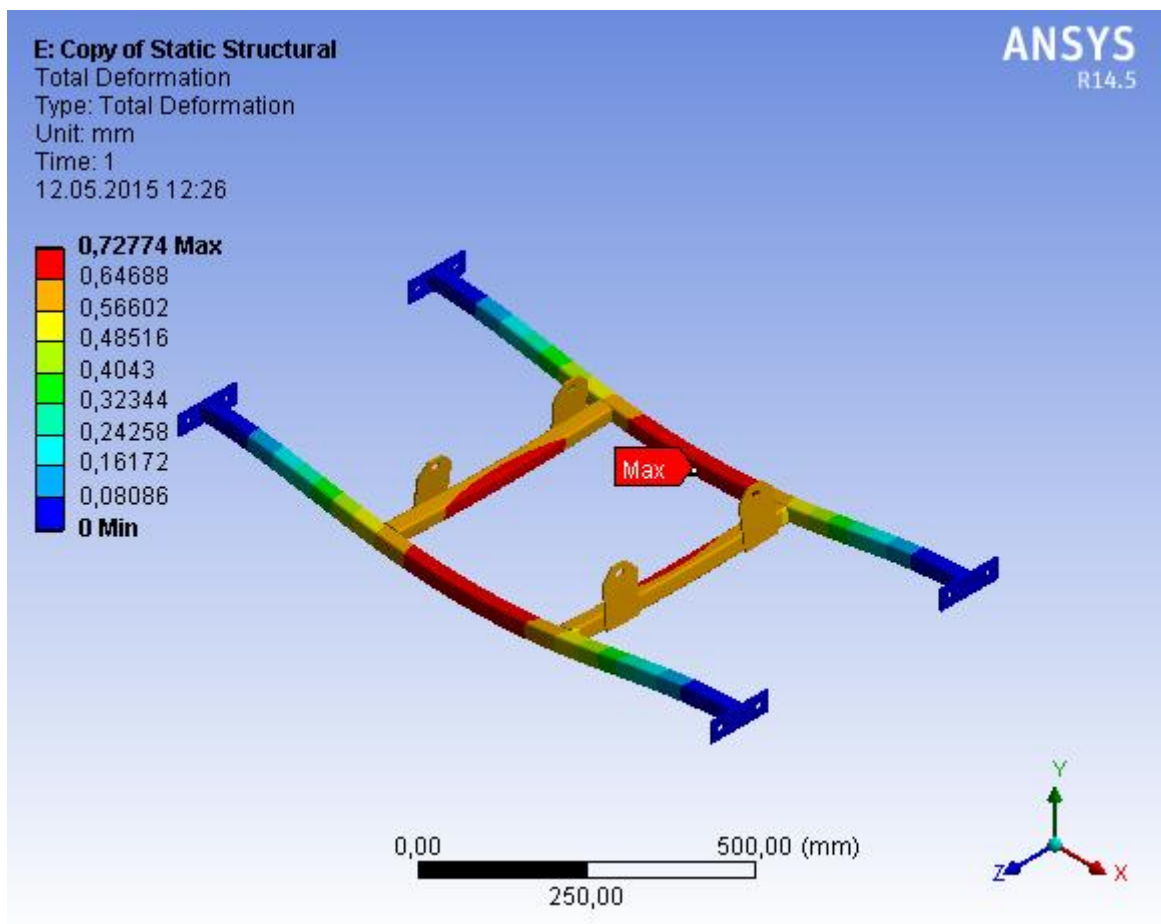
Arvutuste tulemused on näha järgnevatel seledel. Seel 2.41 on välja toodud raami deformatsioonid. Kui esialgset profiili kasutades oli maksimaalseks deformatsiooniks 0,3 mm, siis uue profiiliga on deformatsiooni maksimaalseks väärtuseks 0,73 mm. Saadud deformatsioon raamile ohtlik ei ole.

Selel 2.42 ja 2.43 on näha maksimaalsed pinged väärtused ja pingekontsentraator. Maksimaalne pinged on tähistatud punase värvusega ning maksimaalseks väärtuseks on 53,53 MPa. Eelnevalt oli maksimaalne pinged 25,5 MPa. 30x30x2,6 raami varutegurit teada saamiseks teostatakse arvutus.

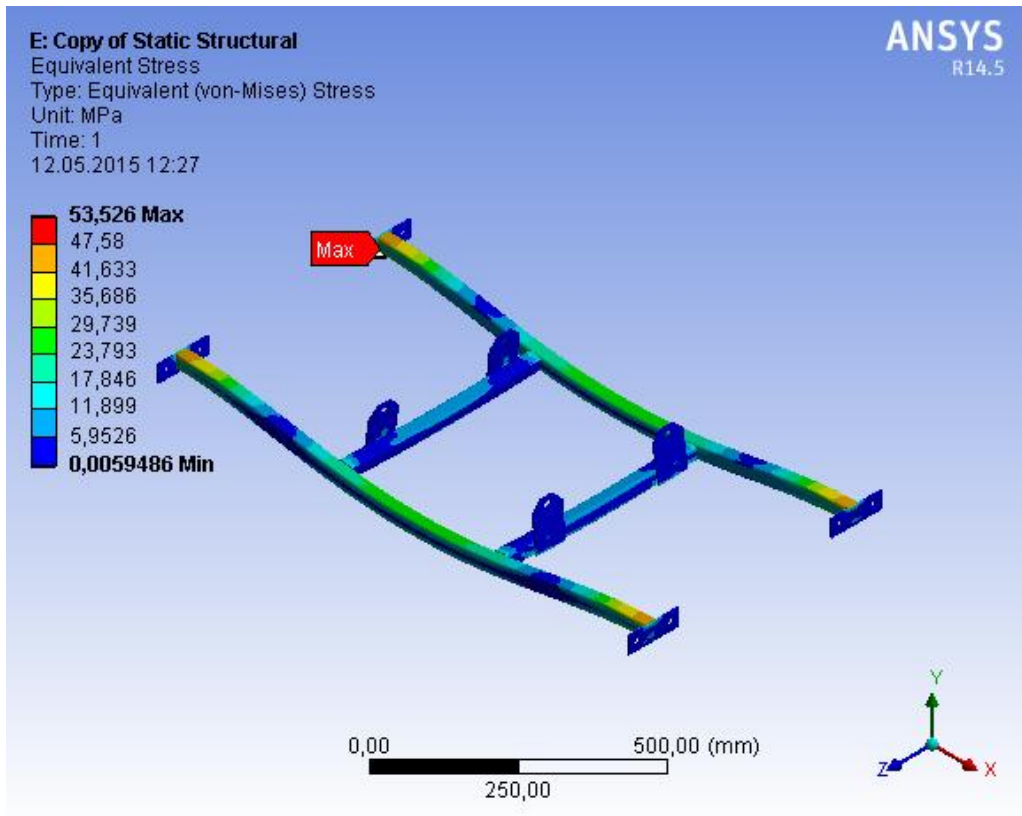
Optimeeritud redelraami varutegurit arvutus:

$$S = \frac{235}{53,53} = 4,4. \quad (2.1)$$

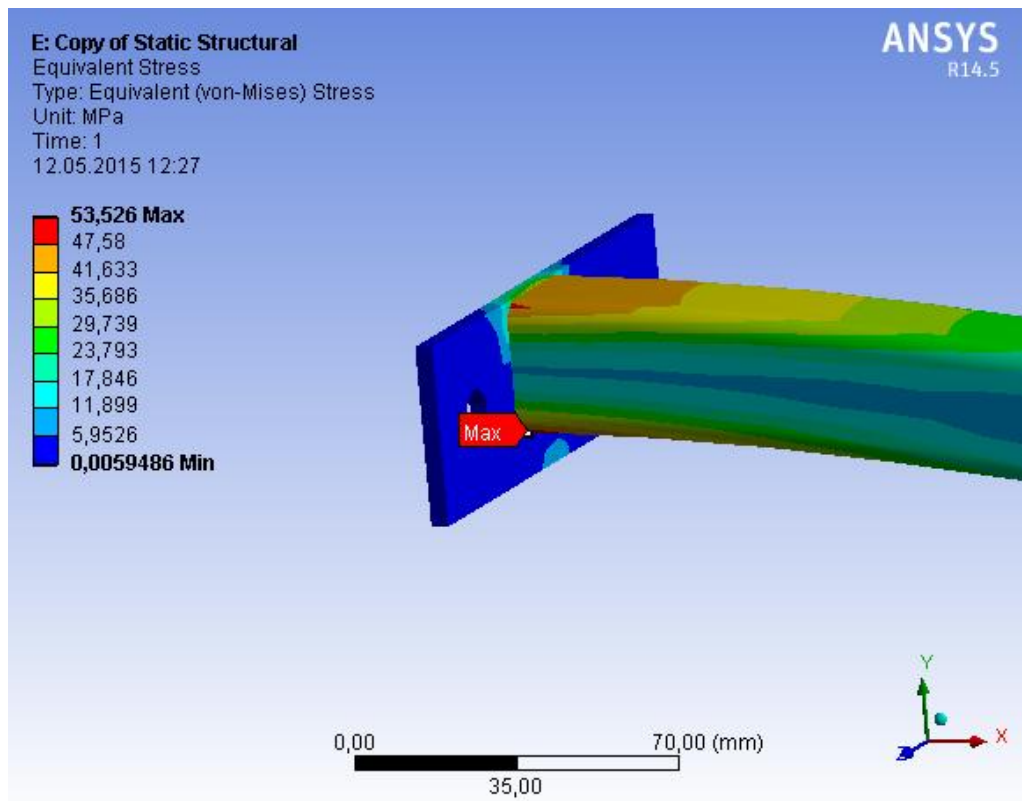
Raami varuteguriks on 4,4 mis on igati piisav konstruktsiooni varutegur.



Sele 2.41. Redelraam 30x30x2,6 deformatsioon



Sele 2.42. Redelraam 30x30x2,6 pinged



Sele 2.43. Redelraam 30x30x2,6 pingekonsentraator

2.3.7. Redelraami kontrollarvutus käsitsi

40x40x3 toruraamist redelraam on kinnitatud mõlemast otsast. Eesmärgiks on leida tala maksimaalne paindepinge ning läbipaine. Arvutusteks vajalikud redelraami parameetrid on [27]:

$$l = 1,12 \text{ m};$$

$$F = 2 \text{ kN};$$

$$I_x = 11,8 \text{ cm}^4;$$

$$W_x = 5,91 \text{ cm}^3;$$

$$E = 200 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}.$$

Esimesena leitakse talas tekkiv paindemoment [27].

$$M_b = \frac{F \cdot l_F}{8} = \frac{2000 \cdot 56}{8} = 14000 \text{ N} \cdot \text{cm}, \quad (2.2)$$

kus M_b – paindemoment, Ncm;

F – paindejõud, N;

l_F – koormuse kaugus otsast, cm.

Seejärel leitakse maksimaalne paindepinge [27].

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_x} = \frac{14000}{5,91} \approx 2370 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} = 23,7 \text{ MPa}, \quad (2.3)$$

kus σ_b – maksimaalne paindepinge, MPa;

W_x – ristlõike telgvastupanumoment, cm^3 .

Järgnevalt kontrollitakse ANSYS Workbench programmiga saadud läbipainde tegelikkust [27].

$$f = \frac{F \cdot l_F^3}{192 \cdot E \cdot I_x} = \frac{2000 \cdot 56^3}{192 \cdot 200 \cdot 10^5 \cdot 11,8} \approx 7,75 \cdot 10^{-3} \text{ cm} = 0,075 \text{ mm}, \quad (2.4)$$

kus E – elastsusmoodul, $\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$;

I_x – telginertsmoment, cm^4 .

2.3.8. Sisemise raami optimeerimise kokkuvõte

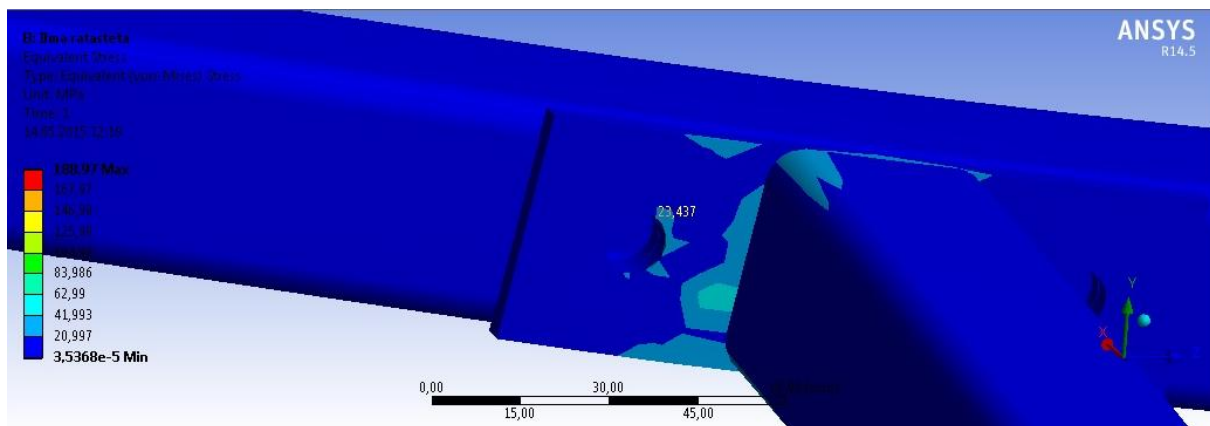
Kasutusel oleva ja optimeeritud sisemise raami paremaks võrdlemiseks on arvutuste tulemustest tehtud tabel 2.21. Tabelis ei ole kasutatud raami maksimaalseid pingeid, kuna maksimaalsed pinged langesid rulliku teljele ning teljele on teostatud eraldi arvutus. Tabelisse kantud maksimaalse pinge väärtused on tegeliku raami kõige kriitilisema koha väärtused. Tulemuste põhjal võib öelda, et antud konstruktsiooni oleks võimalik valmistada ka väiksemat toruprofiili kasutades ning sellest tulenev kaaluvõit oleks 18,3 kg.

Tabel 2.21. Raami võrdlus

Profiil	Max pinge (MPa)	Max deformatsioon (mm)	Varutegur	Mass (kg)
40x40x3	25,23	1,031	9,3	59,5
30x30x2,6	53,53	2,23	4,4	41,2

2.3.9. Poltliidete optimeerimine

Antud peatükis uuritakse raamil olevat poltliite kinnitust ja analüüsitakse, kas poltide valik oli õige ning kas oleks võimalik seda ka optimeerida. Vaatluse alla võetakse ANSYS Workbench programmiga tehtud tugevusarvutustes leitud kõige kriitilisem poltliide, mis asetseb „Wheelie“ alumise raamiosa juures [Sele 2.44].



Sele 2.44. Poltliite pinge

Poltliite juures tekib pinge ANSYS Workbench programmiga arvutades 23,437 MPa suurune. Tegemist on DIN933 M12x65 poltidega ning iga kinnituse kohta kaks DIN125 seibi ja üks DIN985 M12 mutter. Kogu raami peale kokku kasutatakse 16 poltliidet [Tabel 2.22].

Tabel 2.22. Kasutuses olevad kinnitusdetailid

Tüüp	Kogus, tk	Kaal, g/tk	Kaal kokku, g
Polt M12x65 DIN6921	16	10,65	170,4
Mutter M12 ISO10511	32	1,77	56,64
Seib M12 DIN433	52	0,4	20,8
Polt M8x16 DIN6921	8	2,2	17,6
Polt M8x60 DIN6921	2	4,34	8,68
Polt M8x20 DIN6921	4	2,45	9,8
Polt M8x100 DIN6921	2	9,1	18,2
Mutter M8 ISO10511	2	0,7	1,4
Seib M8 DIN433	8	0,2	1,6
Liblikmutter M8 DIN315	2	2,55	5,1
Kokku	192	-	310,22

Poldid on paigaldatud lõtkuta. Kuna poltliited saavad vahelduvat koormust, siis need töötavad lõikele. Sellepärast tuleb teha kontrollarvutus lõikele põikjõuga koormatud eelpingestatud keermesliidetele. Järgnevateks arvutusteks vajalik voolepiir leitakse kataloogist ning selleks on 640 MPa. [28].

Keermesliide peab olema eelpingestatud sedavõrd, et detailide vahel tekkiv hõõrdejõud tagab detailide suhtelise liikumatuse koormuse F mõjudes.

$$F_H \approx 1,2 \cdot F_1, \quad (2.5)$$

kus F_H – detailide vahel tekkiv hõõrdejõud, N;

F_1 - poltliitele mõjuv põikjõud, N.

Eelpingutusjõu ja hõõrdejõu vahelisest seosest leitakse [27]:

$$F_H = i \cdot F_{polt} \cdot f, \quad (2.6)$$

kus i - poltliidete arv;

F_{polt} - poltliitele mõjuv summaarne jõud, N;

f – hõõrdetegur.

Kuivade teraspindade korral on hõõrdetegur $f = 0,15 \dots 0,2$ [27]. Liite kinnikeeramisel poldis tekkiva väändedeformatsiooni saab arvesse võtta võrdeteguriga 1,3. Poldi arvutusliku tõmbejõu saab avaldada kujul [27]:

$$N_A = 1,3 \cdot F_{polt} = 1,3 \cdot \frac{1,2 \cdot F_1}{i \cdot f} = 1,56 \cdot \frac{F_1}{i \cdot f} = 1,56 \cdot \frac{0,5}{2 \cdot 0,15} = 2,6 \text{ kN}, \quad (2.7)$$

kus N_A – poldi arvutuslik tõmbejõud, kN.

Järgnevalt leitakse poldi tõmbepinge ohtlikus ristlõikes [27].

$$\sigma = \frac{N_A}{A_A} = \frac{4 \cdot N_A}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 2,6 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,012^2} \approx 23 \text{ MPa}, \quad (2.8)$$

kus σ – tõmbepinge ohtlikus ristlõikes, MPa;

A_A – poldi ristlõike arvutuslik pindala, m²;

d - poldi ristlõike läbimõõt, m.

Hetkel kasutuses olevate poltide lubatav tõmbepinge on:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_y}{[S]} = \frac{640}{2} = 320 \text{ MPa}, \quad (2.9)$$

kus $[\sigma]$ - poltliitele lubatav tõmbepinge, MPa;

σ_y – poldi materjali voolepiir, MPa;

$[S]$ - poldi nõutav varutegur.

Kuna $\sigma = 23 \text{ MPa} < [\sigma] = 320 \text{ MPa}$, siis on hetkel poltliite tugevus tagatud.

Optimeerimaks poltliiteid, leitakse poltide lubatud vähim läbimõõt [27].

$$d \geq \sqrt{\frac{4 \cdot N_A}{\pi \cdot [\sigma]}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,6 \cdot 10^3}{\pi \cdot 320 \cdot 10^6}} \approx 0,004 \text{ m} = 4 \text{ mm} \quad (2.10)$$

Arvutus näitab, et vähim poldi läbimõõt, mis võiks taolise materjaliga kinnituste puhul olla, on 4 mm. Kaalu vähendamise ja maksumuse optimeerimise seisukohalt võttes, võib asendada kõik M12 poldid M4 poltidega [Tabel 2.23].

Tabel 2.23. Optimeeritud kinnitusdetailid

Tüüp	Kogus, tk	Kaal, g/tk	Kaal kokku, g
Polt M4x65 DIN6921	16	2,35	37,6
Mutter M4 ISO10511	34	0,18	6,12
Seib M4 DIN433	60	0,08	4,8
Polt M4x16 DIN6921	8	0,71	5,68
Polt M4x60 DIN6921	2	2,25	4,5
Polt M4x20 DIN6921	4	0,82	3,28
Polt M4x100 DIN6921	2	5,32	10,64
Liblikmutter M4 DIN315	2	1,2	2,4
Kokku	192	-	75,02

Eelnevate arvutuste ja tabelite põhjal saab teha kokkuvõtte, palju võidetakse kinnitusdetailide vahetamisega kaalus [Tabel 2.24]. Optimeerimise käigus tuleb kaaluvõiduks umbes 235 g. Üldpildis pole kaaluvõit suur, kuid mõeldes, et tegu on vaid kinnitusdetailidega, siis protsentuaalselt läheb „Wheelie“ kaal selles osas väiksemaks 75%.

Tabel 2.24. Kinnitudetailide kokkuvõte

Kinnitusdetailid	Mass (g)
Esialgsed	310,22
Optimeeritud	75,02
Võit	235,2

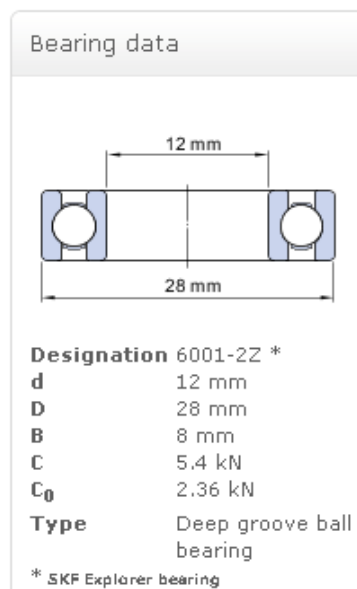
3. ARVUTUSED JA ERINEVAD LAHENDUSED

Antud peatüki esimeses osas uuritakse erinevate detailide tugevust ja eluiga „Wheelie“ konstruktsioonis. Arvutused viiakse läbi erinevates tingimustes ja vaadeldakse piirtingimustes erinevate osade käitumist. Kalkuleeritakse olemasolevate detailide võimekust ja sobivust sellele sõidukile ja vaadeldakse osade käitumist, kui rakendada neile eelnevalt optimeeritud lahendus.

Teises osas pakutakse välja „Wheelie“ konstruktsioonis kõige probleemsemaks kohaks olnud osale erinevaid lahendusi. Suurimaid puuduseid leiti suure ja vedava ratta omavahelises töös. Sellest tulenevalt proovitakse leida parim lahendus sellele sõlmele.

3.1. Laagrite arvutused

Selles alapunktis analüüsitakse „Wheelie“ rullikutes paiknevaid laagreid kasutades arvutusabi SKF kodulehel [29], sest tooted said tellitud just sellest firmast. Järgneval seel on näha rullikutes paiknevate laagrite parameetreid. Rullikuid on „Wheelie“-l kokku 6 tükki, seega laagreid läks vaja 12 tükki, sest igale rullikule läks 2 laagrit.



Sele 3.1. Kasutatud laagri parameetrid

3.1.1. Laagrite eluiga

Esimesena uuritakse laagrite eluiga, et teada saada, kui pikalt peavad antud osad vastu, kui sõidukit regulaarselt kasutada. Arvutamiseks tuli esialgu sisestada vajaminevad algväärtused, mis saadi tugevusarvutuste, sõiduki kiiruse ja töökeskkonna põhjal konstruktiivselt.

Select bearing internal radial clearance	Normal internal radial clearance
F_r Radial load	0.625 kN
F_a Axial load	0 kN
n_i Rotational speed of the inner ring	4422 r/min
Operating temperature Bearing outer ring	40 °C
η_c specification method	Cleanliness classification(recommended)
Lubricant type and cleanliness	Normal cleanliness (e.g. shielded bearing)
Grease used in the bearing	MT47
Viscosity at 40 °C	70.0 mm ² /s
Viscosity at 100 °C	7.3 mm ² /s

Sele 3.2. Laagrite eluea arvutamiseks vajalikud siseparametrid

Arvutuse tulemusena saadi, et laagrid peavad vastu 8810 tundi [Sele 3.3], mis on veidi enam kui 1 aasta. Selline tundide arv on siis, kui sõidukit kasutada pidevalt. Keskmiselt kasutavad inimesed autosid päevas 2 tundi, seega sellise arvutuse põhjal peavad „Wheelie“ laagrid vastu umbes 12 aastat.

L_{10mh} SKF rating life	8810 hour
a_{SKF} SKF life modification factor a _{SKF}	3.54
κ Viscosity ratio	5.49
P Equivalent dynamic bearing load	0.62 kN
η_c Factor for contamination level	0.33
ν₁ Required kinematic viscosity for κ=1	12.8 mm ² /s
L_{10h} Basic rating life	2490 hour
L₁₀ Capped bearing grease life	55600 hour
C/P Load ratio	8.7

Sele 3.3. Laagrite eluiga

3.1.2. Laagritele vajaminev minimaalne jõud

Laagrite töö toimimiseks on vaja neile pidevalt avaldada mingisugust jõudu. Järgnevalt arvutatakse, kui suur peab olema minamaalne jõud, mis mõjub laagritele [Sele 3.4].

Minimum load : 6001-22

Input parameters

n_i Rotational speed of the inner ring	4422 r/min
Operating temperature Bearing outer ring	40 °C
Grease used in the bearing	MT47
Viscosity at 40 °C	70.0 mm ² /s
Viscosity at 100 °C	7.3 mm ² /s

Result

F_{rm} Minimum radial load	0.05 kN
---------------------------------	---------

Sele 3.4. Laagritele vajamineva minimaalse jõu arvutus

Arvutuste tulemusena saadi, et laagrite tööks on vajalik vähemalt 0,05 kN suurune jõud. Kuna „Wheelie“ rullikutes olevatele laagritele mõjub jõud suurusega umbes 0,3 kN, siis on parameeter täidetud.

3.1.3. Laagrites tekkiv hõõrdejõud ja jõukadu

Peatükis uuritakse laagrites tekkivat hõõrdemomenti ja sellega tulenevat jõukadu. Arvutus tehakse „Wheelie“ maksimaalsel kiirusel, et saada aimu maksimaalsetest jõukadudest ja hõõrdejõududest. Järgneval seel on näha sisestatavad parameetrid ja seejärel saadud tulemused.

Frictional moment - power loss : 6001-22	
Input parameters	
μ_{EHL} Coefficient of friction under full lubricant film conditions.	0.05
F_r Radial load	0.625 kN
F_a Axial load	0 kN
n_i Rotational speed of the inner ring	4422 r/min
Operating temperature Bearing outer ring	40 °C
Grease used in the bearing	MT47
Viscosity at 40 °C	70.0 mm ² /s
Viscosity at 100 °C	7.3 mm ² /s
Result	
M_{rr} Rolling frictional moment	6.94 Nmm
M_{sl} Sliding frictional moment	3.91 Nmm
M_{seal} Frictional moment of the seals	0 Nmm
M_{drag} Frictional moment of drag losses	0 Nmm
M Total frictional moment	10.8 Nmm
N_r Power loss	5 W
ν Lubricant viscosity at operating temperature	70 mm ² /s
M_{start} Starting torque	11.7 Nmm
K_{rs} Replenishment/starvation constant	6.0E-8

Sele 3.5. Laagrites tekkiva hõõrdemomendi ja jõukadu arvutus

Nagu eelnev arvutus näitab, tekib laagrites hõõrdemoment suurusega 10,8 Nmm, millest tuleneb ka jõukadu 5 W. Kuna kalkulatsioon oli tehtud maksimaalse kiiruse korral, siis nii väike jõukadu on aksepteeritav.

3.2. Jõuajami arvutus

Mootori valikul on lähtunud järgmisena toodud arvutustest. Ettepanud kriteeriumid, mida tuli leitaval mootoril täita, olid järgmised: kiirus ja kiirendus. Kiiruseks sai määratud 10 km/h, kuna tegemist peab ikkagi olema ohutu seadmega. Lisaks oli teada järgmised andmed „Wheelie“ kohta, mis on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Algandmed

Nimi	Väärtus	Ühik	Tähis
Mass	170,00	kg	m_1
Mass, inimesega	250,00	kg	m_2
Kiirus	2,8	m/s	v
Kiirus	10	km/h	v
Kiirendus	0,60	m/s^2	a
Suurratta välisläbimõõt	1,81	m	d_1
Suurratta siseläbimõõt	1,72	m	d_2
Väikeratta välisläbimõõt	0,30	m	d_3

Tabel 3.2. Ümbermõõtude väärtused

Nimi	Väärtus	Ühik	Tähis
Suurratta välisümbermõõt	5,68	m	U_1
Suurratta siseümbermõõt	5,41	m	U_2
Väikeratta ümbermõõt	0,94	m	U_3

Tabel 3.3. Pöörete väärtused

Nimi	Väärtus	Ühik	Tähis
Suurratta pöörete arv	29	rpm	n_1
Väikeratta pöörete arv	177	rpm	n_2
Vajalik reduktori väljund pöörete arv	255	rpm	n_3

Vajaliku jõu seadme liikumiseks arvutatakse valemiga, kasutades eelnevalt saadud andmeid ning eesmärgiks pandud parameetreid. Selleks kasutame valemit [27]:

$$F=m \cdot a, \quad (3.1)$$

kus F – jõud, N;

m - konstruktsiooni mass koos inimesega, kg;

a – kiirendus, m/s^2 .

Tulemus: $F=250 \cdot 0,6=150 \text{ N}$

Järgmisena arvutatakse mootorite summaarne vajalik võimsus. Selleks kasutatakse valemit [27]:

$$P=F \cdot v, \quad (3.2)$$

kus P – võimsus, W;

v – kiirus, m/s.

Tulemus: $P=150 \cdot 2,8=420 \text{ W}$

Seega summaarseks vajalikuks võimuseks saame 420 W, mis on vajalik 10 km/h kiiruse saavutamiseks, kui oletame, et keskmine inimene kaalub 80 kg. Seda arvesse võttes, saame teada, et siin on väikene varu, kuna kasutusel on kaks 350 W-st elektrimootorit, mis teevad summaarseks koguvõimsuseks 700 W.

Eelnevalt on töö käigus välja pakutud optimeerimise tulemusena saadud ligikaudne kaaluvõit suuruses 19 kg. Sellest tulenevalt saab arvutada, millise kiirusega „Wheelie“ 700 W koguvõimsuse juures liigub. Selleks tuleb teha järgnev arvutus:

$$v = \frac{P}{F} = \frac{P}{m \cdot a} = \frac{700}{(250-19) \cdot 0,6} \approx 5 \frac{m}{s} = 18 \frac{km}{h} \quad (3.2)$$

Nagu eelnev arvutus näitab, siis optimeeritud „Wheelie“ konstruktsiooniga suudaksid samasugused mootorid viia sõidukit edasi 18 km/h suuruse kiirusega.

3.3. Suurratta erinevad lahendused

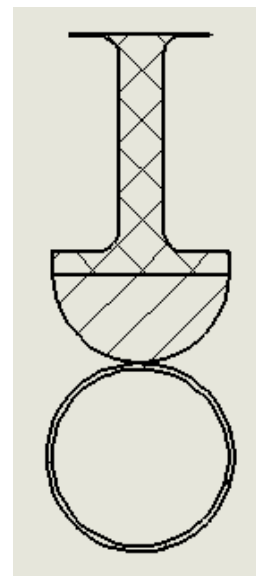
„Wheelie“ prototüübi põhiliseks probleemiks oli vedava ratta mahatulemine suurelt välimiselt rattalt. Ühelt poolt oli probleemiks vedava ratta kinnituseks kasutatav kronstein, mis ei avaldanud piisavalt survet, et sellist tõrget ei tekiks. Teiseks probleemiks oli suure välimise ratta profiil, mis soodustas väikese ratta mahalibisemist.

Selles alapunktis keskendutakse suurratta probleemi kõrvaldamisele läbi erinevate lahenduste. Suurel rattal olid veel mõned puudused, mida üritatakse samuti lahendada, näiteks halb haakumine maapinnaga, hädapiduri puudumine ja halb vedrustus.

Järgnevatel seledel on näidatud hetkel olemasolev suurratta lahendus koos vedava rattaga. Suurratas on tehtud üleni S355JR terasest, mis annab konstruktsioonile suure tugevuse, kuid sellega kaotatakse haakuvus maapinna ja ratta vahel, sest terasest ratas hakkab kergelt libisema. Seel 3.7 on näha suurratta ja vedava ratta ristlõiget, millest näeb ära põhjuse, miks toimus prototüübil tihti mahalibisemise efekt. Nimelt on mõlema ristlõige ümar ning kontaktpind kahe detaili vahel oli väga väike. Hädapidurite olemasolu sellel lahendusel puudub – see tähendab seda, et kui midagi peaks vedava rattaga juhtuma, siis pole võimalik sõidukit kinni pidurdada eraldi seisvate pidurite abil. Prototüübiga sõites sai tuntuks ka seda, et vedrustus võiks „Wheelie“-l parem olla ning seda saab veidi parandada ka juba väliste ratastega.



Sele 3.6. Olemasolev lahendus

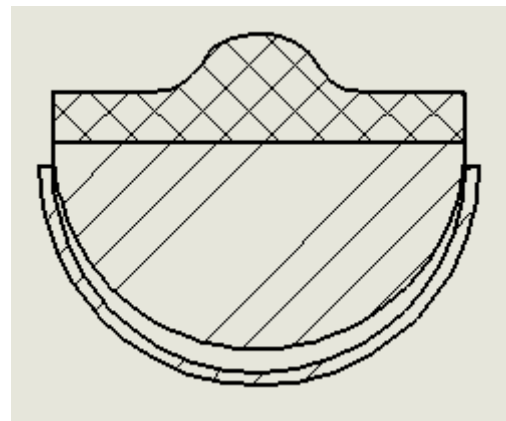


Sele 3.7. Olemasoleva lahenduse ristlõige

Eelnevate probleemide põhjal hakati mõtlema välja paremaid ideid, mis lahendaksid need vead. Esimesena võeti vaatluse alla kõige suuremaks probleemiks kujunenud mahalibisemine. Vedav ratas jäeti samaks, kuid muudeti suurratta profiili, mis teostati kui rennina, mille sees vedav ratas saaks liikuda ning mille servad hoiaksid ratast seal sees [Sele 3.8]. Võimalik on ka välimine ratas kummeerida, et tagada parem haakumine maapinnaga. Sellise lahenduse probleemiks jäaks siiski hädapidurite puudumine, kontakt maapinnaga poleks kõige parem, vedrustus ei läheks paremaks ning võib tekkida olukord, et vesi ja mustus satub renni sisse.



Sele 3.8. Lahendus nr. 1

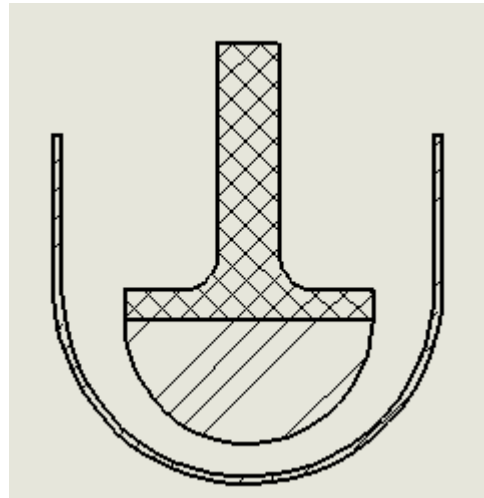


Sele 3.9. Lahendus nr. 1 ristlõige

Selliste probleemide tekkimisel üritati järgnevalt ka need likvideerida. Selle jaoks mõeldi välja hädapidurid, mis töötavad ketaspidurite toimel ning kummeeriti kogu välimine ratas ära [Sele 3.10]. Selle variandi puhul tuli renni servasid veidi pikendada, et saaks kasutada ketaspidureid [Sele 3.11]. Ka siin lahenduses jäävad probleemideks halb kontakt maapinnaga, vedrustus ning olukord, et vesi ja mustus satub renni sisse.



Sele 3.10. Lahendus nr. 2

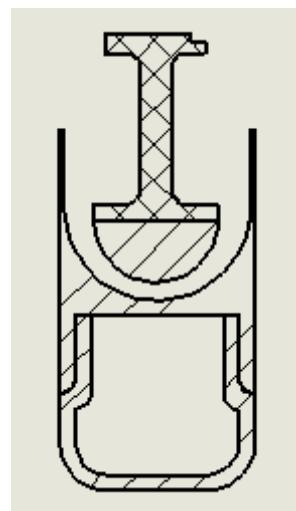


Sele 3.11. Lahendus nr. 2 ristlõige

Sellest variandist edasi minemiseks võeti vaatluse alla probleemid haakuvusega ja vedrustusega. Mõeldi tagasi kõige traditsioonilisema lahenduse – rehvi – juurde. Nii mõeldi välja järgmisel seel nähtav idee, kus on ringikujuliseks painutatud I-tala, mille ühes pesas toimub vedava ratta liikumine ja teise pesasse on paigutatud rehvi [Sele 3.12]. Nii saavutatakse hea kontakt maapinnaga ja rehvis olev õhk soodustas ka vedrustust. Kuigi kogu konstruktsioon tuuakse nii kõrgemale maapinnast, siis jääb ikkagi võimalus, et renni satuvad vesi ja mustus.



Sele 3.12. Lahendus nr. 3

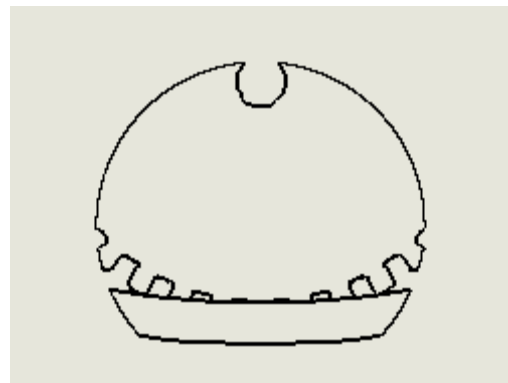


Sele 3.13. Lahendus nr. 3 ristlõige

Järgmisena mõeldi veidi teises suunas ja prooviti lahendada suure ja vedava ratta vahelist kooslust läbi hammasratta meetodi [Sele 3.14]. Nii on tulnud järgnev idee, kus pöörlemine antakse hammasrattale, mis annab omakorda momendi suurele rattale, millel on seespool hammasratta hammaste avad. Selle lahenduse puhul likvideeritakse igasugune libesemise võimalus rataste vahel. Küll aga jäävad probleemideks hädapidurid, konstruktsiooni tugevus, mustuse sattumise võimalus avadesse ja kontakt maapinnaga.



Sele 3.14. Lahendus nr. 4

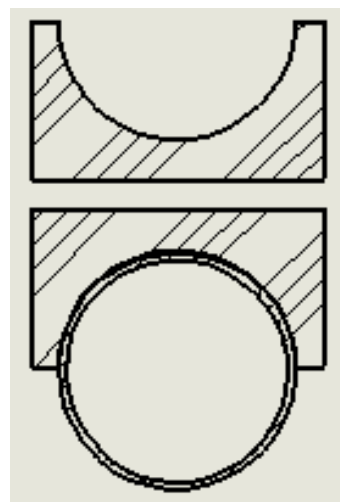


Sele 3.15. Lahendus nr. 4 külgvaade

Järgmisena on proovitud jätta välmise ratta profiil samasuguseks ning vahetatakse välja vedav ratas vedava rullikuga [Sele 3.16]. Sellega minimiseeritakse mahalibisemise võimalus ja mustuse või vee sattumine välimisse rattasse, kuid probleemideks jäävad ikka hädapidurite puudumine, kontakt maapinnaga ja vedrustus.



Sele 3.16. Lahendus nr. 5

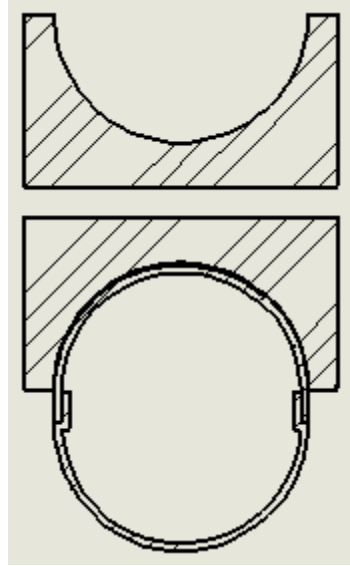


Sele 3.17. Lahendus nr. 5 ristlõige

Sellega seoses pannakse kokku kaks ideed – vedav rullik ja suurratas rehviga [Sele 3.18]. Selle lahenduse puhul jääks probleemiks ikkagi hädapidurite puudumine ja nende installeerimine taolisele konstruktsioonile on väga keeruline. Rehv aga likvideeriks probleemid haakuvusega ja vedrustusega.



Sele 3.18. Lahendus nr. 6



Sele 3.19. Lahendus nr. 6 ristlõige

Kõigist eelnevatest ideedest kõige praktilisem ja parem teostus on lahendus nr. 3. Probleemiks olev asjaolu, et vesi ja mustus võivad renni pääseda, on võimalik ära hoida teiste detailidega. Nendeks võivad olla näiteks erinevat sorti rattakatted või poritõkestid.

4. KOKKUVÕTE

Antud töös keskenduti „Wheelie“ sõiduki analüüsimisele ja edasiarendamisele tulevikuauto võtmes. Algpärase meelelahutusliku sõiduki uueks väljundiks valiti praktiline liikumisvahend tulevikus. Kogu lõputöö keerles tulevikuautonduse ümber ning kõik väljapakutud lahendused tulid selle teemaga seoses.

Edasiarendatav sõiduk on mõeldud linnapilti minevat 2020-2030 aasta vahel, seega kõik lahendused tuli valida baseerudes uuringutele, mis analüüsivad järgnevate aastate lahendusi. Tulevikuautot ei hakatud projekteerima tühjast kohast, vaid võeti lähtepunktiks tudengite poolt valmishitatud „Wheelie“, mis oma iseloomult sobis algmaterjaliks.

Esimeses osas uuriti autokasutust tänapäeval ja tulevikus, et teha kindlaks, kas auto-sarnaste sõidukite arendamisel ning täiustamisel on üldse mõtet. Analüüsides autokasutust mitmete aastate jooksul, leiti, et see on kuni tänapäevani iga aastaga jõudalt kasvanud. Sellest tulenevalt sõidavad inimesed autodega rohkem kui kunagi varem. Tulemustest selgus, et mõndades suurlinnades on autonduse piir juba kätte jõudnud, sest linnastumine on seal saanud suure hoo, kuid valdavas osas on siiski oodata autokasutuse kasvu lähiaastatel ning arvatakse, et umbes 2030. aastal toimub stabiliseerumine. Nende faktide toel saab väita, et autodel on ka tulevikus oma koht inimeste seas.

Selleks, et teada saada, milline on keskmine inimene, kellele tuleks autot projekteerida tulevikus, uuriti autode kasutajate ajalugu ning kuidas see aegade jooksul on kujunenud. Punktis selgus, et minevikus olid väga suur protsent autokasutajatest mehed ning seda just nooremas või keskeas. Mida aeg edasi läks, seda rohkem hakkasid autorooli istuma naised ning ka keskmine autojuhi vanus hakkas tõusma. Tänapäeval on meeste ja naiste osakaal peaaegu ühtlustunud, kuid on märgata, et vanemas eas ei soovi naised enam rooli istuda. Ka sissetulekute põhjal tehtud uuring näitas, et tänasel hetkel sõidavad autodega igasuguse klassi esindajad, mistõttu on autotootjatel väga suur turg.

Järgnevalt uuriti tänapäeva autoturgu ning vaadati, millised automudelid on kõige populaarsemad. Esikümnes on nii 2013. kui 2014. aastal üheksa autot, mis kuuluvad pigem väikeklassi autode hulka. Kõikidel populaarsematel autodel oli kerekujuks luukpära ehk universaal. Viimase kahe aasta uute autode tabelite vaatlus andis kindla pildi sellest, et väikeautod on väga populaarsed ning vaadates muutust, siis tõenäoliselt väikeautode müük tulevikus kasvab veelgi.

Tulevikuautode projekteerimiseks analüüsiti hetkel kõige populaarsemat autot Volkswagen Golf'i ning toodi välja põhjused, miks just see mudel on müügitabelite tipus. Leiti, et sõiduk võiks olla suhteliselt traditsioonilise välimusega, turvaline, mugav, väikeste gabariitmõtudega ja suure efektiivsusega. Sellest tulenevalt hakati otsima liikumisvahendile sobivat jõuallikat. Analüüsi tulemusena leiti, et kõige potentsiaalsemaks hetkel olemasolevaks lahenduseks on hübriid patareidega ja vesinikkütuseelementidega elektrimootoritest, sest see tagaks hea jõudluse ning energia kestvuse.

Välja toodi erinevad visioonid tulevikuautodest, et saada aimu, millise välimuse ja lahenduste poole on hetkel suund võetud. Lähemalt analüüsiti „EN-V concept“, „eRingo“, „P.U.M.A.“ ja Google'i isesõitvat ideaautot. Kui viimase puhul oli huvitav välja töötatud lahendus, kus arvutisüsteem sõidab täiesti iseseisvalt, näitasid teised tulevikusõidukid, et välimus läheb aina ümaramaks, mis on „Wheelie“ aspektist väga kohane.

Oma arvamust tulevikuautodest uuriti ka tavainimestelt läbi küsitluse. Seda levitati sotsiaalmeedia Facebook ja Twitter lehekülgedel ning kokku saadi vastanuid 155. Küsitluses osalenute vastustest pandi kokku Eesti inimese keskmine kujutus tulevikuautost, mis näeks välja järgmine. Auto liigub ratastel ning juhitakse seda nõ „käed vabad“ süsteemiga. Jõuallikaks on tulevikuatol elektrimootor ja auto gabariit võrreldes praegu olemasolevatega ei muutu. Mugavusi tuleb kindlasti autole juurde ning lisatakse veel nutikaid turvatehnoloogiaid, samal ajal täiustades ka turvarihmasid ja –patju. Manööverdavuse parandamise tagab 360 kraadise kohapealse pöörde võimalus.

Järgnevalt hakati optimeerima „Wheelie“ sõidukit nii majandusliku kui ka konstruktsiooni seisukohalt. Taoline analüüs oli vajalik, et hakata tulevikus tootma liikumisvahendit nii keskkonnasõbralikult, odavalt ja kvaliteetselt kui võimalik. Esimesena viidi läbi sisemise raami tootmise LCA analüüs, et tulemusena välja pakkuda alternatiivsed lahendused tootmises olevatele kriitilistele kohtadele.

LCA analüüsi alustati sellega, et pandi paika „Wheelie“ sisemise raami elutsükkel, kus olid protsessid maagi kaevandamisest kuni sõiduki utiliseerimiseni. Sellest kõigest tehti ka kokkuvõttev elutsükli kaart. Analüüs viidi läbi „Wheelie“ prototüübi näitel. Esimesena pandi paika uurimuses vaatluse all olevad KPI'd, mille abil saadi võrrelda erinevaid protsesse omavahel. Lähemalt vaadeldi etappe nagu projekteerimine, lintsaega lõikamine, puurimine, keevitamine, värvimine ja komplekteerimine.

Keskkonna KPI-de analüüsi tulemusena leiti kuue protsessi energiakulu, puhta vee kulu, CO₂ emissioon, SO₂ ekvivalent, ohtlikud jäätmed ja materjalikulu. Üheks suurimaks materjali raiskamise protsessiks on lintsaega lõikamine, mille käigus on materjalikuluks 14,3 kg. Keskkonda paiskab kõige rohkem CO₂ ja SO₂ gaase keevitamine. Kevitamisel kulub ka kõige rohkem puhast vett ning tekib suurim ohtlike jäätmete kogus. Keskkonda ei ohusta aga üldse komplekteerimine, sest tegevus käib inimjõul ja mehaaniliste tööriistadega.

Majanduslikkude KPI-de analüüs käsitles tööjõukulu, füüsilise ühiku omahinna lisa ja elektri maksumust. Selles valdkonnas on kõige kriitsemaks kohaks projekteerimine. Protsessile kulub ülekaalukalt kõige rohkem tööjõukulu, millega kaasneb ka füüsilise ühiku omahinna kasv. Elektrit kulub kõige rohkem keevitamisele. Kvaliteedi KPI-dest oli vaatluse all ajakulu. Projekteerimisele läheb ka selles valdkonnas rohkem, kui teistele protsessidele.

Tulemuste põhjal leiti, et eraldiseisvad protsessid võiks kokku viia ning tehti simulatsioon tootmisliindiga. Üldkokkuvõttes väheneb nii CO₂ emissioon, SO₂ ekvivalent, ohtlike jäätmete teke, füüsilise ühiku omahinna lisa ja ajakulu. Tootmisliin kaotaks näiteks tööjõukulu täiesti ära, sest kogu töö teevad masinad ja robotid. Tootmisliin tooks siiski kaasa suurema energiakulu ja sellega tulenevalt ka elektrienergia maksumuse. Ainuke KPI, mis jääks muutumatuks tootmisliini käiku toomisel, oleks materjalijääk. Simulatsiooni tulemusena võib kinnitada eelnevalt oletatud, et tootmisliini installeerimisega võidetakse nii ajas, kuludes kui ka keskkonda saastavates tegurites. Veel vaadati, kuidas mõjutaks projekteerijate arvu muutmine, kuid see ei toonud kaasa palju muutusi, kuid andis väikese võidu ajas.

Konstruksiooni analüüsi peatükis uuriti „Wheelie“ parameetreid ning tehti ettepanekuid, mida oleks võimalik parandada, et tulevikus „Wheeliet“ kergemaks, kiiremaks, äkilisemaks ja vastupidavamaks muuta. Tehtavate arvutuste põhjal oli võimalik teada saada konstruktiivselt valitud materjalide tugevusvarud, laagrite eluiga, arvutuslik kiirus ja kiirendus ning teostati erinevaid parendusettepanekuid.

Suurratta tugevusarvutuste põhjal leiti, et ratta tugevus on kindlasti ka kõige kriitlisemates olukordades tagatud, sest voolavuspiiri ei ületa maksimaalne pinge kordagi. Kõige suurem pinge tuli olukorras, kui sõidukil toimub äkkpidurdus või –kiirendus. Antud olukorras tekkis ratta toetava rulliku juurde pingesuuruses 122,67 MPa, mis on peaaegu 3 korda väiksem lubatud kasutatud materjali pingest, milleks on 355 MPa. Selliste arvutuste põhjal saab „Wheelie“ suurrattaid optimeerida kas siis maksumuse või kaalu poole pealt.

Maksumust saab viia väiksemaks, kui kasutada terast S235, millega oleks konstruktsiooni tugevus ikka garanteeritud. Kaalu optimeerimise seisukohalt võiks välimised rattad teha ka alumiiniumtorudest, mis annaksid massis suure võidu.

Sisemise raami arvutuste tulemusena leiti, et maksimaalne deformatsioon 1,031 mm langeb redelraamile ning maksimaalne pinge 189 MPa rulliku teljele, millest kumbki pole konstruktsioonile ohtlik. Suurimaste väärtuste tekkekohad võeti suurema vaatluse alla ja tehti neile iseseisvad tugevusarvutused. Rulliku maksimaalseks pingeks tuli täpsema võrgustikuga 214 MPa. Kuna materjali voolepiir on 235 MPa, ei ole antud pinge teljele ohtlik. Redelraami kontrollarvutus näitas, et raamile tekib maksimaalne pinge 25,3 MPa ja deformatsiooniks on 0,27 mm.

Kuna arvutused näitasid, et sisemine raam on üledimensioneeritud, uuritakse raami tugevust, kui see oleks tehtud 30x30x2,5 ruudukujulisest toruprofiilist (S235JR) ja niimoodi optimeerida konstruktsiooni. Tulemused näitasid, et ka selline konstruktsioon taluks ilusti seda koormust, mis raamile tekib. Suurimaks deformatsiooniks tuli 2,23 mm ning pingeks 53,53 MPa, mis mõlemad pole ohtlikud. Sellise optimeerimise tulemusena võidetakse kaalult 18,3 kg ja selline lahendus on kindlasti abiks.

Järgnevalt uuriti raamil olevat poltliite kinnitust ja analüüsiti, kas poltide valik oli õige ning kas oleks võimalik seda ka optimeerida. Vaatluse alla võeti ANSYS Workbench programmiga tehtud tugevusarvutustes leitud kõige kriitilisem poltliide, mis asetseb „Wheelie“ alumise raamiosa juures. Arvutuste tulemusena leiti, et vähim poldi läbimõõt, mis võiks taolise materjaliga kinnituste puhul olla, on 4 mm. Kaalu vähendamise ja maksumuse optimeerimise seisukohalt võttes, asendatakse kõik M12 poldid M4 poltidega, millest tuleb kaaluvõit 235 g.

„Wheelie“ rullikutes paiknevate laagrite analüüsis uuriti esimesena nende eluiga, mis näitas, et laagrid peavad vastu umbes 12 aastat, kui sõidukit kasutatakse päevas keskmiselt 2 tundi. Arvutustes leiti, et laagrid vajavad vähemalt 0,05 kN suurust jõudu, kuid kuna sõidukil on see suurus 0,3 kN, siis on see kindlasti piisav. Jõukadu rullikutes maksimaalsel kiirusel saadi 5 W.

Jõuajami arvutus näitas et 10 km/h kiiruse jaoks on vaja 420 W suurust võimsust. Selline kalkulatsioon oli tehtud optimeerimata konstruktsiooniga ning kuna valitud sai siiski elektrimootorid koguvõimsusega 700 W, siis arvutati välja potentsiaalne maksimaalne kiirus, milleks saadi 18 km/h.

Viimases punktis keskenduti suurratta probleemi kõrvaldamisele läbi erinevate lahenduste. Probleemiks oli vedava ratta mahatulemine suurelt välimiselt rattalt. Suurel rattal olid veel mõned puudused, mida üritatakse samuti lahendada, näiteks halb haakumine maapinnaga, hädapiduri puudumine ja halb vedrustus. Parimaks lahenduseks valiti ringiks painutatud I-tala, mille ühes pesas toimub vedava ratta liikumine ja teise pesasse on paigutatud rehvi. Sellega likvideeriti probleem, et vedav ratas võiks kuskile maha libiseda ning nii saavutati hea kontakt maapinnaga ja rehvis olev õhk soodustas ka vedrustust. Samuti olid sellel lahendusel olemas ketaspiduri toimetel töötavad hädapidurid.

Autori arvates saavutati antud lõputöö eesmärk, milleks oli analüüsida tulevikuautondust uurides „Wheelie“ konstruktsiooni, lahendusi ja tootmisprotsesse, sai täidetud. Lõpptulemusena jõuti töös parandatud lahenduseni ja leiti paremad tootmisviisid kogu sõidukile. Lõputöö annab põhjalikud teadmised kõigile tulevikus samale teemale keskenduvatele inimestele.

5. SUMMARY

This thesis focused on „Wheelie“ vehicle analysis and development based on future car. An original vehicle of entertainment was developed as a future practical car. The whole thesis is based on future cars and all proposed solutions are related to this topic.

The developed vehicle is designed to be available in 2020-2030, therefore all the solutions had to be chosen based on the studies that analyse solutions for the following years. The future car wasn't designed from the scratch, but the starting point was „Wheelie“, that was ideal source for this project.

In the first part, the car use today and in the future was analysed in order to determine if the cars are still used. Analysing the use of a car for several years, it was found that it has risen every year. As a result, people are driving now more than ever. The results showed that at some of the big cities, the car usage has already reached the limit because of urbanization, but majority of regions are still expected to increase their car usage in the coming years and it is believed that around the year 2030 it will stabilize. These results show that cars don't disappear from our lives.

In order to find out what kind is the average person to whom the car should be designed in the future, the history of car users was studied and how this trend has developed in time. Study showed that in the past the most of the car users were middle-aged or younger men. Today, the percentage between men and women is almost equalized. Also, the study showed that people's income isn't anymore a big factor on how much they drive cars.

Furthermore, today's car market has been studied and the most popular models were reviewed. 2013's and 2014's top ten included nine cars that are considered as the small class cars. All the cars in top ten were hatchbacks. The tables of new cars over the past two years showed that smaller cars are more popular.

To design the future car, there was analysed the most popular car at the moment – Volkswagen Golf. It was found out that the vehicle should be a fairly traditional looking, safe, convenient, low costing and high efficiency. Consequently, the motor of future car was studied.

The analysis revealed that the most promising solution is the hybrid of batteries and hydrogen fuel cells electric motors, because it would provide a good performance and energy durability.

The different visions of future cars were pointed out to show where the automotive industry is moving right now. „EN-V concept“, „eRingo“, „P.U.M.A.“ and Google’s concept cars were analysed. The similar to them all was their design that was more round as it is for „Wheelie“ also.

The questionnaire was published in Facebook and Twitter about future cars to see how people think the future car should be like. There was 155 respondents to the survey. Based on answers, the average Estonian’s future car was designed. It is moving on wheels and it is driven with „hands free“ system. The motor would be electric motor and the size of a car doesn’t change. There will be more functions and the car should be able to do 360-degree rotation.

Then the optimization of „Wheelie“ was done. It was done both in economically and structurally. Such analysis was necessary to produce this vehicle as eco-friendly, cheaply and high quality as possible. Firstly, the life cycle assessment of inner frame of „Wheelie“ was done to find better solutions to manufacture this product.

LCA was started with choosing the life cycle of inner frame that should be analysed. The analyse is based on prototype of „Wheelie“. Firstly, key performance indicators were chosen to compare different processes. The processes that were analysed were designing, cutting, drilling, welding, painting and assembly.

In the result of analyse of environmental KPI-s there was found how much these processes produce emissions and waste. One of the biggest material wasting process is cutting where is material waste 14,3 kg. Most emissions come from welding. Most clean water is consumed also in welding.

Analyse of economical KPI-s showed which process is economically most problematic. In this field, the most problematic was designing. Most of the money goes to the design team that work longest. The biggest electricity consumption is in welding. The time spent on one process is the biggest for designing.

Based on the results, it was found that separate processes could be brought together and therefore the simulation was made as there would be production line. As a result there would be decrease in CO2 emissions, SO2 equivalent, hazardous waste, the physical unit additional cost and time. The cost of labour unit would be zero as the machines do all the work.

The production line would, however, lead to higher energy consumption and therefore also to higher cost of electricity. The only KPI, which remains unchanged, would be the material waste. Simulation results confirm the previously hypothesized that the production line installation would reduce time and cost and also be more eco-friendly. Another simulation was made to see how KPI-s change if the number of designers was altered, but there was only a small victory in the time spent for designing.

In the chapter of analyse of construction of „Wheelie“ the parameters of vehicle were studied and the proposals were made to improve future car. Based on the calculations, it was possible to get the strength of materials, the life of bearings, the speed and acceleration of vehicle.

In strength calculations of bigger outer wheel it was found that the strength of wheel is assured as the maximum stress didn't exceed the yield strength of material. The maximum stress came when analysing the wheel when the vehicle brakes or accelerates – 122,67 MPa. This is almost 3 times smaller than yield strength of material that is 355 MPa. Therefore it is possible to optimize outer wheels. When it is wanted to make it cheaper, then material S235 would be best fit, but when there is objective to reduce weight, the aluminium should be considered.

The calculation results of inner frame showed that maximum deformation is 1,031 mm and maximum stress is 189 MPa. The maximum stress came to roller axis and therefore the roller was analysed separately. As mesh was changed, the results came back more precise and showed that maximum stress is 214 MPa that is still lower than yield strength.

As the calculations showed that inner frame is over dimensioned, the calculations are made when there is used 30x30x2,5 square tubular profile (S235JR). The results showed that even this construction can cope with this kind of load. The biggest deformation will be 2,23 mm and stress 53,53 MPa. When using this kind of profile, the win in weight would be 18,3 kg.

Furthermore, the screw bolt joint was studied and then analysed if the choice of bolts were right. The joint that was studied is located on the lower frame of „Wheelie“. It was shown in the ANSYS Workbench as the most critical joint.

The results showed that bolts are again over dimensioned and the bolts with diameter of 4 mm would fit also. All the bolts are therefore replaced with M4 bolts which results with win in weight of 235 g.

The analysis of bearings in rollers of „Wheelie“ included firstly their life time that showed that bearings last as long as 12 years if the vehicle is used 2 hours in day. The minimum load to bearings should be 0,05 kN and it is done as the force to bearings of „Wheelie“ is about 0,3 kN. Power loss in bearings in maximum speed is 5 W.

The calculations of motor showed that 420 W is needed to move vehicle with speed 10 km/h. As the construction was optimized and there was selected electric motors with combined power of 700 W, the potential maximum speed was calculated and the result was 18 km/h.

The final section focused on the problem with bigger outer wheel. The problem was that little wheel came off of the outer wheel. The bigger wheel had additionally some problems that had to be resolved. These problems were bad grip with ground, bad suspension and it didn't have emergency brakes. The best solution was wheel that was made of I-beam where in one side the little wheel would give momentum and on the other side would be tyre. There are also emergency brakes that function as disc brakes.

In the author's opinion, the objective of the thesis, that was to analyse future car based on construction, solutions and manufacturing of „Wheelie“, was achieved. The thesis resulted with many better solutions for construction and there was recommended some improvements in manufacturing also. The thesis gives a lot of knowledge to all who are going to make their studies in the same field.

6. KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Phil Goodwin *Peak Travel, Peak Car and the Future of Mobility: Evidence, Unresolved Issues, Policy Implications, and a Research Agenda* Inglismaa, oktoober 2012.
- [2] Andreas Schafer, David G. Victor *Transportation Research Part A: The future mobility of the world population USA*, detsember 1998.
- [3] Car Sales Statistics, “2013 (Full Year) Europe: Best-Selling Car Manufacturers, Brands and Models” 2014. [WWW] <http://www.best-selling-cars.com/europe/2013-full-year-europe-best-selling-car-manufacturers-brands/>. (25.03.2015).
- [4] Car Sales Statistics, “2014 (Full Year) Europe: Best-Selling Car Models” 2015. [WWW] <http://www.best-selling-cars.com/europe/2014-full-year-europe-best-selling-car-models/>. (25.03.2015).
- [5] Volkswagen Eesti esinduse koduleht: Golf [WWW]. <http://www.volkswagen.ee/et/models/Golf/highlights.html>. (26.03.2015).
- [6] Volkswagen Eesti esinduse koduleht: Golfi infoleht [WWW]. http://www.volkswagen.ee/content/medialib/vwd4/ee/pdf/golf-pdf/_jcr_content/renditions/rendition.file/ma_vw_golf7_pricelist_a4_ee.pdf. (26.03.2015).
- [7] Keskkonnaministeerium, “Kasvuhooneefekt ja kasvuhoonegaasid - mis need on?” [WWW] <http://www.envir.ee/et/kasvuhooneefekt-ja-kasvuhoonegaasid-mis-need>. (26.03.2015).
- [8] Maailmakool, “Linnastumine” [WWW] <http://www.maailemakool.ee/oppematerjalid/linnastumine/>. (26.03.2015).
- [9] Cezary Szczepaniak *Passenger Cars in the 21st Century. Some Engineering Design Problems* Archiwum Motoryzacji, 3/2010.
- [10] ELMO, “Elektriautost üldiselt” [WWW] <http://elmo.ee/elektriauto/>. (27.03.2015).
- [11] RoheAuto, “Elektriautod” [WWW] <http://www.roheauto.ee/elektriautod.html>. (27.03.2015).
- [12] G.J.Offer, D.Howey, M.Contestabile, R.Clauge, N.P.Brandon *Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system* august 2009.
- [13] Gizmag, “GM's EN-V concept looks to future of urban mobility” [WWW] <http://www.roheauto.ee/elektriautod.html>. (03.04.2015).

- [14] Future technology, “Concept car eRingo” [WWW] <http://itechfuture.com/concept-car-eringo/>. (03.04.2015).
- [15] Segway Advanced Development, “Project P.U.M.A.” [WWW] <http://www.segway.com/puma/>. (03.04.2015).
- [16] Wikipedia, “Google driverless car” [WWW] http://en.wikipedia.org/wiki/Google_driverless_car. (03.04.2015).
- [17] LCA Analysis “Indisputable Key Project”, Stockholm, Sweden, 2009/04/30.
- [18] JFE 21st Century Foundation, “Manufacturing Process for Iron and Steel.” [WWW] http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2a_1_img.html. (06.04.2015).
- [19] Ruukki teraste laoprogramm [WWW] <http://www.ruukki.ee/~media/Estonia/Files/Steel-products/Ruukki-terastoodete-laoprogramm.ashx>. (06.04.2015).
- [20] Ruukki lehtterased [WWW] <http://www.ruukki.ee/Teras/Kuumvaltsitud-terased/Konstruksiooniterased/Laser-Plus-konstruksiooniterased>. (06.04.2015).
- [21] Ruukki ruudukujulised terastorud [WWW] <http://www.ruukki.ee/Teras/Terastorud/Ruudukujulised-terastorud/Ruudukujulised-S355J2H-ja-muud-10219>. (06.04.2015).
- [22] Ruukki lehtmatelli tootmise andmeleht [WWW] <http://www.ruukki.com/~media/Files/Working-towards-sustainability/Environmental-product-declarations/Ruukki-Cold-rolled-steel-sheets-and-coils.pdf>. (06.04.2015).
- [23] Ruukki torude tootmise andmelehet [WWW] <http://www.ruukki.com/~media/Files/Working-towards-sustainability/Environmental-product-declarations/Ruukki-Tubular-products-steel-sections-and-piles-environmental-declaration.pdf>. (06.04.2015).
- [24] Bomar kodulehekülj [WWW] <http://www.bomar.cz/>. (06.04.2015).
- [25] K-Rauta, “Aerosoolvärv Color must läikiv 400ml” [WWW] <https://www.k-rauta.ee/ehituspood/aerosoolv%C3%A4rv-color-must-l%C3%A4ikiv-400ml>. (06.04.2015).
- [26] Ruukki ümartorud [WWW] <http://www.ruukki.ee/Teras/Metallitooted/Terastorud/Umarad-terastorud/> (15.04.2015).
- [27] P. Kulu, Mehaanikainseneri käsiraamat, 2 trükk. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2013.
- [28] HBM Trading LLC DIN 931/933 polt. [WWW] http://www.hbm.ae/catalog_DIN_931_933.pdf (17.04.2015).
- [29] SKF Bearing Calculator [WWW] <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/> (18.04.2015).

7. LISAD

7.1. Küsimustik

Tulevikuauto

Hea küsitluse täitja! Pea meeles, et tegemist on tulevikuautoga (umbes 50 aasta pärast) ning ei ole võimalik pakuda "other" lahtrisse. Samuti pane tähele, et mõndadel küsimustel on võimalik valida mitu vastusevarianti. Küsitlus on anonüümne.

* Required

1. **Sinu sugu ***

Mark only one oval.

- Naine
 Mees

2. **Sinu vanus ***

.....

3. **Millist autot omad hetkel? ***

Mark only one oval.

- Ei oma autot
 Other:

4. **Kuidas liigub tulevikuauto Sinu kujutluses? ***

Mark only one oval.

- Ratastel
 Lendab
 Rööbastel
 Other:

5. **Millega juhitakse tulevikuautot? ***

Mark only one oval.

- Rool
 Juhtkang
 "Käed vaba" süsteem ehk auto sõidab ise
 Pult
 Other:

6. Milline jõuallikas on Sinu arust autodel tulevikus? *

Mark only one oval.

- Sisepõlemismootor
- Elektrimootor
- Vesinikmootor
- Pneumaatiline mootor
- Hüdrauliline mootor
- Other:

7. Kui suur on Sinu kujutluses tulevikuauto? *

Mark only one oval.

- Suuremad kui hetkel olemasolevad
- Umbes sama suur kui hetkel tavalised olemasolevad autod
- Umbes sama suur kui Smart
- Nii suur, et 1-2 inimest mahuks sisse
- Other:

8. Võrreldes hetkel olemasolevatega, mis juhtub autos olevate mugavustega? *

Mark only one oval.

- Mugavusi tuleb juurde (suureneb kaal)
- Kaotatakse mugavusi (vähendatakse kaalu)
- Other:

9. Kuidas arvad, et on tagatud tulevikus autode turvalisus? *

Võimalik valida mitu vastusevarianti

Check all that apply.

- Tugevad turvapuurid
- Nutikad turvatehnoloogiad (nagu nt kokkupõrkedetektor)
- Revolutsioon turvarihmades ja -patjades
- Kiiruste vähendamine
- Other:

10. Kuidas on tulevikuautodel lahendatud parkimise keerulisus/ manööverdavus? *

Võimalik valida mitu vastusevarianti

Check all that apply.

- Autod on palju väiksemad kui praegused
- Autot saab kohapeal 360 kraadi keerata
- Kokkupandavad
- Nii kerged, et on lihtsasti inimjõul tõstetavad
- Other:

7.2. Joonis 1. „Wheelie“

7.3. Joonis 2. Kolmnurkraam

7.4. Joonis 3. Alusraam

7.5. Joonis 4. Suur ja vedav ratas

7.6. Joonis 5. Rullik+laagrid+telg

7.7. Joonis 6. Telg

7.8. Joonis 7. Optimeeritud „Wheelie“

7.9. Joonis 8. Optimeeritud kolmnurkraam

7.10. Joonis 9. Optimeeritud alusraam

7.11. Joonis 10. Suur ja vedav ratas – lahendused nr. 1 ja 2

7.12. Joonis 11. Suur ja vedav ratas – lahendused nr. 3 ja 4

7.13. Joonis 12. Suur ja vedav ratas – lahendused nr. 5 ja 6