



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

**MEHITAMATA PAGASIVEOKI KONTSEPTSIOONI
ANALÜÜS TALLINNA LENNUJAAMA NÄITEL**

**CONCEPT ANALYSIS OF AUTONOMOUS BAGGAGE DOLLY
ON THE EXAMPLE OF TALLINN AIRPORT**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane:	Merili Kallaste
Üliõpilaskood:	192287EALM
Juhendaja:	Hans Rämmal, PhD

Tallinn, 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 2021

Autor: Merili Kallaste

/allkirjastatud digitaalselt/

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 2021

Juhendaja: Hans Rämmal

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

“.....” 2021

Kaitsmiskomisjoni esimees Jelizaveta Janno

/allkirjastatud digitaalselt/

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Merili Kallaste

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Mehitamata pagasiveoki kontseptsiooni analüüs Tallinna Lennujaama näitel,

mille juhendaja on Hans Rämmal,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

26.05.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud älikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaks määratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Merili Kallaste, 192287EALM
Õppekava, peeriala: EALM02/18 - Logistika
Juhendaja(d): Dotsent, Hans Rämmal, PhD, +37256465738

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Mehitamata pagasiveoki kontseptsiooni analüüs Tallinna Lennujaama näitel
(inglise keeles) Concept analysis of autonomous baggage dolly on the example of Tallinn Airport

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Autonoomse veoki kontseptsiooni loomine ja peamiste komponentide valimine.
2. Sõiduki komponentide paigutus ja dünaamika analüüs ohutuse seisukohalt.
3. Hinnata projekti tasuvust.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teemakohase kirjandusega tutvumine ja teooria kirjutamine	01.03.2021
2.	Põhiosa kirjutamine: kontseptsioonianalüüs	20.04.2021
3.	Taotlus eelkaitsmiseks	10.05.2021
4.	Sissejuhatuse ja kokkuvõtte kirjapanemine	20.05.2021
5.	Diplomitöö vormistamine ja esitamine	26.05.2021

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "26" mai 2021.a

Üliõpilane: Merili Kallaste /allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Hans Rämmal /allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: Jelizaveta Janno /allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
SISSEJUHATUS.....	9
1 TAUST JA PROBLEEMI PÜSTITUS	11
1.1 Alternatiivsõidukid.....	13
1.1.1 Aurrigo ja British Airways' autonoomne veok	13
1.1.2 Vanderlande' autonoomne veok FLEET	14
1.1.3 SATS autonoomne konteiner treiler robot.....	15
1.1.4 STILL R07-25 veok	17
1.2 Lähteülesanne	18
1.2.1 Algolukorra analüüs	19
1.2.2 AS-IS protsess	23
2 SÕIDUKI KOMPONENTIDE VALIK.....	26
2.1 Mootor	27
2.2 Aku	29
2.2.1 DC/DC konverter	29
2.2.2 Pardalaadija	30
2.3 Jõuülekanne	32
2.4 Rehvid	33
2.5 Valgustusseadmed.....	34
2.6 Vedrustus.....	34
2.7 Raam.....	36
2.8 Sõiduki komponentide paigutus.....	39
3 SÕIDUKI DÜNAAMIKA ANALÜÜS OHUTUSE SEISUKOHALT.....	43
3.1 Überpaiskumine.....	43
3.1.1 Sõidukile kurvis mõjuvad jõud	44
3.1.2 Sõiduki überpaiskumine	45
3.2 Libisemine.....	50
3.3 Hinnang sõiduki dünaamikale	52
4 TASUVUSANALÜÜS	53
KOKKUVÕTE	59
SUMMARY.....	61
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	63
LISAD	69
Lisa 1 STILL R07-25 tehnilised andmed	70

Lisa 2 Lendude teenindamisprotsessi ajakulu	71
L2.1 Väljuvate lendude pagasi laadimiseks kulunud aeg	71
L2.2 Saabuvate lendude pagasi ooteaeg.....	72
Lisa 3 STILL R07-25 mõõtmed	74
L3.1 STILL R07-25 mõõtmed külgvaates	74
L3.2 STILL R07-25 mõõtmed pealtvaates	75
Lisa 4 SAE automatiseerituse tabel	76
Lisa 5 Laadijatüübid.....	78

Lühendite ja tähiste loetelu

α	rullumisnurk, °
a_y	külgkiirendus, m/s^2
AC	vahelduvvool (<i>alternating current</i>)
AS-IS	termin protsessi hetkeseisundi tähistamiseks
β	teepinna kaldenurk, °
BLK	lahtine (<i>Bulk</i>)
c	valguskiirus
C_o	alginvesteering
C_n	sissetulevate rahavoogude summa n. aastal
cd	valgustugevuse tähis
CF_n	sissetulev rahavoog n. aastal
CG	raskuskese (<i>center of gravity</i>)
CFRP	süsinikkiuga tugevdatud polümeer (<i>Carbon fiber reinforced polymer</i>)
CHAdEMO	alalisvoolu laadimise standard elektrisõidukitele
d	rööbe, m
DC	alalisvool (<i>direct current</i>)
DIN	Saksa Standardiinstituut (<i>Deutsches Institut für Normung</i>)
F_A	sisemiste rataste hõõrdejõud, N
F_B	välimiste rataste hõõrdejõud, N
F_c	tsentrifugaaljõud, N
F_m	gravitatsioonijõud, N
g	raskuskiirendus, m/s^2
GH	maapealne teenindus (<i>Ground Handling</i>)
GPS	satelliitnavigatsiooni süsteem (<i>Global Positioning System</i>)
GPU	õhusõiduki maapealne voluseade (<i>Ground Power Unit</i>)
h	raskuskeskme kõrgus, m
HDPE	kõrge tihedusega polüetüleen (<i>High-density polyethylene</i>)
HT	maanteerehv (<i>Highway Terrain</i>)
l	objekti kaugus, m
IRR	sisemine tulumäär (<i>internal rate of return</i>)
LED	valgusdiodlamp (<i>Light-emitting diode</i>)
LIDAR	laserskaneerimisseade (<i>Light Detection and Ranging</i>)
m	veoki mass, kg
n	perioodide arv
NPV	nüüdispuhasväärtus (<i>net present value method</i>)

PP –	tasuvusaeg (<i>payback period</i>)
r –	diskontomäär
R –	kurvi raadius, m
R_A –	sisemiste rataste reaktsioonijõud, N
R_B –	välimate rataste reaktsioonijõud, N
S –	pindala, m ²
SAE –	Autoinseneride Selts (<i>Society of Automotive Engineering International</i>)
SATS –	Singapuri Lennujaama terminali teenused (<i>Singapore Airport Terminal Services Limited</i>)
SWOT –	tugevused, nõrkused, võimalused, ohud (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats)
t –	aeg, s
TO-BE –	termin tulevikuprotsessi tähistamiseks
ULD –	laadimisühik (<i>Unit load devices</i>)
v –	sõiduki kiirus, m/s
v_{roll} –	rullumiseks vajalik kiirus, m/s
w –	teljevahe, m
μ –	hõõrdetegur
3D –	3-mõõtmeline (<i>3-dimensional</i>)

SISSEJUHATUS

Kiiresti muutuv maailmas kasvab lennureisijate arv pidevalt nõudes olemasolevate infrastruktuuride ja ressursside tõhusamat kasutamist. Samal ajal arenevad ka reisijate ootused probleemideta reisimise suhtes. See tähendab, et lennujaamad peavad kiiresti kohanema, säilitades samas sujuva käitamise võttes arvesse enda tegevusest tekkivat keskkonda mõjutavat jalajälge. Transpordisüsteemide tulevaste keskkonna-, tootlikkus- ja ohutusnõuete täitmiseks on uus tehnoloogia hädavajalik [1]. Iga kasutusele võetav automatiseeritud lahendus peab olema efektiivsem kui eelnev. Sellest tulenevalt on autonoomsete sõidukite osakaal kasvutrendis [2]. Transpordisektoris on juba hakatud sisenema autonoomsete lahendustega mere-, maantee- ja raudteetranspordis. Meresektoris on autonoomsed laevad, valitud linnades on isejuhtivaid busse, samal ajal kui Google on mitu aastat USA-s oma isejuhtivate autodega teel olnud. Traditsiooniline lennundus on oma autonoomsete transpordisüsteemide osas teistest transpordisektoritest maha jäänud. Kuid alates 2018. aastast on lennuväljadel hakatud tegema samme ka lennunduse automatiseerimise suunas ja võetud kasutusse kõrge automatiseeritusega elektrilisi pagasiveokeid aitamaks lihtsustada maapealse teeninduse tööprotsesse.

Iga teenindusprotsessides osalev tehnika peab vastama ootustele, kuid loodud uuenduslikud sõidukid, nagu Aurrigo ja British Airways' veok, Vanderlande' FLEET ja Red Dot poolt loodud SATS autonoomne konteinerühiku trailer, ei vasta ootustele. Seda seetõttu, et Aurrigo ja British Airways' ja SATS autonoomne treilerveok on loodud vedama ULD-ühikuid. Kuna Tallinnas käivad eelkõige lahtiselt laetud lastiga lennukid, ei ole antud lahenduste kasutuselevõtt majanduslikult otstarbekas. Kolmanda innovaatilise lahendusena loodud Vanderlande' FLEET hõlmab endas üksikute pagasite transporti konveierlintide vahel suurtes lennujaamades, kus on paigaldatud mitu lindisüsteemi väljuva pagasi jaoks, ent Tallinna Lennujaamas on vaid üks konveierlint.

Probleem, millele soovitakse antud töö käigus lahendust leida, on, et lahtiselt laetavate pagasiühikute transpordiks ei ole hetkel välja töötatud kõrge automatiseerituse tasemega veokit. Sellest tulenevalt on autori eesmärgiks luua mehitamata pagasiveoki kontseptsioon, mis vastaks lennuväljal opereerimise tingimustele ja ettevõtte vajadusele. Käesolev töö keskendub autonoomse sõiduki kontseptsiooni peamiste osade valimisele, nende paigutusele, ohutusanalüüsi koostamisele, hindamaks veoki stabiilsust ja võimet tööd teha, ja tasuvusanalüüsile.

Töö peamiseks uurimisküsimuseks on:

- Mis tingimused peavad olema täidetud, et antud kontseptsioon oleks töökindel?
- Millised lahendused peavad olema sõidukil, et masin vastaks territooriumil liiklemise tingimustele?
- Mis ajal tasub projekt end ära?

Uurimisstrateegiaks valitakse juhtumiuuring, mille käigus töö autor kasutab nii kvantitatiivseid kui ka kvalitatiivseid uurimismeetodeid. Kasutatud meetoditeks viidi läbi vaatlus, ekspertintervjuud ja dokumendianalüüs. Vaatluse käigus uuritakse õhusõiduki laadimise protsessi, et kaardistada AS-IS mudel ja koguda andmeid tööülesannete täitmiseks kuluva aja kohta. Lisaks kaardistusele viidi läbi intervjuud töötajatega, kes puutuvad tööülesannete täitmisel kokku õhusõiduki laadimisega, et hinnata nende hoiakuid automatiseeritud lennujaama tehnika ja nende ootuste kohta loodava kontseptsiooniga. Samuti viiakse läbi dokumendianalüüs saamaks teada lennuväljal liiklemisel kehtivate piirangute kohta.

Magistritöö on jaotatud neljaks peatükiks. Magistritöö esimeses peatükis antakse ülevaade sarnastest kõrge automatiseerituse tasemega lahendustest. ja hetkeolukorrast ettevõttes, milleks sooritati dokumendianalüüs, et leida kontseptsioonile esitatud piirangud, mis tulenevad töökeskkonnast, viidi läbi ekspertintervjuud ja vaatlus. Teises peatükis võetakse vaatluse alla peamised komponendid, mida kontseptsiooni loomisel kasutada. Valitud osadele määratakse esialgne paigutus, mida kontrollitakse kolmandas peatükis. Kolmandas peatükis viiakse läbi arvutuskäigud hindamaks kontseptsiooni stabiilsust. Neljandas osas teostati projekti tasuvusanalüüs võrdluses hetkel kasutuses oleva ressursiga. Lõputöö lõppeb lisadega. Lisades on kajastatud saabuvate ja väljuvate lendude pagasi käitlemisele kulunud ajakulu, STILL R07-25 mõõtmed, SAE automatiseerituse tabel ning laadijatüüpide tabel.

Märksõnad: autonoomne sõiduk, lennundus, maapealne teenindus, tasuvusanalüüs, magistritöö

1 TAUST JA PROBLEEMI PÜSTITUS

Viimase paarikümne aastaga on teaduse ja tehnika areng suunatud automatiseeritud juhtimise valdkonnale, muutes inimeste elu lihtsamaks läbi osaliselt või täielikult toimuva protsessi, mis toimib ilma juhita. Automatiseerimine on saanud toimuda tänu mikroprotsessorite, andurite, geodeetiliste infosüsteemide, telekommunikatsiooni ja seotud tehnoloogiate edusammudele. Nendest muudatustest tulenevalt soovivad ettevõtted liikuda turgudele, mis on spetsialiseerunud digitaalsetele ja veebipõhiste tehnoloogiatele, näiteks tehnikatööstus. Kui üldiselt on isejuhtiv auto, mida nimetatakse ka ratastega liikuvaks robotiks, intelligentne auto, mis jõuab sihtkohta, tuginedes anduritelt saadud teabele, sealhulgas teekeskonna tajumisele, marsruudi teabele ja auto juhtimisele, võimalus ressursside optimeerimiseks ja inimeste mugavuse tagamiseks, mille peamiseks omaduseks on inimeste või esemete transportimine ilma juhita [3]. Samuti keskendutakse peamiselt lennujaamade rohelisemaks, tõhusamaks, tootlikumaks, ohutumaks ja tasuvamaks muutmisele. Nii tuleks luua sobiv ratastega liikuv robot, mis leiaks rakendust lennunduses, olles seejuures keskkonnasõbralik [4]. Kõige silmapaistvam põhjus on kasvuhoonegaaside koguste vähendamine, mida aitavad vähendada elektrisõidukid, olles kaubanduslikult jätkusuutlik lahendus. [5]

Teiste tööstusharude hulgas on lennundus üks tähtsamaid sektoreid, mis aitab kaasa ülemaailmsele majanduskasvule. 2020. aasta alguses tabas maailma COVID-19 kriis, mille tulemusel sulgesid riigid enda piire, sh Eesti [6], pannes lennureisid ootele. Kriisile reageerides pidid paljud lennujaamad langetama keerulisi otsuseid, sulgedes osa infrastruktuurist ja hinnates lennujaama kapitalikulutusi, et viia kulud miinimumini. Sellest tulenevalt koondati perioodil juuli-september 17 protsenti kontserni töötajatest [7]. Olles endiselt taastumisfaasis [8] ning võttes arvesse tehnoloogilisi arenguid, mida suudab automatiseerimine kaasa tuua, on ka lennunduses arengupotentsiaali ressursside optimeerimiseks, muutes seeläbi õhusõidukite teenindamine kiiremaks ja sujuvamaks protsessiks [9]. Kui praegusel ajal võib kohata täis- ja/või poolautomaatseid sõidukeid rohkem piiratud aladel, nagu ladudes [10] ning vähesel määral lennujaama territooriumil, oleks lennundussektori maapealse tehnika automatiseerimine loomulik areng protsesside parendamiseks [8].

Lisaks soovile luua keskkonnasõbralik ja efektiivne lahendus, on elektrisõiduk ka vaikne vähendamaks müratas lennujaama territooriumil. Tänapäeval esitletakse elektri- ja hübriidsõidukeid kui kaasaegse autotehnoloogia tulevikku, pakkudes odava ja tõhusa, väiksema heitkogusega transpordi võimalust. Elektrisõiduki loomiseks on palju

võimalusi. Täiselektrisõidukid on tavaliselt mehaaniliselt vähem keerukad kui hübriid- ja sisepõlemismootoriga sõidukid. Elektrisõidukeid on võimalik liigitada järgmiselt:

- akuga elektrisõiduk;
- hübriid-elektrisõiduk;
- pistikuühendusega hübriid-elektrisõiduk ja
- kütuseelemendiga elektrisõiduk. [5]

Akuga elektrisõiduk varustab end akupakki salvestatud energia abil. Akude mahutavusest tulenevalt peab arvestama, kui kauaks jätkub energiat. See sõltub sõidustiilist, liiklusolukorrast, kas liiklus on seisev või sujuv, teeludest, kliimast, aku tüübist ja selle vanusest. Tühja aku täitmine võtab tavapärase sisepõlemismootoriga sõiduki tankimisega võrreldes tunduvalt rohkem aega. Kui sisepõlemismootoriga auto on võimalik täita 5 kuni 10 minutiga, siis elektriauto akude laadimine võib võtta aega kuni 36 tundi olenevalt mahutavusest ja laadimisjaamast (kiirlaadija, aeglane laadija). [5]

Hübriidsõidukid kasutavad nii sisepõlemismootorit kui ka elektrienergiat. Kahe erineva energiaallika kombinatsiooni kasutamisest tulenevalt ongi selle nimetus hübriid. Hübriidmasin kasutab madalatel kiirustel elektrienergiat ning suurematel kiirustel sisepõlemismootorit. Sõiduki käivitamise ajal võib sisepõlemismootor käitada mootorit generaatorina, et toota energiat ja hoida seda akus. Samuti kruisil sõites laeb sisepõlemismootor lisaks auto edasi viimisele ka akut. Pidurdamise ajal töötab jõuülekanne generaatorina, et akut laadida regeneratiivpidurduse abil. Hübriidsõiduki kontseptsiooniga on sarnane pistikuühendusega hübriid-elektrisõiduk. Pistikuühendusega hübriid-elektrisõiduk kasutab samuti sisepõlemismootorit ja elektrilist jõuülekanne, ent nende peamine erinevus seisneb sellest, et pistikuühendusega hübriid-elektrisõiduk kasutab peamise tõukejõu allikana elektrienergiat, vajades sellest tulenevalt suuremat akumahtu. Pistikuühendusega hübriid-elektrisõiduk kasutab esmalt elektrienergiat kuni see on peaaegu otsakorral ja alles seejärel võtab kasutusse sisepõlemismootori aitamaks autol edasi minna. Hübriid-elektriautod saavad enda akusid laadida otse võrgust, mida hübriidsõiduk teha ei saa. [5]

Viimase elektrisõiduki kontseptsioonina saab välja tuua kütuseelemendiga masinad, mille peamiseks energiaallikaks on kütuseelemendid, mis kasutavad elektri tootmiseks keemilisi reaktsioone, mille läbiviimiseks kasutatakse vesinikku ja hapnikku. Toodetud elekter salvestatakse akudesse või kondensaatoritesse. Antud sõiduki eeliseks on võimalus ise toota elektrit ja täita akusid või kondensaatorit sama kiirelt nagu gaasi jõul

liikuvat sõidukit. Puudusena võib välja tuua tuleohtlikkuse, kui paak peaks lekkima, vesinikkütuse jaamade nappuse, sest odavat, jätkusuutlikku ja keskkonnasõbralikku vesiniku tootmise viisi veel pole, ja kütuseelementide kalli hinna (200 dollarit kW kohta versus sisepõlemismootoril <50 dollarit kW kohta). [5]

Akuga elektrisõiduki, hübriid-elektrisõiduki, pistikuühendusega hübriid-elektrisõiduki ja kütuseelemendiga elektrisõiduki võrdlusel soovitakse luua protsesside parendamiseks aku pealt toimiv elektriline sõiduk, mille automatiseerituse tase on tasemel 4 [11]. Automatiseerituse tase 4 tähendab, et veok teeb sõidu algusest lõpuni kõik otsused iseseisvalt ilma juhita, ent vajab sisendit teekonna alustuseks töötaja poolt [3]. Sisend töötaja poolt on oluline, kuna registreeritud pagasi peale- ja mahalaadimise aeg võib varieeruda erinevate asjaolude tõttu, näiteks õhusõiduki mootorite väljalülitamine, õhusõidukiteeninduse spetsialistilt lähenemiseks loa saamine. Hetkel on loodud mõned üksikud elektrilised pagasit vedavad autonoomsed veoki lahendused, nagu Aurrigo ja British Airways' autonoomne veok, Vanderlande' autonoomne veok FLEET ja Red Dot konteiner treiler, mida kajastatakse antud peatükis täpsemalt.

1.1 Alternatiivsõidukid

1.1.1 Aurrigo ja British Airways' autonoomne veok

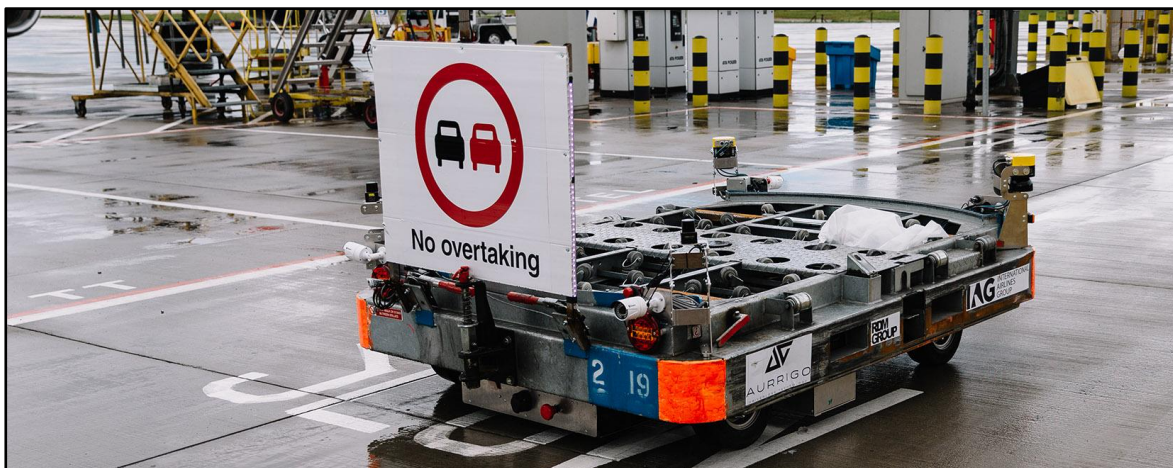
2019. aasta alguses töötati välja Aurrigo ja British Airways' koostöös esimene emissioonivaba mehitamata pagasiveok (joonis 1.1), mille tulemusel oleks võimalik kiirendada lasti peale- ja mahalaadimise protsessi. See tähendab, et enam ei pea ootama kõikide pagasikärude, mida on kuni viis, täitmist enne teekonna alustamist ja autonoomse pagasiveoki saab panna teele kohe kui see on täis laetud. Tegu on ULD-põhise lahendusega, kuhu on võimalik paigutada kuni 40 pagasit [12]. Antud veok on elektriline, olles seeläbi keskkonnasõbralikum kui sisepõlemismootoriga veok. Loodud lahendus toimib kasutades LIDAR- ja GPS- tehnoloogiat. GPSi korrektseks toimimiseks on eelnevalt lennujaama territoorium kaardistatud: ei ole ühendatud Google Maps süsteemiga [13]. Samuti kasutab see kaamerapilti enda asukohta tuvastamiseks ja ohutute manööverduste tagamiseks [13]. LIDARi puhul on tegu laserskanneerimis-seadmega, mille töö põhineb väljasaadetud laserkiire tagasi-pegeldunud impulsilt kolmemõõtmeliste koordinaatide arvutamisel (valem 1.1) [16]. [14]

$$l = (c \cdot t) \div 2, \quad (1.1)$$

kus l - objekti kaugus, m,

c - valguskiirus, m/s²,

t - aeg, s.



Joonis 1.1 Aurrigo ja British Airways' autonoomne ULD-põhine pagasiveek Auto-Dolly [15]

LIDAR-instrumendil on kolm põhikomponenti – skanner, laser ja GPS-vastuvõtja. Sensorist saadakse nurgad ja kaugused ning saadud andmed seob süsteem GPS-iga, et saada asukoha täpsed koordinaadid x , y ja z . Lisaks on andmete kogumisel ja analüüsimisel roll ka fotodetektoril ja optikal. Veakil on kompaktne topelt õõtshoova vedrustus (ing. k. *double-wishbone suspension*) kõigil neljal rattal, amortisaatorid ja kerged alumiiniumist vedrupüstmikud sõidumugavuse optimeerimiseks [17]. [16]

1.1.2 Vanderlande' autonoomne veok FLEET

FLEET-süsteemi näidati avalikkusele juba 2017. aastal näitusel, kuid kasutusele võeti see 2018. aasta novembris Hollandi Schipholi lennujaamas. FLEETi eesmärgiks on tõsta reisijate kogemuse kvaliteeti, parandades samal ajal teenindustaseme tõhusust. Samuti tagab see pagasi konveierlindi süsteemi paindlikkuse kohtades, kuhu pole võimalik suurt konveierlinti laiendada, sh iseteeninduskioski juurde [18]. See tähendab, et FLEET asendab vajaduse fikseeritud konveierite ja sorteerimissüsteemide järele. [19]

FLEET (joonis 1.2) puhul on tegu esimese mehitamata pagasikäitlejaga, mille abil kantakse sõidukite poolt läbi lennujaama üksikuid kotte, mis määrab kindlaks lennu

lahkumisaja reisija iseteeninduskioskisse sisestatud info kaudu või pagasite süsteemi lisamisell registreerimislauas teenindaja poolt. Seejärel masin kalkuleerib optimaalseima marsruudi toimetamiseks see konveierlindile. See tähendab, et antud tehnoloogia põhineb reaalaaja andmetel, kusjuures marsruudi planeerimist pidevalt ajakohastatakse ja optimeeritakse, et saavutada võimalikult suur läbilaskevõime. Vanderlande' sõnul suudab FLEET transportida umbes 450 kotti tunnis [18]. See süsteem pole mitte ainult muljetavaldav paindlikkuse, funktsionaalsuse ja range disaini poolest, vaid on ka väga tõrkekindel, kuna defektiga sõiduki saab kiiresti välja vahetada. [19]



Joonis 1.2 Vanderlande' autonoomne veok [19]

See süsteem koosneb intelligentsetest automatiseeritud robotautodest. Sõidukil on kasutusel GPS, sensorid ja kaamerad. Sensorite abil liigub masin iseteeninduskioski lindi juurest konveierlindi juurde, mille pealt töötajad saavad sorteerida registreeritud pagasid lendude kaupa. Vanderlande' FLEET puhul ei ole tarvis vedrustuse järele, kuna see liigub tasasel pinnal siseruumides. Sõidukites kasutatav materjal on eluea lõppedes taaskasutatav [18]. Hinnanguliselt tarbib FLEET kuni 50% vähem energiat kui traditsioonilised pagasikäitlussüsteemid, pakkudes samal ajal võimalusi väiksemateks personalikuludeks [20]. Samuti aitab süsteem reaalaajas üksikute kottide jälgimist, ilma, et oleks vaja kottidele endale elektroonilisi silte paigaldada.

1.1.3 SATS autonoomne konteiner trailer robot

Singapuri Changi lennujaam püüdleb laiaulatusliku lennujaamas kasutatava tehnika automatiseerimise poole ja ehitas selle tarbeks terve terminali, et aidata testida tuleviku

lennujaama roboteid: nii automaatseid koristusroboteid, pardale mineku väravaid kui ka toitlustust transportivaid masinaid. 2017. aasta oktoobris avatud terminal 4 (195 000 ruutmeetrit [21]) loodi sooviga katsetada ja arendada välja erinavaid automatiseeritud lahendusi reisija teekonna ja logistiliste lahenduste mugavamaks ning kiiremaks muutmiseks. [22]

Terminal 4-s testiti Singapuri Lennujaama terminali teenuste (SATS) poolt kaugjuhitavat sõidukit, mis peale konteineri täislaadimist suudab Singapuri Changi lennujaama terminal 4-s pagasi toimetada pagasikäitlusalale 10 minutiga. Arvestades vajadust pakkuda reisijatele kiiret, tõhusat ja sujuvat teenust, on automatiseerimine ainus viis seda laiaulatuslikult teha. Samuti aitab automatiseerimine ettevõttel hallata suuremaid pagasi kogused ilma täiendava tööjõuta. SATS elektrilise kaugjuhitava sõiduki (joonis 1.3) puhul on tegu masinaga, mis veab ULD-konteineri alust konveierlindi juurest lennuki juurde ja saabunud ühikud saabuva pagasi lindini. [22]



Joonis 1.3 Autonoomne konteiner treiler robot [23]

Red Dot Robotics poolt loodud treiler veab korraga üht ULD-ühikut, mis tähendab, et mahalaadimise protsess on kiirem kui esmalt kõikide aluste täitmise korral ning alles seejärel liikuma hakkamisel. Masin kasutab liikumiseks lasereid ja kaameraid. Masin on võimeline enda järel vedama 2000 kg. [23]

1.1.4 STILL R07-25 veok

Hetkel on Tallinna Lennujaama (34 000 ruutmeetrit [24]) territooriumil kasutusel elektrilised veokid STILL R07-25 (joonis 1.4). STILL R07-25 on varustatud elektroonilise mootoriga, akuga ja vilkuriga. Parema sõidumugavuse tagamiseks on veokil tahavaatepeeglid, valgustamiseks ning nähtavaks tegemiseks esi- ja tagatuled, kojamees ja küljele avanevad uksed. Ilma pagasikäru kasutamisetä oleks võimalik paigutada veoki kabiini taha 5-10 pagasit, kuid lisades veokile käru, mis on lendude teenindamisel tavapraktika, on mahutavus suurem ja võimalus vedada kuni 50 ühikut. STILL R07-25 puhul on tegemist elektrijõu toimel liikuva veokiga (Lisa 1), mis liigub punktist A punkti B kabiinis opereeriva juhi abil: automatiseerituse tasemega 1. Veokil on üksikud juhiabisüsteemid, nagu automaatne käiguvahetus ja elektriline seisupidur.



Joonis 1.4 STILL R07-25 [25]

Mootor on kolmefaasiline, mis on levinuim vahelduvvoolul töötav elektrimootor (80 V). Seda seetõttu, et sel on lihtne ehitus, kerge hooldamine ja madal hind. Teiste elektrimasinatega võrreldes on ta töökindel, rasketes talitlusoludes vastupidav ja vajab vähe jooksvat hooldust. Seetõttu on asünkroonmootorite kasutamine majanduslikult otstarbekas ja tõhus. Kabiini taga, lasti platvormi all, paikneb mahukas akupakk mõõtmetega 1026x996x462 mm [26], mis vastab DIN 43536A standardile ja kaalub 1580 kg (80 V/ 480 Ah). Masina kogukaal on 3800 kg. Sel nelikveolisel sõidukil on kasutusel nii ees kui ka taga pneumorehvid. Esimesed rehvid on 6,00 R9 ja tagumised

suuremad mõõtmetega 7,00 R12 [27]. Vedrustusena on veokis kasutusel keerdvedrud (ing. k. *coil spring*). [28]

1.2 Lähteülesanne

Tallinna Lennujaama kontserni kuuluv AS Tallinn Airport GH asutati 2005. aastal eesmärgiga parendada partneritevahelist teeninduskvaliteeti. AS Tallinn Airport GH ülesanneteks on reisija- ja õhusõidukiteenindus. Reisijatele pakutavate teenuste loetellu kuuluvad: reisija ja pagasi lennule registreerimine, reisija probleemide lahendamine ja abistamine, pardallemineku teenus lennu lähtevärravas, alaealiste saatmisteenus, reisijate transportimine. Lisaks teenindab maapealne teenindus õhusõidukeid neid positsioneerides, pukseerides, perroonil saateteenust osutades; varustades lennukeid vooluallika, salongisoojenduse, vee- ja tualetiteenusega; kauba, posti ja pagasi laadimisega. Ettevõtte visiooniks on olla lennundussektoris parim maapealse teenuse pakkuja Eestis, tagades seeläbi töö efektiivsus, ohutus ja innovatsioon. Selle saavutamiseks on igal töötajal oma roll pakkuda teenust kokkulepitud ajal ja kvaliteediga. [29]

Ehkki ettevõtte visiooniks on olla lennundussektoris parim maapealse teenuse pakkuja Eestis, kasutades innovatiivseid lahendusi, mis tähendab, et hetkel töövahendiks oleva käsitsi juhitava puksiiri puhul ei ole tegu innovaatilise lahendusega. Sellega ei saa liikuda enne, kui kõik on täis laetud, mis tähendab, et kärud seisavad nii kaua kuni kogu veetav last saab käideldud ja sõidukijuht on valmis alustama teekonda punktist A punkti B. Olemasolevad uuenduslikud lahendused nagu Aurrigo ja British Airways' ning Red Dot treiler autonoomsed lahendused on mõeldud eelkõige suurtes lennujaamades konteiner ehk ULD-lennukite teenindamiseks, kus pagasialal korjatakse pagas kokku ning paigutatakse konteineritesse, et laadimisprotsess oleks lihtsam. Lastiruumi paigutamine toimub sama ühikuga. Vanderlande' FLEET süsteemi eesmärgiks on siseruumides toimetada pagasit ühe ühiku kaupa punktist A punkti B, kus seda kasutatakse suurtes lennujaamades pagasi transpordiks pagasi äraandmisjaama (ing. k. *bag drop off kiosk*) konveierlindilt sorteerimise konveierlindile. Antud veok aitab liigutada pagasit ilma konveierlindi laiendustööta, mis oleks ettevõttele kulukam kui FLEET süsteemi rakendamine. Kuna Tallinna Lennujaamas käib ULD-lennukeid vähem, tavaliselt kaks lennukit päevas, kui lahtise lastiga ehk BLK-lennukeid ning võttes arvesse Tallinna

Lennujaama pagasiala pindala, mis ei ole võrreldav suurte lennujaamadega, ei rahulda loodud lahendused teenindusvajadusi.

Sellest tulenevalt oleks tarvis välja töötada käru põhimõttel autonoomne lahendus lahtise lasti transpordiks. STILL veoki ja kärude kombinatsioon on küll sobilik lahendus täitmaks tööülesandeid, kuid uue kontseptsiooni elluviimine ja kasutusele võtmine aitaks ettevõttel olla oma töös efektiivsem ja innovaatilisem. Ressursi maksimaalseks ärakasutamiseks ja efektiivsemaks muutmiseks on tarvis mehitamata pagasiveokit, mis saab alustada teekonda ajal, mil see saab tühjentatud või täislaetud optimeerides seeläbi protsessile kuluvat aega ja lihtsustades töötajate tööd. Käesoleva töö raames on autor püstitanud järgmised uurimisküsimused:

- Mis tingimused peavad olema täidetud, et antud kontseptsioon oleks töökindel?
- Milliseid tingimusi peab sõiduk täitma, et masin vastaks territooriumil liiklemise tingimustele?
- Mis ajal tasub projekt end ära?

1.2.1 Algolukorra analüüs

Käesoleva magistr töö uurimisstrateegiaks on juhtumiuurimus, mis võimaldab hinnata protsessi läbi ajalise mõõtme ja läbi kindla tegevuse, milleks on lasti peale- või mahalaadimine. Juhtumiuurimust võib kirjeldada kui kindla asutuse taustast lähtuvat analüüsi, kus andmekogum on saadud vaatluse, andmeanalüüsi või intervjuude teel [30]. Autori poolt läbiviidud juhtumiuurimuse objektiks on õhusõidukiteeninduse osakonna töötajad, kes on määratud lendu teenindama, eesmärgiga kaardistada nende tööülesandeid. Kaardistav uurimus analüüsib protsessi erinevaid aspekte, et leida uus lahendus või mitu lahendust hetkel kasutusel olevale olukorrale, muutes seda efektiivsemaks. Kvalitatiivsed meetodid sisaldavad endas intervjuusid, küsitlusi ja dokumendianalüüsi. Nende kasutamisel luuakse vastamisel seosed teadmiste ja reaalsuskeskkonna vahel [31]. Lõputöö eesmärgi saavutamiseks kasutas autor andmete kogumiseks nii kvalitatiivseid kui ka kvantitatiivseid uurimismeetodeid. Kvantitatiivse andmekogumise käigus viidi läbi vaatlus, teeninduseks kuluva ajalise mõõtme saamiseks ja AS-IS mudeli kaardistamiseks, ning kvalitatiivse andmekogumise meetodina kasutati dokumendianalüüsi ja ekspertintervjuusid. [32]

Vaatluse läbiviimiseks on tähtis mõista töötajate tegevusi protsessis [32]. Vaatluse käigus kogutud primaarandmete (L2.1) saamiseks viidi läbi osalusvaatlus, kus vaatleja

oli kõrvalseisja rollis [32]. Andmete kogumine toimus ajaperioodil 01. märts kuni 07. mai 2021. Õhusõiduki teenindusprotsessi käigus uuriti tervest protsessist vaid laadimist, kuna uus kontseptsioon hõlmab seda osa. Vaatluse eelis on vahetu teave teenindusprotsessi kohta [32]. Töö autor soovis koguda informatsiooni pagasiühikute arvu kohta, kas õhusõidukiteeninduse spetsialistil olev arv klapi süsteemis olevate arvuga, mitu korda toodi pagaseid juurde kolleegide poolt, mis kell alustati laadimist, mis kell lõpetati laadimine.

Igal läbiviidud vaatlusel osales laadimise juures 3 kuni 4 õhusõidukiteeninduse spetsialisti. Nende arv varieerus vastavalt tipptunnil väljuvate lendude ja/või spetsialistide arvust tööl. Kolme spetsialistiga protsessides viibisid ühes lastiruumis kaks meest ja lennu eest vastutav isik andis kärult kohvreid lintraktorile, mis suunab kohvrid lastiruumis olijatele. Nelja töötajaga protsessi puhul laeti pagaseid samaaegselt kahe mehe poolt ette ja kahe poolt taha lastiruumi. Igal vaadeldaval lennul tõi mitte teenindusprotsessi määratud töötaja konveierlindilt pagasid õhusõiduki juurde, et laadimist ei peaks panema pausile. Kõik spetsialistid alustasid teekonda pagasialalt õhusõiduki poole pärast reisijate registreerimise lõppu ehk tellimuslendude puhul 40 minutit enne väljalennuaega.

Ekspertintervjuude eesmärgiks oli saada hinnanguid automatiseeritud lahenduste kasutusele võtmisel töötajatelt, kes puutuksid tööülesannete täitmisel kokku veokiga. Lisaks uuriti võimalike arendusi. Mõlemad läbiviidud ekspertintervjuud toimusid individuaalselt teemaintervjuude vormis, tuginedes eelnevalt kirja pandud teemapunktile. Sel juhul ei ole vastused piiratud ega suunatud. [32]

Teemaintervjuu alateemad, millest lähtuti, on järgnevad:

- tuleviku lennujaam;
- hoiak mehitamata sõidukite ja/või lahenduste suhtes;
- pagasiala renoveerimistööd (ukse kõrgus, kallakud, ruumikus);
- pagasiveoki kontseptsioon:
 - tehnoloogilised lahendused,
 - mootor,
 - kandevõime;
- automatiseeritud sõiduki suurim pluss;
- muud kommentaarid.

Kuna intervjuueeritavatega toimunud vestlused olid poolstruktureeritud, kestis üks intervjuu 1,5 tundi ning teine 1 tund. Kogutud informatsiooni põhjal selgus, et hea

meelega võetakse füüsilist tööd vähendavad tehnoloogilised lahendused vastu, nagu automaatsed pardalemineku väravad, automaatne isikutuvastus läbi kaamerate, pesurobotid, isesõitvad bussid, puksiirid, pagasiveokid ja sorteerimisrobotid. Sorteerimisrobotit kirjeldati kui "inimrobotit", mis on võimeline koguma kokku lennuinfo põhjal kärule konkreetse lennu pagasid. Lisaks mainiti autonoomseid saateautosid, mis aitaks positsioneerida õhusõidukeid seisupaikadele. Kõige rohkem tuntakse puudust abistavast tööjõust tiptundide ajal, mil töötajad täidavad määratud ülesandeid ja seetõttu ei ole võimalik abistada kolleege puuduolevate ühikute transportimisega.

Lõputöö raames loodaval kontseptsioonil peeti vajalikuks arvestada praeguse sõiduki mõõtmetega (Lisa 3), lisada 360° kaamera ja võimalus laadida kaamerapildi informatsioon serverisse, et probleemide korral oleks võimalik olukordi analüüsida ning viia läbi parendusi. Vältimaks masinale kogemata pihta minnes antud käsklusi, soovitati mõelda sõrmejäljelugejale ja/või läbipääsuloa lugejale. Lisaks mainiti andureid masinas ja teekonnal, mida masin läbib, et veok suudaks püsida enda rajal, või LIDAR-seadet. Mõlema intervjuueeritava poolt sooviti mürataseme madalamal hoidmiseks elektrimootorit, kuna üldine müratase on niigi kõrge.

Kandevõime kohta öeldi, et kokkuvõttes ei oleks hea, kui teenindusprotsessis oleks tellimuslendude puhul rohkem kui 4-5 kärü. See tähendab, et üks kärü peaks mahutama keskmiselt 40-50 pagasit nagu hetkel kasutuses olev kärü. Võtteks aluseks 30 kg pagasi ja maksimaalse mainitud pagasi arvu tuleks kandevõimeks 1500 kg. Reaalsuses oleks ühel kärul veetav mass väiksem, kuna registreeritud pagasi kaalud jäävad üldjuhul 20 kg juurde. Edasiarendusega sooviti pagasituvastuskannerit, mis skannib kärule laetavad pagasid, talletades selle info süsteemi ja sidudes saadud info teenindatava lennuga. Seda seetõttu, et turvalisuskaalutlustel läbiviidavaks kontrolliks saaks hõlpsasti info, millises järjekorras said pagasid lastiruumidesse laetud, et nende asukohta saaks kiiremini tuvastada.

Pagasiaala renoveerimistööde kohta öeldi, et pagasialale sissesõidul olnud kalded likvideeritakse põranda madaldamise abil. Jäävad üksikud minimaalsed kallakud seisuplatside läheduses, kuid mis ei ületa 10°. Pagasiaala uste kõrgus on 2100 mm, mis paneb piirangud maksimaalsele veoki kõrgusele. Samuti on pagasialal olemas ABB 432RS6 seinale kinnitatud jõupesad nimivooluga 32 A. Pistik on kolmefaasiline, laadides veoki täis 6 tunniga. Kasutuses olev laadimisdokk vastab Euroopa Liidu direktiivile 2011/65/EL [33]. Sellest asjaolust tulenevalt peab kontseptsioonile osi valides sellega arvestama.

Dokumendianalüüsiga selgitati välja piirangud loodavale kontseptsioonile. Arvestades korjealal olevat ruumi ning liiklemistingimusi lennuväljal, on loodaval sõidukil erinevad piirangud, mis tulenevad AS Tallinn Airport GH käsiraamatu peatükkidest sõidukite liikluskorraldus Tallinna lennuvälja kinnisel territooriumil [34], pagasi töötlemise tsoonide režiimi eeskirjast [35] ja ohutuse üldnõudeid Tallinna lennuväljal [36], on uuele kontseptsioonile esitatud tingimused järgmised:

- sõidukiirus kuni 30 km/h;
- mõõtmed 3000 mm x 1300 mm;
- kogu kõrgus ei tohi ületada 2000 mm;
- pöörderaadius 3000 mm;
- mahutavus 40-50 ühikut;
- rööbe 1100 mm;
- kandevõime 1500 kg;
- võimeline läbima kurvi raadiusega 3 meetrit;
- elektrimootor;
- rattavalem: 4x2.

Lennujaama territooriumil kasutatavale tehnikale kehtivad lisaks Liiklusseaduses [37] olevatele tingimustele, nagu ees valged ja taga punased tuled, sõiduki maksimaalne pikkus ja laius, ka eritingimused. Veok peab olema tähistatud omanikettevõtte tähistusega, ettevõttesisese registreerimisnumbriga, mis peab olema selgelt loetav, nähtaval kohal, ja kollase vilkuriga. Kollane vilkur peab olema sisse lülitatud liiklusalal liigeldes ja tööülesandeid täites, väljalülitatud masinal tuli põlema ei pea. See peab olema paigaldatud kerekonstruktsiooni ülemisele osale nii, et oleks tagatud vilkuri ringnähtavus. Selle valgusintensiivsus peab jääma vahemikku 40 cd-400 cd ja vilkumissagedus 60-90 plinkimist minutis. Lisaks vilkuriga end nähtavaks tegemisele oleks tarvis lisada külgedele kollased ja taha punased helkurid/tuled. [34]

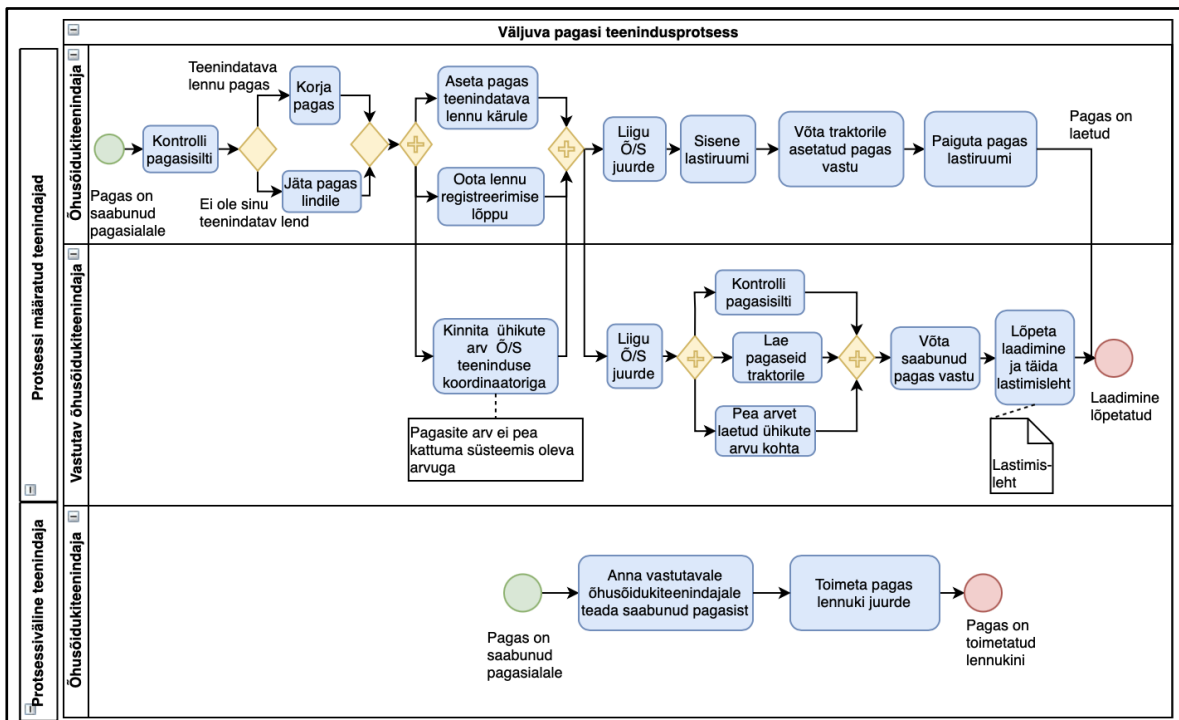
Liiklemisel tuleb arvesse võtta asjaolu, et Lennujaama pagasiala on piiritletud ustega, mida on võimalik avada distantspuldiga, kui masin tuleb või läheb [35]. Praegusel ajal avab juht distantspuldi abil ukсед, kuid isesõitva masina kasutusele võtmisel tekitaks see personalile lisa jälgimistööd ning see poleks optimaalne lahendus. Seetõttu tuleks kasutuses olevatele ustele paigaldada automaatne numbrituvastussüsteem, mis avab ukse sellele lähenevale sõidukile, millel luba siseneda pagasialale. Kuna masin peab liikuma ka õhusõiduki teenindustsooni, peab olema automaatselt toimiv seisupidur, mille rakendumisel lisatakse rattale klots iseenesliku liikumise vältimiseks, ja kiirus teenindusalal 5 km/h, kui perroonidel, tehnoloogilises tsoonis ja ringteel võib see ulatuda kuni 30 km/h [34].

Lisaks liiklemist puudutavale infole kogus töö autor arhiivimaterjalidest infot saabuvate lendude pagasi ooteaja kohta. Tulemused on koondatud lissasse L2.2. Ooteaja põhjal on võimalik hinnata uue kontseptsiooni ajalist tasuvust saabuvate lendude teenindamisel. Saabuva lennu teenindusprotsessi hinnatakse tasuvusanalüüsis.

1.2.2 AS-IS protsess

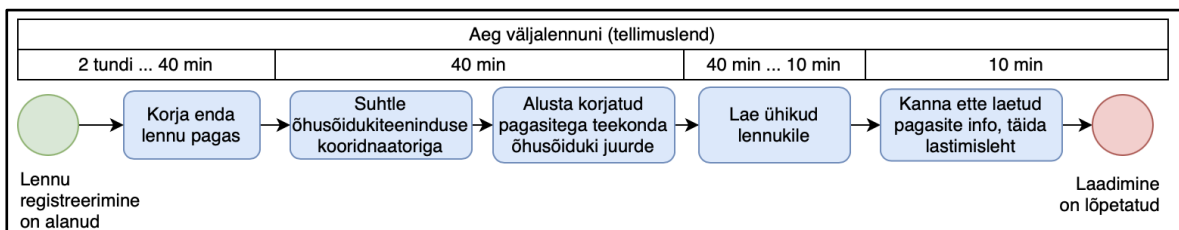
Tallinna Lennujaama maapealse teeninduse laadimisprotsessis osalejate töö on kirjeldatud joonise 1.5 abil. Selles on ka kajastatud täpsustav kommentaar ja vormistatav dokument – lastimisleht. Õhusõiduki laadimise juures osaleb tavaliselt kolm teenindajat, ent võimalusel määratakse neli töötajat, et lühendada laadimisaega, kuna laadimine saab toimuda samal ajal nii esimestesse kui ka tagumistesse lastiruumidesse.

Lennu ettevalmistamine algab lennule reisijate registreerimisest, mis on kaks tundi enne väljalennuaega. Pagasialal teenindaja valmistub pagasikorjeks ja valib konveierlindile jõudnud pagasite seast enda lennu pagasid ja laeb need kärusse. Korjamise aeg lõppeb lennu registreerimise lõpuga. Olenevalt lennufirmast varieerub see vahemikus 30-40 minutit. Kui lindil sel ajal rohkem lennu pagaseid ei nähta, suheldakse õhusõidukiteeninduse koordinaatoriga, kes annab informatsiooni lõpliku ühikute arvu kohta ja ütleb laadimise. Seejärel liigutakse õhusõiduki juurde, olenemata, kas ühikute arv vastab süsteemis olnud arvule või mitte. Lennu registreerimise lõpus on oluline esimesel võimalusel õhusõiduki juurde minna, et alustada olemasolevate ühikute pealelaadimist hoidmaks kokku aega ja vältimaks laadimisest tulenevat hilinemist hilise laadimise alustamise tõttu. Lennuki juurde jõudes alustatakse pealelaadimisprotseduuri vastavalt õhusõiduki teenindusmanuaalile, kus on kirjeldatud lastiruumide laadimise järjestus, et terve protsessi vältel oleks tagatud lennuki balanss.



Joonis 1.5 Autori koostatud protsessi AS-IS mudel

Laadimiseks läheb õhusõiduki lastiruumi õhusõidukiteenindaja, kelle ülesandeks on võtta vastu lintraktorile asetatud pagasid ja lugeda ühikud üle, mis pärast vastutava õhusõidukiteenindajaga kinnitatakse. Vastutav õhusõidukiteenindaja peab lisaks pagasite lintraktorile asetamisele ja ühikute üle lugemisele ka veenduma lennumbri õigsuses. Kui pagaseid on puudu, hakkab laadimise eest vastutav uurima võimalike pagasialal olevate ühikute kohta peale olemasolevate pagasite laadimise lõppu või saab varem vastava info kolleegilt, kes on konveierlindi juures. Peale informatsiooni laekumist, viib pagasialal olnud töötaja puuduoleva(d) pagasi(d) lennuki juurde, mille võtab vastu vastutav õhusõidukiteenindaja ja laeb selle pardale. Laadimise lõpus täidab vastutav töötaja lastimislehe ja toimetab selle õhusõidukiteeninduse koordinaatorile.



Joonis 1.6 Autori koostatud joonis väljuva lennu teenindusele kulunud aja kohta

Eelpool selgitatud tellimislennule minev ajakulu on visualiseeritud joonisel 1.6. Määratud ajad tulenevad lennufirma teenindusmanuaalidest. Jooniselt on näha, et teenindatava lennu ettevalmistus hakkab registreerimise avanedes ja korje lõppeb

tellimuslendude puhul 40 minutit enne väljumist. Peale korjeaja lõppu minnakse lennuki juurde ja alustatakse laadimist. Selleks on pool tundi. Ühikute arv tellimuslendude puhul on 100-180 ühikut olenevalt reisijate arvust.

2 SÕIDUKI KOMPONENTIDE VALIK

Elektrisõidukid koos taastuvate energiaallikate kasutamisega on lahendus transpordisektori dekarboniseerimiseks [38]. Selle loomisel ei pea arvestama nii keerulise ülesehitusega nagu seda on sise põlemismootoritega masinatel tavapäraseks toimimiseks. Peamised komponendid, mida võib sõidukist leida on elektrimootor, liitiumioon aku, reduktor, inverter, jaotuskarp, elektri kompressor, kütteseade, pardalaadija, DC/DC konverter, kaablid ja tagavara toiteallikas [39]. Elektrilisel toimel liikuv masinal on üks liikuv osa, mootor, mis vajab toimimiseks toiteallikat. Neid kahte komponenti saab paigutada sõidukile erinevatesse kohtadesse ja kui need on elektri juhtmete kaudu ühendatud, siis sõiduk töötab. Elektrisõiduki sees võib jaotada komponendid kolme peamisesse kategooriasse:

- energiaallikas – aku;
- veojõusüsteem – elektrimootor, muundur, kontrollid, jõuülekanne, rattad;
- abisüsteem – toiteallikas, roolivõimendi. [5]

Tänapäeval esitletakse elektri- ja hübriidsõidukeid kui kaasaegse autotehnoloogia tulevikku, pakkudes odavat, tõhusat ja väiksema heitkogusega transpordivahendit. Kontseptsiooni loomisel peab meeles pidama, et see toetaks SAE automatiseerituse taset 4 (Lisa 4), mille kohaselt teeb enamus toiminguid masin iseseisvalt. Iseseisvus lennuvälja territooriumil tähendaks võimalike ohuolukordade ennetamist ja liikumist kasutades erinevaid tehnoloogilisi lahendusi, nagu kaamerad, LIDAR ja GPS [11]. Töötava autonoomse sõiduki süsteem nõuab ohutuks juhtimiseks teavet sõiduki erinevate parameetrite kohta, näiteks rajatunnetus, teiste liiklusvahendite ja ehitiste tuvastus. Samuti peab see olema suuteline reageerima ohuolukordadele automaatse pidurduse teel, mis tähendab, et töötatakse välja otsustusprogramm hõlmates rajal oleva vaba ruumi hindamist, võttes arvesse mitut sõidukit. Otsuse tegemiseks on tavaliselt kaks võimalust: objektide vaheline kaugus ja ajaintervall. Objektide vahelise kauguse puhul tuleb vahemaad tõlgendada sõltuvalt kiirustest, kui ajaintervallid näitavad, millise aja möödudes teatud sündmus toimub või kui kaua teatud sündmus aega võtab. Nendeks on aeg kokkupõrkeni, pidurdusaeg ja vältimisaeg. Nende ajaintervallide põhjal saab arvutada manööverdamiseks ja pidurdamiseks kuluva aja, mille alusel võtab programm vastu parima otsuse ja tegutseb vastavalt. [40] Antud töö raames masina programmeerimiskeele valiku ja selle seadistamise küsimused ei tule käsitlesele, kuid tegu oleks võimaliku edasise teema arendusega. Autor teeb valikud peamiste komponentide osas, näiteks mootor, aku, rehvid, vedrustus, pardalaadija,

jõuülekanne ja raam. Komponentid on lõplikud valikud tehakse tuginedes tehnilistele andmetele.

2.1 Mootor

Teadmata alternatiivsetel masinateel kasutatavate mootorite kohta, tuleb teha valik potentsiaalsete mootorite seast. Valitav mootor peab olema nii võimas, et suudaks vedada 3000 kg, elektriline ja hinna-kvaliteedisuhe peab olema tasakaalus. Elektrimootori valiku eesmärgiks on oluline säilitada keskkonnasõbralike lahenduste kasutamist lennuväljal, millest lähtub Tallinna Lennujaam enda tegevustes [41].

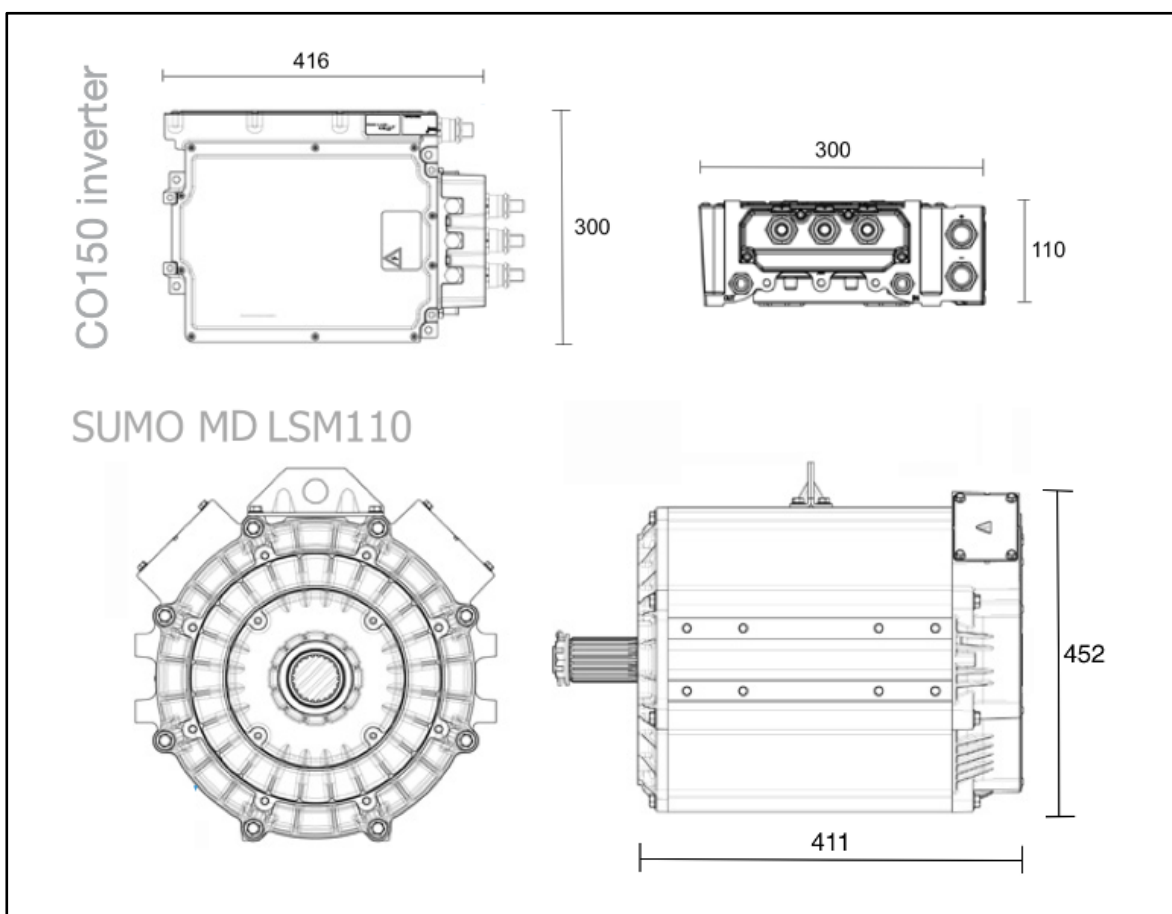
Vahelduvvoolul (AC) põhinevad asünkroonmootorid on tuntud kui parim kandidaat elektriliste masinatele rakendamise eesmärgil, kuna need on vastupidavad, vähem kulukad, tehnoloogiliselt "küpsed" ja vajavad vähem hooldust [42]. Mootorile aitab alalisvoolu (DC) energiat sobivaks muundada inverter. Inverter kontrollib kõrgepinge energia voogu elektrimootori ja liitiumioonaku vahel, sõltuvalt aku pingest, mis töötab vahemikus 250 kuni 430 volti. Protsessi käigus muundab jõuelektroonikamoodul akusse salvestatud alalisvoolu vahelduvvooluks, mis on sobilik elektrimootorile. Seetõttu peab lisaks mootori mõõtmetele arvestama ka inverteri omadega. Nende kahe komponendi dimensioonid peavad olema võimalikult väikesed, et need ei kergitaks osade paigutamisel raami alumisse osasse masina kogu kõrgust.

Esmalt vaatluse all olev STILL R07-25 on varustatud kolmefaasilise (80 V) vahelduvvoolu elektrimootoriga. See on loodud eesmärgiga olla suuteline enda järel vedama lasti 25000 kg väärtuses. Teades, et loodava kontseptsiooni eesmärgiks on luua ühe kaupa liikuvad masinad, ei oleks tegu otstarbeka mootoriga uuele kontseptsioonile. Seetõttu võetakse vaatluse alla kahe eri tootja poolt, ent omavahel sarnaste omadustega saadaval olevat elektrimootorit: Nissan Leafi mootor EM57 ja TM4 SUMO.

Nissan Leafi mootori EM57 puhul on tegemist AC sünkroonmootoriga, mille võimsus on 110 kW [43]. EM57 mootori dimensioonid koos inverteri ja konverteriga on 700x800x800 mm. 110 kW mootor on kasutusel Nissan Leaf autodes koos 40 kWh akuga. Seetõttu võib öelda, et nende toodete koos kasutamine on tõestatud ning efektiivne, kuid mõõtmelt tõstab antud mootori-inverteri kombinatsioon

kontseptsiooni kõrgust, muuteks veoki ebastabiilsemaks. Sellest tulenevalt välistatakse antud kontseptsiooni kasutamisel Nissan Leaf EM57 mootor.

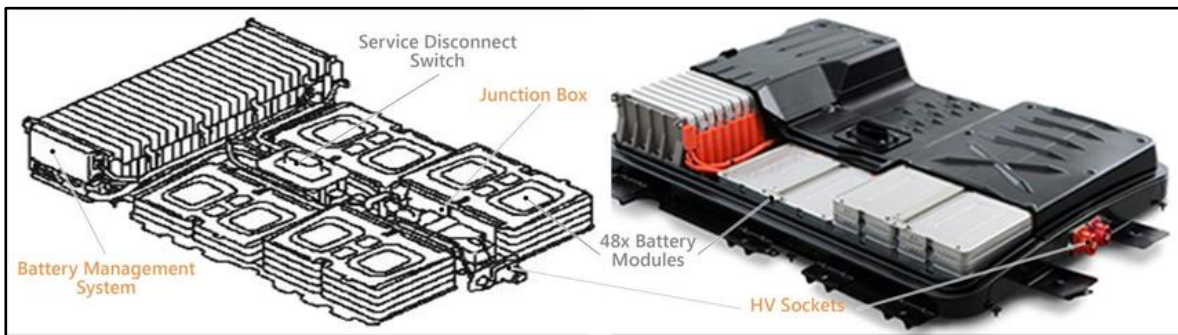
Teisena valikusse võetud SUMO MD osutus valituks, sest AS Dana on kogemustega elektriliste jõuülekannete tootja. Ettevõtte projekteerib ja toodab elektrimootoreid, generaatoreid, jõuelektroonikat ja juhtimissüsteeme, mis sobivad äri-, auto-, mere-, mäetööstus-, raudtee-, autospordi- ja harrastajate sõidukite turule. Firma poolt loodud mootor-inverter kombinatsioon on sobilik oma lahenduse poolest nii väikekaubandus-, väikebussi- ja keskmise koormusega veoautodele ja bussidele kui ka raskeveokite 8. klassi hübriidsõidukitele. 2019. aastal turule toodud elektrilise jõuülekandega TM4 SUMO süsteeme saab optimeerida, et pakkuda erinevatele sõiduki platvormidele parimat jõuülekande efektiivsust valitud töötsükli põhjal. Toodetud mootorite seast osutub valituks SUMO MD HV1500-3P mootor-inverter süsteem võimsusega 100 kW (joonis 2.1). Kolmefaasiline LSM110 mootor 452x452x411 mm kaaluga 180 kg, mis tuleb koos 11 kg kaaluva inverteriga CO150, mille laius on 300 mm, pikkus 416 mm ja kõrgus 101 mm. [44]



Joonis 2.1 CO150 inverter ja SUMO MD LSM110 mootor [44]

2.2 Aku

Iga elektrisõiduki põhikomponent on aku – see määrab lõpuks elektrisõiduki maksimaalse tööulatuse, tõhususe, laadimisaja, eluea ja jooksvad kulud. Maapealse teenuse pakkuja peab olema suuteline teenindama mitmeid õhusõidukeid erinevatel tiptundide aegadel: hommikul, lõunal, õhtul. Mis tähendab, et ressursid peab olema sel ajal optimaalselt planeeritud ning elektriveokid laetud, et akupakk peaks vastu 5 tundi. Elektrilises GPU-des kasutatavad Nissan Leaf 40 kWh akud (joonis 2.2) on tõestanud enda usaldusväärsust õhusõiduki elektriga varustamises. Antud kriteeriumist lähtuvalt osutub valituks Nissan Leaf 40 kWh liitiumioon 48 mooduliga aku, mõõtmetes 1547x1188x264 mm ja kaaluga 275 kg [45]. Tehase andmete kohaselt peaks selle sõiduulatus olema 8 tundi (239 km) ja tarbimine 164 Wh/km [46]. Aku oodatav eluiga on 8-10 aastat, mille möödumisel ei pea vahetama tervet pakki välja, vaid piisab kulunud elementide vahetamisest, muutes hooldamise lihtsamaks ja odavamaks.



Joonis 2.2 Nissan Leafi 40 kWh aku [39]

2.2.1 DC/DC konverter

Sõiduki sees olevad elektrikomponendid erinevad aga pinge nõuete järgi, enamasti töötavad need palju madalamal pingel. Enne elektrienergia talletumist akusse, tuleb seda esmalt muundada sobilikul sagedusel, et elektrienergia ei rikuks veoki elektrivoolu tarvitavaid komponente ära elektrienergia akusse salvestamisel ega kasutamisel. See tähendab, et sisendenergia ajutiselt salvestatakse ja energia vabastamisel on väljund sobilikul pingel. Ehkki konverteri puhul ei ole tegu raske komponendiga, kaaludes vaid 5 kg, kuid tegu on vajaliku osaga auto elektrisüsteemist. Valitud konverter ei pea olema suure mahutavusega. STILL R07 veokisse on paigaldatud 12 V [27] konverter, mis näitab, et antud väljendvõimsus on sobilik lahendus loodavale kontseptsioonile.

12 V väljundvõimsusega DC/DC konverterite seast valiti välja Delphi (272x238x80 mm) [47], Nissan Leafi ja Chevrolet Volti (330x230x80 mm) [48] muundurid. Nissan Leafi konverter valiti, sest eespool on valitud aku autotootja Nissani valikust. Teised valitud komponendid osutusid valituks väiksemate mõõtmete tõttu. Nissan Leafi konverter on modifitseeritud tehase poolt pikkuse ja laiuse mõõtmetelt kompaktsemaks, mis tõttu on see kitsam, ent kõrgem võrreldes Chevroleti ja Delphi omaga, muutes selle loodavale kontseptsioonile ebapraktiliseks. Võrdsete tehniliste näitajatega muundurite valikul osutub valikuks väiksemate mõõtmetega Delphi konverter (joonis 2.3).



Joonis 2.3 Delphi konverter [47]

2.2.2 Pardalaadija

Laadija valiku kriteeriumiks on võimalikult kiire aku täislaadimine, sest lennukeid käib tiptundidel mitmeid, mis vajavad teenindamist ning selle vahepealsel ajal ei ole võimalik akusid laadida. Tiptundide vaheline aeg on keskmiselt 3-5 tundi olenevalt nädalapäevast. Nissan kasutab Leafi pardalaadijaks 6 kg kaaluvat ja 6,6 kW (288x257x95 mm [49]) AC väljundvõimsusega laadijat, mis suudab 220 V toiteallika korral anda 2. taseme (tavalise) täislaadimise 7+ tunni asemel umbes 4 tunniga [50]. Laadija kasutab kahe muunduriga süsteemi parandades liitiumioonaku laadimise efektiivsust, laadimistaseme täpsust ja teenindusaega. Muutes antud pardalaadija sobilikuks loodava kontseptsiooni tarbeks.

Esimese taseme laadimine (120 V). 1. taseme laadimisel kasutatakse 120 V volutugevust, mis on tavalistes Ameerikas leiduvates majapidamises leiduvates pistikupesades. Laadimine toimub läbi toitejuhtme ja seadmete, mis enamikel elektrisõidukitel on kaasas. Esimese taseme laadimise eeliseks on paigalduskulude puudumine, kui teil lähedusse on juba paigaldatud laadimisjaam, ning selle väiksem mõju elektrivõrgule. Puudusena võib välja tuua laadimiskiiruse, mis ei ole kõige kiirem: täislaadimiseks kulub keskmiselt 40 tundi. [51]

Teise taseme laadimine (220-240 V). 2. taseme laadimisel kasutatakse elektrivoolu aku süsteemi kiiremaks laadimiseks 220-240 V võimsust. Seda tüüpi laadimise tagamiseks on vaja paigaldada elektrisõidukitele mõeldud spetsiaalne laadimisjaam ja kasutada elektrijuhtmeid, mis on võimelised töötama kõrgema pingega elektriga. Antud laadimise eelisena võib välja tuua kolm korda kiirema laadimisaja võrreldes esimese taseme laadimisega ja energiatõhususe eelnimetatud laadimise ees. Puudusteks on, et see on kallim võrreldes 1. tasemega ja see pakub suuremat mõju elektrivõrgule.

Alalisvoolu kiire laadimine. Alalisvoolu kiire laadimine annab ühilduvatele sõidukitele 80 %-lise laadimise 30–60 minutiga. Autotootjad kasutavad 1. ja 2. taseme laadimiseks autotehnika inseneride ühingu SAE J-1772 pistikut, ent alalisvoolu kiirlaadimiseks on kolm kasutatavat pistiku tüüpi: CHAdeMO, SAE kombineeritud laadimissüsteem ja Tesla laadija [52] (Lisa 5). Enamik alalisvoolu kiirlaadimisseadmete tootjaid pakuvad ühilduvuse suurendamiseks seadmeid, millel on nii CHAdeMO kui ka SAE kombineeritud laadimissüsteemi pordi pistikud. Alalisvoolu kiire laadimise puhul väheneb laadimisaeg märgatavalt, muutes selle pea sama kiireks nagu sisepõlemismootoriga sõiduki tankimise, kuid tegu on oluliselt kallima lahendusega kui seda on 1. ja 2. taseme seadmed. Samuti kõrgepinge kolmefaasilised toiteühendused suurendavad paigalduskulusid ja pakub suuremat pinget elektrivõrgule. Sõltuvalt sõidukist ja laadimisseadmetest võib külma ilmaga kiirlaadimine olla aeglasem.

Luues autonoomse pagasiveoki kontseptsioon, tuleb arvesse võtta, et Tallinna Lennujaama pagasialal on juba paigaldatud kolmefaasiline laadimisvõimalus. Seetõttu ei tule ettevõttel selle paigaldamiseks teha lisakulutusi, kui kasutada juba paigaldatud alalisvoolu kiiret laadimissüsteemi.

2.3 Jõuülekanne

Elektrisõiduki rakendamisel on elektrijaama ideaalseks töö omaduseks pidev väljundvõimsus kogu kiiruse vahemikus. Madalatel kiirustel on pöördemoment konstantne, ületamata maksimumi, mis on piiratud rehvi ja maa kokkupuutepinna vahelise haardumisega. See pidev võimsus annab sõidukile suure veojõu madalatel kiirustel. Kuna elektrimootori kiiruse ja pöördemomendi profiil on ideaalilähedane, kasutatakse tavaliselt ühe- või kahekäigulist jõuülekanne. Sõiduki ülekande nõuded sõltuvad elektrimootori omadustest ja sõiduki jõudluse nõuetest. Kui sise põlemismootorid vajavad väljundvõimsuseks mitu erineva ülekandearvuga käiku, siis elektrimootorid tekitavad ühtlast pöördemomenti igal pöörlemiskiirusel konkreetses vahemikus. [53]

Katkematu käiguvahetus on elektrisõidukite soovitatav omadus, kuid mitte kõik mitme kiirusega ülekanded pole selleks võimelised. Elektrisõidukis kasutatavateks jõuülekanneks võiks kasutada topeltsiduriga käigukasti või automaatkäigukasti [54]. Kontseptuaalselt on need peaaegu samaväärsed. Erisus seisneb selles, et topeltsiduriga käigukastid kasutavad tavaliselt paralleelset võlli arhitektuuri ja vajavad ainult kahte sidurit, samas kui automaatkäigukastid kasutavad tavaliselt planetaarset käigukasti arhitektuuri ja vajavad rohkem siduri- ja piduriseadmeid, kui pakutakse üle kahe ülekandearvu. Sellest tulenevalt võib ehitada üles elektrisõiduki jõuülekanne, millel on mootor, käigukast ja diferentsiaal, kus diferentsiaal võimaldab ratastel erineva kiirusega pöörelda [5]. Ilma sidurita lahenduse puhul on mootoril fikseeritud käik, kuna puudub võimalus käikude lahusus tagada. Mootori, käigukasti ja diferentsiaali kombinatsiooni on võimalik paigutada eraldi või ühele teljele. Näiteks esiveolisel Nissan Leafil on pandud lahendus ühele teljele: esiteljele.

Kuid elektrisõidukeid on võimalik ka luua taga- või nelikveolisena. Tagaveo puhul paigutatakse mootor sõiduki tagumisse ossa, pakkudes ülekannet tagumistele ratastele. Suurema juhtimise ja võimsuse saavutamiseks võib kasutada ka nelikveoga konfiguratsioone, kus on paigutatud mootor nii esiteljele kui ka tagateljele, kuid sellega kaasnevad lisakulud, kaal ja keerukus. Seetõttu on kaheteljeline jõuülekanne välistatud. Nelikveo pakkumiseks saab paigutada ratastele eraldi mootorid, kuid selle miinuseks võib välja tuua programmeerimise keerukuse, kuna kurvis pöörlevad kõik rattad erinevatel kiirustel. Lähtudes territooriumi eripärast, kus on pigem ühtlane tasapind, valitakse kontseptsioonile mootori-fikseeritud käigukasti-diferentsiaali kombinatsioon, millel on mootor paigutatud sõiduki tagumisse ossa. Mootori paigutamine tagumisse

ossa tagab veoki paremad liikuma hakkamise tingimused. SUMO MD elektrilise jõuülekande kaal on 20 kg.

2.4 Rehvid

Continental HT ratastele esitatud andmed tuginevad Euroopa riikide töötingimustele ja on vastavuses autotehnika üldtingimuste DIN 70020 standardiga. Lisaks on Continental ConRad HT pneumorehvid (tabel 2.1) antistaatilised. Nimetatud rehvid on kasutusel tööstustraktoritel, kahveltõstukitel, raskeveokitel, iseliikuvatel tõstukitel, platvormkärudel ning lennuvälja sõidukitel just nende pika tööea, hea hinna ja kvaliteedi suhte, haarduvuse ja parema sõidumugavuse tõttu. Raskeks tööks mõeldud rehvi, mis vastab kõrgetele läbisõidu ja kahjustuskindluse nõuetele, omab märgatavalt suuremat mustri sügavust, uut rehvi disaini, kulumiskindlat rehvimaterjali ja tugevdatud külgsseinaga. [55]

Teiseks sobilikuks variandiks rehvi valikul oleks Emerald Resilient (tabel 2.1) firma, mis pakub tööstuslikke rehve rohkem kui 70 riigis. Pakkudes kvaliteetseid rehve erinevatele lennuvälja maapealsetele teenindustehnikatele: pagasikärud, konteineralusel, traktorid, GPU-d jt. Emerald Resilient Solid rehvid vastavad Euroopa rehvide ja velgede tehnilise organisatsiooni (ing. k. *The European Tyre and Rim Technical Organisation*) ning Rehvide ja Velgede Assotsiatsiooni (ing. k. *The Tire and Rim Association*) standarditele. Pakutavate rehvide kujundus on loodud pakkumaks maksimaalset veojõudu ja tagades seejuures madal veeretakistus. Lisaks on nende rehvid nii antistaatilised kui ka libisemisvastased. [56]

Tabel 2.1 Continental HT [55] ja Emerald Resilient Solid [56] rehvide võrdlus

	Continental Conrad HT			Emerald Resilient Solid
	Pneumorehvi	Pneumorehvi	Pneumorehvi	Täisrehvi
Rehvi	6,00 R9	5,00 R8	4,00-8	6,00-9
Koormusindeks	121	111	97	130 [57]
Kiirusindeks	A5 (25 km/h)	A5	A5	-
Rehvide kandevõime (kg)	1450	1420	950	1900
Veljed (tollid)	4,00 E9	3,00 D8	3,00 D8	4,00
Rehvi laius (mm)	165	136	124	173
Väline diameeter (mm)	551	476	422	552

Allikas: autori koostatud

Rehvi valikul on tähtis pidada silmas, et ühe rehvi kandevõime ei tohiks olla alla 750 kg. Vastasel juhul rehv ei peaks vastu ning lõhkeks. Tabelisse 2.1 valitute põhjal on näha, et mõlema firma poolt turul olevad valikud on sarnaste näitajatega ja sobilikud töötamiseks lennuvälja töötingimustes: raske koormustaluvus, ilmastikuolude vaheldumine. Soovides mitte muuta konstruktsiooni kõrgeks tuleks valida väiksemate mõõtmetega rehvid, nagu Continental Conrad HT pneumorehvid suuruses 4,00-8, mille väline diameeter on 422 mm. Väiksem väline diameeter muudab masinat madalamaks, tuues raskuskeset allapoole.

2.5 Valgustusseadmed

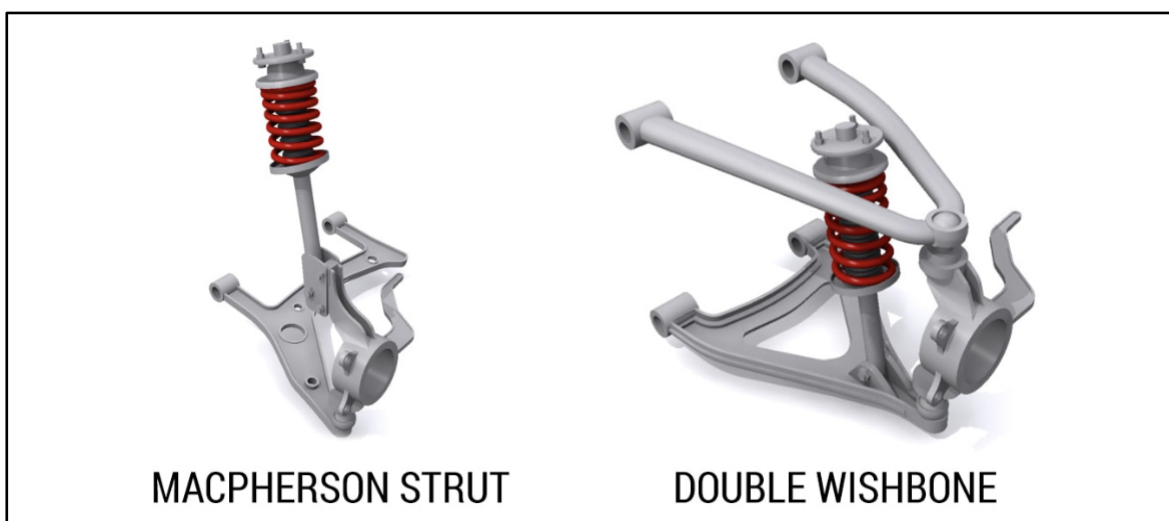
Vilkuri valikul on oluline jälgida vilkumissagedust ja valgusintensiivsust. Intensiivsuse tagab Velleman HAA40A (12 VDC, 150 mA) vilkuril oranži akrüülkatte all olev ksenoonlamp võimsusega 1 W. Vilkumissagedus on sellel 90-110 plinkimist minutis (tööiga $\pm 3 \times 1000000$ vilkumist), mis tähendab, et kõige madalamale sagedusele seadistades jääb see nõuete piiridesse. Töötemperatuur jääb vahemikku -40 °C kuni $+80$ °C, muutes selle Eesti kliimale sobilikuks. Lisaks on see tihendatud ja veekindel. [58] Lisaks vilkurile peab masinal olema nii esi- kui ka tagatuled, mis piiratud nähtavusega ilmastikuoludes muudavad masina nähtavaks kaasliiklejatele. Esimeste ja tagumiste tuledena on kasutuses LED-tuled.

2.6 Vedrustus

Vedrustuse eesmärgiks on tagada sõidumugavus juhitavuse kaudu summutades teel olevaid ebatasasusi, näiteks kivid, augud, kiirustõkkeid [59]. Lennuvälja puhul on tegu tasase pinnaga, milles ei ole löökauke ega kiirustõkkeid. Üksikuid lahtiseid kive võib leida, eriti talvisel ajal, mil libedusetõrjeks puistatakse reisijate silla rataste alla killustikku ning see võib sattuda antud tsoonist kaugemale. Lisaks territooriumil leiduvale killustikule võib masin talvisel ajal puutuda kokku lumiste ja libedate tingimustega. Need võivad olla piirkonniti erinevad, ent pidevalt monitooritakse võimalikke ilmastikust tulenevaid tingimusi ning ennetavalt puistatakse territooriumil ainet, et vältida jää teket.

Kuna vedrustus läheb neljale rattale, tuleb arvestada, et vedrustuse kogukaal võrreldes teiste üksik komponentide massiga ei oleks märkimisväärselt kõrge. Varustuse kogukaal peaks olema võimalikult kerge, et veoki üldkaal jääks 1500 kg piiresse. Antud aspektist tulenevalt on välistatud lehtvedrud (ing. k. *leaf springs*) oma raskuse tõttu, ehkki tegu on raskeid koormuseid taluva vedrustusega, millel on vähe kuluvaid osi. Lehtvedru on võimeline jõude kandma üle piki- kui põiktelje sihiliselt vajamata lisa hoobasid. Lehtvedru koosneb mõnest sama paksuse ja laiusuga, kuid erineva pikkusega metallist (terasest) lehest, mis on ühendatud klambritega. Osa kulumisel on võimalik välja vahetada vaid kulunud osa muutes hoolduskulud odavaks. [60] Lisaks lehtvedrudele ei ole hinnaklassi, keerukuse ja suure ruumitarbe poolest mõeldav ka pneumovedrustus (ing. k. *air-suspension*) ehkki see tagaks hea sõidumugavuse ja reguleeriks vastavalt takistuste ületamisele sõidukõrgust ja jäikust.

Teades, et loodav veok peab olema võimeline töötama välitingimustes, mille töötasapinnaks on hooldatud asfalt, oleks kõige paremaks lahenduseks sõltumatu vedrustus. Selleks kasutatakse kõige tihedamini topelt õõtshoova (ing. k. *double-wishbone suspension*) ja MacPhersoni (ing. k. *MacPherson strut*) vedrustussüsteeme (joonis 2.4) ning väändetoru (ing. k. *torsion bar*). MacPhersoni vedrustusel on võrreldes topelt õõtshoova vedrustusega vähem soodsad kinemaatilised omadused [59], on see siiski piisavalt kompaktne. MacPhersoni vedrustuse puhul on tugisammas ja amort ühendatud üheks komponendiks, milles tugisammas hoiab ratast õiges asendis [59]. Kui topelt õõtshoova süsteemis lisaks õõtshoobadele amortisaator ja keerdvedru, mis on ühendatud kahe paralleelse kinnitusega sõiduki kere külge, pakkudes paremat sõidumugavust. Topelt õõtshoova süsteem on jäigem ja stabiilsem kui muud süsteemid, kuid selle peamiseks probleemiks on keerulisem disain.



Joonis 2.4 MacPhersoni ja topelt õõtshoova vedrustus [61]

Liikudes MacPhersoni ja topelt õõtshoova vedrustuse juurest edasi on vaatluse all väändetoru. Väändetoru plussiks on selle lihtsus ja kompaktsus. Selle peamiseks raskust kandvaks vedruks on torsioonvarras. Selle üks ots on kinnitatud torsioon piiriku külge nii, et see ei saaks liikuda, samal ajal kui teine on torsioonivarda abil vedrustuse külge kinnitatud. Ebatasapärasuse korral latti pingutatakse teatud vastupanu tasemeni, nii et see hoiab paigaldamisel kaubiku algset sõidukõrgust. Miinusena võib välja tuua suurtel kiirustel ebastabiilsuse kurvides. Piirangutest tulenevalt aspektilt on teada, et lennujaama territooriumil üldine kiirus ei ületa 30 km/h muutes antud aspekti peaaegu tühiseks amortisaatorite kasutamisele võtmisel. Ehkki torisoonivarda ülesehitus on lihtne ja sel on vähe kuluvaid osi, ei osutu see valituks ostutoote puudumise tõttu: puudub sobivates mõõtmetes varras.

Valikute praktilisusest tulenevalt on kõige parem kasutada kõikidel ratastel topelt õõtshoova vedrustussüsteemi nagu Aurrigo ja *British Airways'* autonoomses veokis. Selle puhul on tegu sõltumatu vedrustusega. Sõltumatu vedrustus tähendab, et takistuste ületamisel muudab antud ratas selle võrra enda asendit, mil määral takistus kergitab või langetab ratast algasendist, kui teine on samal ajal kas algasendis või vastavalt enda trajektooriga esinevate takistuste poolt üles-alla juhitud. Lisaks sõltumatusele üksteisest on selle eeliseks antud konstruktsioonil kompaktsus ning vajadusel on võimalik kontseptsiooni alusel loodud veoki kere modifitseerida, kuna komponentide kõrval on lisa ruumi.

2.7 Raam

Autotööstuses polümeeride kasutuselevõtt on aidanud vähendada sõiduki massi, kuna nad asendavad raskemaid materjale, näiteks metalli ja klaasi, säästes energiat. Võttes arvesse, et veoki mootor peab olema suuteline vedama lasti ja veokit ennast, peab mehitamata pagasiveok ise olema võimalikult kerge: veoki enda mass ei tohi ületada 1500 kg. See ei tähenda, et võib teha järeleandmisi. Masin peab olema ilmastikukindel ja vastupidav külmale ning kuumale.

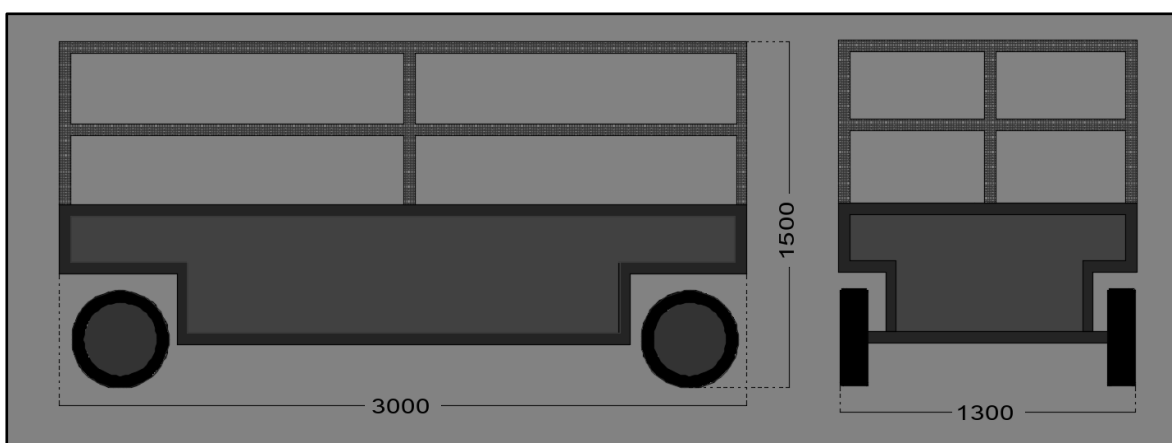
Polümeeride seas on valikus süsinikuga tugevdatud polümeer (ing. k. *carbon fiber reinforced polymer*, CFRP), mille maksumus on 42 €/kg kuni 100 €/kg kohta ja polüetüleen (ing. k. *high density polyethylene*, HDPE) maksumusega 25 €/kg kohta

[62]. Nimetatuid polümeere on võimalik töödelda [63] endale sobivaks läbi 3D printimise. Erinevate tehnoloogiliste arengutega on 3D printimine muutunud kättesaadavamaks ja seetõttu võetud rohkem kasutusele, pakkudes klientidele vastupidavaid, ent odavamaid lahendusi. 3D printimine puhul on tegu väga paindliku töötlemistehnikaga, mis on suunatud peamiselt polümeersete osade ja mudelite tootmisele ja mida saab rakendada plastile, metallile, keraamikale, betoonile ja muudele ehitusmaterjalidele [63]. Süsinikuga tugevdatud polümeeri (tihedus $1,55 \text{ g/cm}^3$) eelisteks on selle tugevus: see on terasest tugevam ja alumiiniumist kergem [64]. Süsinikkiudu polümeeris kasutatakse lennundustööstuses kergemate ja tugevamate lennukite osade valmistamiseks, mis peavad kauem vastu kui samade komponentide valmistamiseks valitud metallisulam. Vastupidavus ja tugevus on argumendid, mille pärast kasutatakse süsinikuga tugevdatud polümeere üha enam nii lennunduses kui ka autotööstuses. Samuti sobib välitingimustes kasutamiseks kõrge tihedusega ($0,94\text{--}0,96 \text{ g/cm}^3$) polüetüleen (HDPE), mille puhul on tegu külma- ja korrosioonikindla, kerge ja amortiseeriva materjaliga. Samuti on see kulumis- ja kemikaalikindel ning seetõttu kasutatakse seda kõige rohkem pudelite, vaatide, kanistrite, gaasi- ja veetorude valmistamiseks [65]. Oma odava hinna tõttu ja omaduste poolest on see sobilik materjal välitingimustele, ent amortiseerumise tõttu ei pakuks antud materjal pagasitele piisavat tuge, et need maha ei libiseks. Sellest tulenevalt tuleb kõrge tihedusega polüetüleen valikust eemaldada.

Lisaks polümeeride ja polüetüleeni kasutamisele on terasest kergem ja laialdaselt kasutusel alumiinium (tihedus $2,70 \text{ g/cm}^3$). Alumiiniumsulamid on kasutusel oma kerguse ja hea vastupidavusega erinevates valdkondades, nagu transpordi- (lennukid, autod, laevad) ja ehitussektor (aknaraamid, tellingud, ukсед), tarbeesemed (nii köögi- kui ka sporditarvikud). Lisaks on alumiinium vastupidav korrosioonile ja kõrge sulamistemperatuuriga $650 \text{ }^\circ\text{C}$, muutes selle sulami sobilikuks välitingimustes kasutamiseks. [66] Valitud alumiiniumlehe kaal on $5,40 \text{ kg}$ ja maksaks $48,60 \text{ €/m}^2$ kohta ($1000 \times 2000 \times 1 \text{ mm}$) [67].

Samuti ei saa valikust välja jätta terast, mis on küll raske, kuid tugev. Võttes arvesse selle massi ($1 \text{ m} = 55,50 \text{ kg}$), on terasest nelikanttorud sobiv alternatiiviks masina ruumraami alumises osas: toestamiseks ja kaitsmaks komponente. $3,60 \text{ €/m}$ maksev nelikanttoru puhul on tegu seest õõnsa toruga, mis on mõõtmetes $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}$, millest viimane tähistab paksust [67]. Terasepuhul on tegu usaldusväärse, tugeva ja laialdaselt kasutuses oleva materjaliga.

Võrreldes loetletud tingimusi süsinikuga tugevdatud polümeeri, polüetüleeni, alumiiniumi ja terase kohta, oleks mõistlik veoki ruumraami alumine osa valmistada terase neliktorust (joonis 2.5). Käru alumine osa, kus sees on mootor, aku ja teised valitud elemendid, vajab piisavalt tugevust, mida suudab pakkuda teras. Antud materjali kasutamine ruumraami alumise osana aitab tuua raskuskeset allapoole. Komponente kaitseb põhja alt alumiiniumsulamist valmistatud plaat, mis on kinnitatud ruumraami külge. Ruumraami alumise osa külgedel kasutatavad plaadid ja pagasit toetavad torud valmistatakse süsinikkiust tugevdatud polümeerist. Antud materjali vastupidavaks muutmiseks on need viimistletud eksoosiidkihiga (ing. k. *epoxy*).



Joonis 2.5 Autori teostatud ruumraami ehitust ja geometriat kujutav lihtskeem

Külgvaates kuluks ühele küljele terase neliktorusid 7212 mm, eestvaates 3212 mm, mõlemaid külgi on kaks. Põhjast toetab komponente neli terase nelikanttoru kogupikkuses 4800 mm. Ruumraami ülemist osa, kuhu peale laetakse last, toetab äärtest raam ise, ent keskossa lisatakse kolm terasest nelikanttoru pikkuses 3600 mm. See tähendab, et kokku kulub ruumraamiks materjali $29248 \text{ mm} \approx 29,3 \text{ m}$. Nelikanttorud kaaluvad kokku 301,30 kg. Sõiduki põhi kaetakse alumiiniumlehega mõõtmetes 1300x3512 mm ($4,60 \text{ m}^2$). Mainitud mõõtmete põhjal oleks tarvis valida kaks alumiiniumlehte, mis kaaluvat kokku 13,50 kg.

Lisaks raamile ja põhjale tuleb lisada masina külgedele süsinikkiust tugevdatud polümeeri plaadid paksusega 10 mm. Need tuleks valmistada mõõtmetes 506x1888 mm ja kaks pisemat 506x200 mm ühe külje kohta, kui pole võimalik valmistada suuremat T-kujulist tükki külgedega $200+456+306+1888+306+456+200+2900 \text{ mm}$. See teeks selle kogu katmiseks kuluva plaadi pindalaks $S = 11580 \text{ cm}^2 \approx 1,16 \text{ m}^2$ ühele küljele. Eestvaates peaks olema T-kujulise plaadi külgedeks $200+200+306+800+306+200+200+1200 \text{ mm}$ või pisemad suuruses 506x800 mm, 200x200 mm ja 200x200 mm.

Antud plaadi pindalaks tuleks $S = 4850 \text{ cm}^2 = 0,485 \text{ m}^2$ ja külgedele kuluks $S = 32860 \text{ cm}^2 \approx 3,29 \text{ m}^2$ väärtuses süsinikkiust tugevdatud polümeeri plaate. Alumise ruumraami pealmine plaat on suuruses $3000 \times 1300 \text{ mm}$, pindalaga $S = 39000 \text{ cm}^2 = 3,90 \text{ m}^2$. Teades, et CFRP kaalub $1,55 \text{ g/cm}^3$ tuleb kogu materjali kaaluks $60,45 \text{ kg}$.

Lisaks alumisel raami osal laialdaselt kasutusel olev CFRP, mis on tugevdatud eksposiidkihiga, kasutatakse antud materjali ka veoki ülemise osa ruumraami valmistamiseks. Torud paigutatakse kolmele küljele ja üks osa jäetakse avatuks, sest sealt toimuks peale- või mahalaadimine. Ühe külje otstes olevad kaks horisontaalset latti on pikkuses 1300 mm ja 1150 mm ning kolm vertikaalset pikkuses 660 mm . Lühemaid külgi on kokku kaks. Pikemal raami küljel on materjali 1200 mm ja 1150 mm jagu. Mis tähendab, et kokku kulub 3D prinditud torustikku 11870 mm , ruumalaga 1187 cm^3 . Tiheduse $1,55 \text{ g/cm}^3$ korral on prinditava torustiku kaaluks $m = 1839,85 \text{ g} = 1,84 \text{ kg}$. Omavahel ühendatakse süsinikkiuga tugevdatud polümeer terasega termilise ühendamise teel, mis hõlmab keevitamist, jootmist või kõvajoodisega jootmist [68].

2.8 Sõiduki komponentide paigutus

Tehes sõidukile töökindluse määramisel analüüsi, on tähtis mõista, kus asub raskuskese tasapinnal. Kõige lihtsam on selle tarbeks koostada masside tabel, mis kajastab iga komponendi asukohta teljest (tabel 2.2). Komponentide seast osutusid valituks järgnevad osad:

- Nissan Leaf 40 kWh aku,
- SUMO MD HV1500-3P 100 kW mootor,
- SUMO CO150 inverter,
- 12 V Delphi DC/DC konverter,
- Nissani 6,6 kW pardalaadija,
- Fikseeritud käiguga jõuülekanne,
- Continental Conrad HT pneumorehvid suuruses 4,00-8 ja
- Igale rattale topelt õõtshoova vedrustus.

Tabel 2.2 Veoki masside tabel

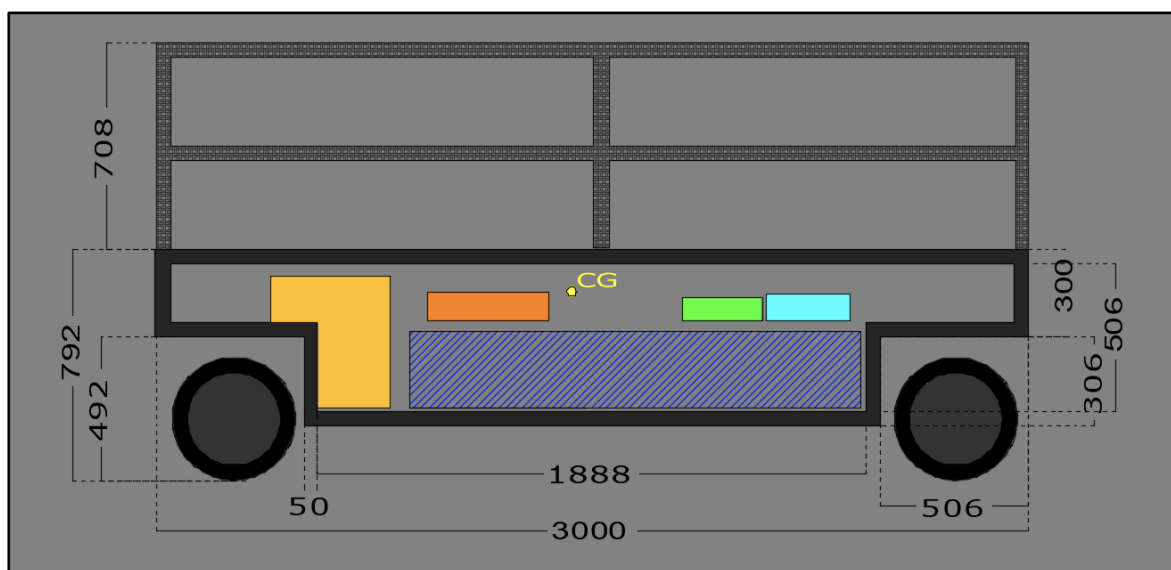
Komponent	Mass (kg)	Kaugus esiteljest (mm)
Nissani 40 kWh aku	275	1354
Delphi 12 V DC/DC konverter	5	102

Tabel 2.2 järg

Komponent	Mass (kg)	Kaugus esiteljest (mm)
SUMO MD HV1500-3P mootor	180	2178
SUMO CO150 inverter	11	1688
Nissani 6,6 kW pardalaadija	6	476
Fikseeritud käiguga jõuülekanne	20	2200

Allikas: autori koostatud

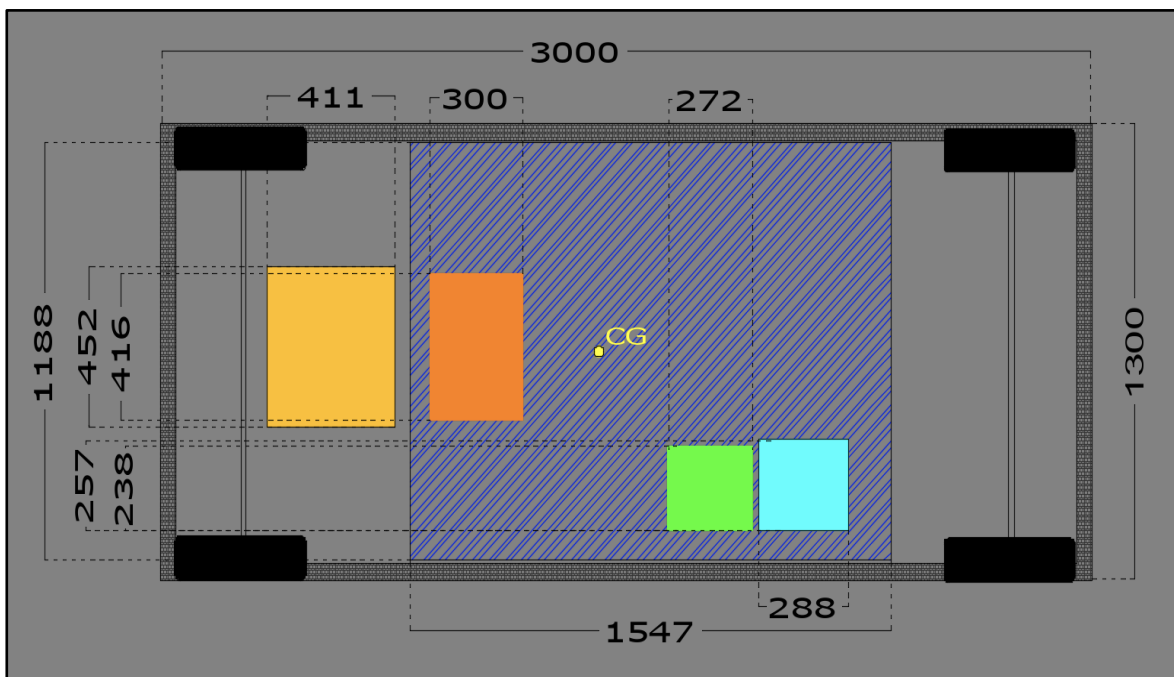
Koondatud informatsiooni põhjal on näha, et kõik nimetatud komponendid kaaluvad kokku 497 kg. Sõiduki raskuskese on esiteljest 1333 mm kaugusel (joonis 2.4). Raskuskeskme kõrgust määratavad arvutused viiakse 3. peatüki punktis 3.1.2. Tabelis ei ole välja toodud Continental Conrad HT pneumorehve 4,00-8, topelt-õõtsuhoova vedrustust ega raami, sest nende paigutused jagunevad võrdselt sõiduki telgede vahel muutmata tulemusi. Nägemaks komponentide paigutust veokis on autor lisanud visualiseerivad joonised 2.4, 2.5 ja 2.6. Joonistel kujutatud kastid värvusega kollane, oranž, roheline, türkiissinine ja tumesinine tähistavad vastavalt mootorit, inverterit, DC/DC konverterit, pardalaadijat ja akut. Kõik joonistele lisatud ühikud on esitatud millimeetrites.



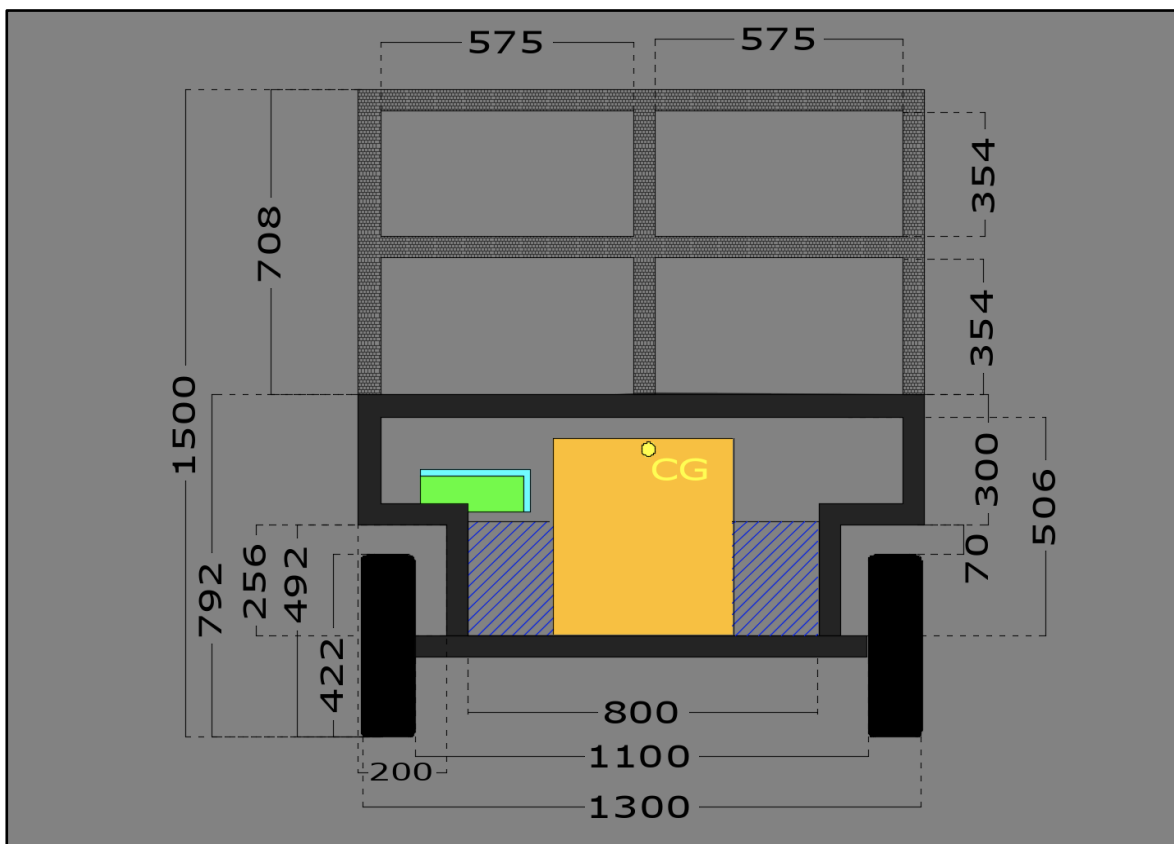
Joonis 2.6 Autori koostatud joonis kontseptsioonile külgvaates

Külgvaates jooniselt (joonis 2.6) on näha, et loodavas kontseptsioonis paigutatakse mootor tagumisse ossa pakkudes tagaveolisel masinal tagumistele ratastele vedavat momenti, mil esirattad tagavad juhitavuse. Sooviga jaotada massid enam-vähem võrdselt telgede vahel ei ole akupakk paigutatud võrdselt nii esi- kui ka tagatelje vahel, vaid nihutatud esimeste rataste suunas, et taha oleks võimalik paigutada mootor. Mootori puhul on aku kõrval tegu teise ühe raskeima elektrilise komponendiga. Lisaks

külgvaates nähtud paigutusele tuleb hinnata, kas valitud komponendid pakuvad rohkem raskust paremale või vasakule masina poolele.



Joonis 2.7 Autori koostatud joonis veokile pealtvaatest



Joonis 2.8 Autori koostatud joonis kontseptsioonile tagantvaatest

Joonisel 2.7 ja joonise 2.8 põhjal on näha, et töö autor on paigutanud raskemad asjad, nagu mootor-inverter ja aku, võrdselt masina külgedest. Antud paigutusega on võimalik pakkuda mõlemale poolele ühe palju massi tagamaks parema stabiilsuse enne pagasite peale laadimist. Masina tühikaalu võrdne jagunemine enne pagasite laadimist tagab stabiilsema masside jaotumise ja raskuskeskme asukoha paiknemise veoki keskpunktis.

3 SÕIDUKI DÜNAAMIKA ANALÜÜS OHUTUSE SEISUKOHALT

Sõiduki dünaamika analüüsiga tehakse esitatud tingimustele kontroll, nägemaks kontseptsiooni töökindlust ümberpaiskumisele ja libisemisele. Sõidukile määratud lähteandmed on leitavad tabelis 3.1.

Tabel 3.1 Pagasiveoki andmed

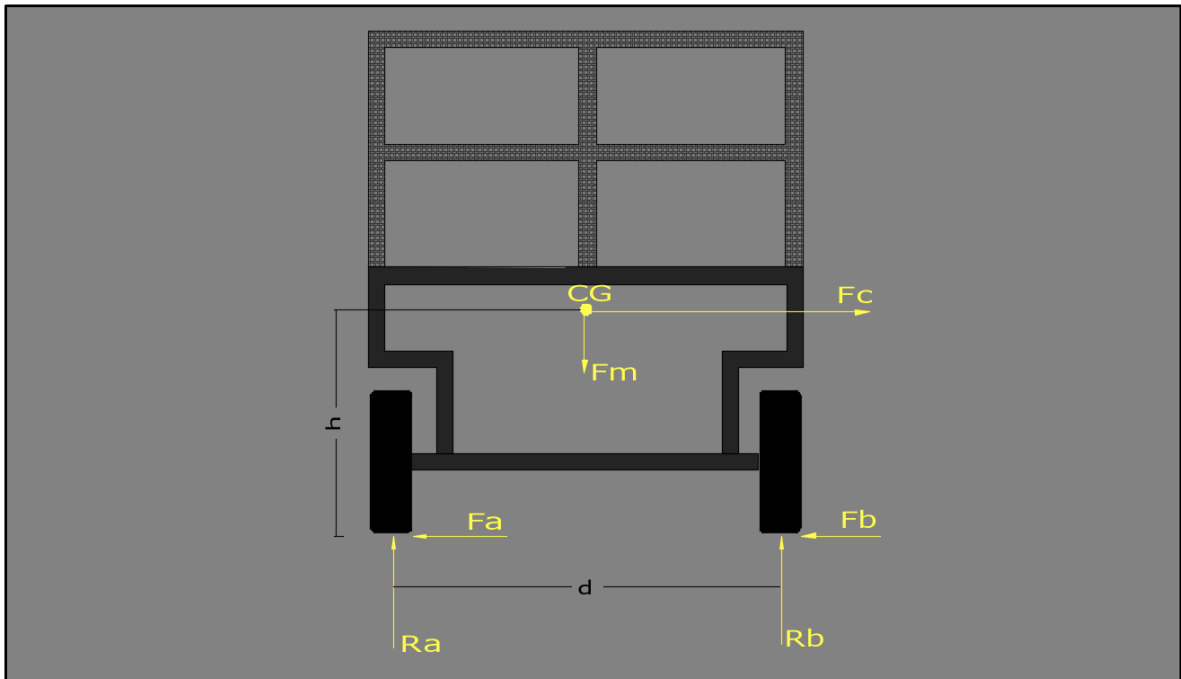
Andmed	Väärtus
Rööbe	1100 mm
Veoki mass	1500 kg
Maksimaalne mass koos lastiga	3000 kg
Maksimaalne kiirus	25 km/h
Pöörderaadius	3000 mm
Raskuskeskme kõrgus	otsitav

Allikas: autori koostatud

3.1 Ümberpaiskumine

Ümberpaiskumist kirjeldab olukord, mil sõiduk teeb vähemalt 90 kraadise pöörde ümber enda pikitelge. Seda mõjutavad mitmed tegurid, näiteks takistused rajal, tee pinnakatte tüüp, kaldenurk, rööped, äärekivi otsa sõitmine ning erinevad manööverdused, mil raskuskese veakil nihkub juhtivate külgrehvide kohal olevast tasakaalupunktist kaugemale. Esmatähtis on tagada rataste minimaalne libisemine ning sümmeetriline juhtimine paremale ja vasakule tehtavate pöörete korral [69]. [70]

3.1.1 Sõidukile kurvis mõjuvad jõud



Joonis 3.1 Autori koostatud joonis masinale mõjuvate jõududega

Kurvis mõjuvad sõidukile (joonis 3.1) tõstejõud (R_A , R_B), gravitatsioonijõud (F_m), külgiirendus (a_y), hõõrdejõud (F_A , F_B), tsentrifugaaljõud (F_c) ja rotatsioon ümber pikitelje ehk suunamuutus. Masin sooviks jätkata enda esialgset teekonda sirgjooneliselt, kuid on kurvi tõttu sunnitud suunda muutma, liikudes kurvis mööda selle ringjoonelist trajektoori – tekib külgiirendus. See tähendab, et veokile tekitatakse kurvist välja tõmbav jõud, milleks on tsentrifugaaljõud F_c . Seda kirjeldab valem 4.1 [71]:

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{R}, \quad (4.1)$$

kus F_c - tsentrifugaaljõud, N,
 m - veoki mass, kg,
 v - kiirus, m/s,
 R - kurvi raadius, m.

On teada, et kurvi raadius on $R = 3000$ mm, kuid teadmata reaalsel kiirust, mida võiks veok olla suuteline läbima, tuleb hinnata maksimaalsel kiirusel $v_{max} = 25$ km/h = 6,94 m/s poole suurema kurvi läbimist raadiusega $R = 6000$ mm. Mida suurem on veoki kiirus kurvis, seda laiemat raadiust see vajab ilma ümber kukkumata. Laiema kurvi puhul saab kasutada suuremat pöörderaadiust. Tsentrifugaaljõud nimetatud maksimaalse kiiruse

kriteeriumite alusel on $F_c = 12056$ N. Arvutatud tulemus oleks sel juhul maksimaalse tsentrifugaaljõu väärtus mistahes manöövri korral, mis tooks kaasa masina ümberpaiskumise. Koos täislastiga on tsentrifugaaljõud poole suurem.

Teades suurimat tsentrifugaaljõu väärtust kurvis, on järgmisena tarvis leida territooriumil oleva tee raadiusega sõiduki kiirus võrrandi 4.2 alusel:

$$v = \sqrt{\frac{F_c \cdot R}{m}}, \quad (4.2)$$

kus v - sõiduki kiirus, m/s,
 F_c - tsentrifugaaljõud, N,
 m - veoki mass, kg,
 R - kurvi raadius, m.

Tehes läbi arvutustehte, on teada, et veok massiga $m = 1500$ kg saavutab maksimaalse tsentrifugaaljõu $F_c = 12056$ N kurvis raadiusega $R = 3000$ mm kiirusel $v = 4,91$ m/s = 17,68 km/h. Antud kiirusel saavutab veok maksimaalse tsentrifugaaljõu, mis tähendab, et suuremal kiirusel algaks ümberpaiskumine. Saadud kiirus on maksimaalseks kiiruseks nii masina enda kui ka täis laetud massi puhul. Võttes arvesse kurvis rakenduvat tsentrifugaaljõudu, tuleb leida selle jõu tekitamiseks vajalik külgiirendus. Selle leidmiseks kasutatakse järgnevat võrrandit 4.3 [71]:

$$a_y = \frac{F_c}{m}, \quad (4.3)$$

kus a_y - külgiirendus, m/s²,
 F_c - tsentrifugaaljõud, N,
 m - veoki mass, kg.

Võrrandist saame külgiirenduse väärtuseks $a_y = 8,04$ m/s². See on väärtus, millele veok vastu suudab pidada enne kui see ümberpaiskuma hakkab.

3.1.2 Sõiduki ümberpaiskumine

Koormuse jaotusel on oluline mõju igale rehvide mõjuvatele piki- ja küljõududele. Sõiduki külgsuunalise liikumise küljele lisatud lisakoormus põhjustab rehvi piki- ja

külgsuunas suurenenud jõudu [72]. Eelnevalt uuritud kurvis rakenduvate jõudude tulemusi tuleb täpsemalt analüüsida ümberpaiskumise aspektist. Selleks tuleb arvesse võtta, et külgkiirenduse rakendumisel kandub raskus algpunktist ühele külgele. Ümberpaiskumine toimub, kui sisemistelt ratastelt on kogu raskus kandunud kurvi välistele ratastele. See tähendab, et sisemiste rataste puhul on raskus $R_i = 0$ ja välimistel langeb kogu sõiduki mass ning gravitatsioonijõud, st $R_o = m \cdot g$ [73].

Esimesena tuleks ümberpaiskumise punktile leida minimaalne külgkiirenduse väärtus (võrrand 4.4), mille korral veok alustab ümberpaiskumist [74]:

$$a_y > \frac{d}{2 \cdot h} \cdot g, \quad (4.4)$$

kus a_y - külgkiirendus, m/s^2 ,
 h - raskuskeskme kõrgus, m,
 g - raskuskiirendus, m/s^2 ,
 d - rööbe, m.

Lähtesõidukile leitakse staatilise stabiilsus faktori võrrandist hinnatav raskuskeskme kõrgus, mis on leitav võrrandi 4.5 [74] alusel. Saadud kõrgus kehtib olukorras, mil masin on vaid enda täismassiga.

$$h = \frac{d \cdot g}{2 \cdot a_y}, \quad (4.5)$$

kus h - raskuskeskme kõrgus, m,
 a_y - külgkiirendus, m/s^2 ,
 g - raskuskiirendus, m/s^2 ,
 d - rööbe, m.

Teades juba varasemalt määratud külgkiirendust $a_y = 8,04 \text{ m/s}^2 = 0,82 \cdot g$, tuleb soovitava raskuskeskme kõrguseks $h = 0,67 \text{ m}$. Lisaks leitud väärtustele iseloomustab rullumist maksimaalne kaldenurk (võrrand 4.6 [74]), mille korral veok ümber läheb.

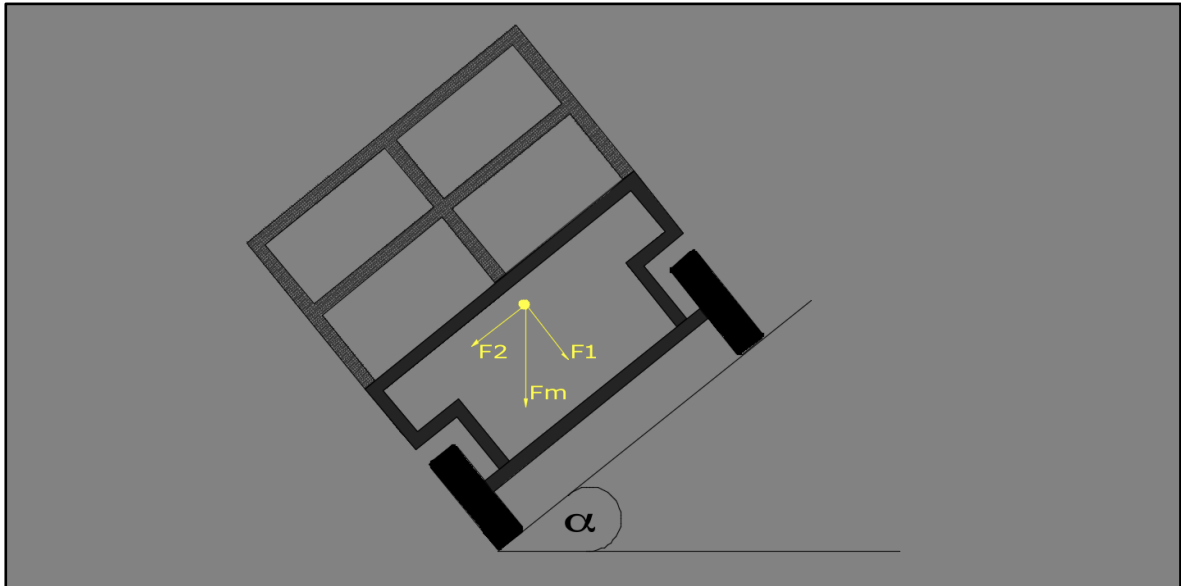
$$\tan^{-1} \alpha = \frac{a_y}{g}, \quad (4.6)$$

kus a_y - külgkiirendus, m/s^2 ,

g - raskuskiirendus, m/s^2 ,

α - rullumisnurk, $^\circ$.

Võrrandisse arvude lisamise tulemusel on näha, et ümberpaiskumiseks on tarvis kaldenurka väärtuses $\alpha = 39,29^\circ$. Lennujaama territooriumi puhul on tegu tasase pinnaga, millel võib eksisteerida minimaalsel määral kaldeid, kui need ei ületa leitud kaldenurka (joonis 3.2). Kaldenurga hindamisel ei arvestata libisemiseks vajalikku kallaku nurka, vaid soovitakse leida kohe nurk, mille põhjal veok pikali kukub.



Joonis 3.2 Autori koostatud joonis kallutamisel mõjuvate jõudude kohta

Lisaks gravitatsioonijõule F_m mõjuvad kallakul veel kaks jõudu (joonis 3.2). Nendeks on raskuskeset CG vertikaalselt tiriv jõud F_1 ja CG horisontaalselt tiriv jõud F_2 . Vastavalt kaldenurga suurusele on nimetatud jõudude mõju sõidukile erinev. F_2 puhul on tegu keskpunktist mõjuva jõuga, mis soovib masinat külili tõmmata. Püstises asendis on sel jõul seda raske teha, kuna F_1 pakub suuremat mõju veokile, ent lisades kalde, ei ole enam tarvis nii tugevat jõudu sõiduki ümber käimiseks. See tähendab, et F_1 hakkab kaldenurga suurenemisel vähenema ja F_2 suurenema.

Lisaks kaldenurgale ja külgiirendusele tuleb analüüsida raskuskeskmest tulenevat võimalust ümberpaiskumiseks. Stabiliseeriva ja ümberpaiskuva momendi omavaheline seos muutub seoses raskuskeskme muutumisega. Raskuskese võib muutuda kõrgemaks, madalamaks ja erinevatele külgedele sõltuvalt laadimisest. Selle hindamiseks kasutatakse nimetatud momente võrdsustavat valemit (valem 4.7). Valemi [75] vasakpoolne osa kirjeldab ümberpaiskumist ja parempoolne sellele vastu töötavat külgi jõudu proovides stabiliseerida sõidukit.

$$\frac{m \cdot v_{roll}^2}{R} \cdot h = m \cdot g \cdot \frac{d}{2}, \quad (4.7)$$

- kus m - veoki mass, kg,
 h - raskuskeskme kõrgus, m,
 R - kurvi raadius, m,
 g - raskuskiirendus, m/s²,
 d - rööbe, m,
 v_{roll} - rullumiseks vajalik kiirus, m/s.

Eelnevalt leitud raskuskese võib muutuda, kuid ideaalis võiks see olla alati masina keskpunktis või selle läheduses. Valemist 4.7 tuletatud ümberpaiskumiseks vajalikku kiirust hinnatakse seoses raskuskeskme kõrguse muutmisega valemi 4.8 alusel:

$$v_{roll} = \sqrt{\frac{d \cdot g \cdot R}{2 \cdot h}}, \quad (4.8)$$

- kus v_{roll} - rullumiseks vajalik kiirus, m/s,
 d - rööbe, m,
 g - raskuskiirendus, m/s²,
 R - kurvi raadius, m,
 h - raskuskeskme kõrgus, m.

Antud tulemusega soovitakse teada erinevaid võimalikke kiiruseid, millega võib masin külili käia kurvis raadiusega 3000 mm. Selleks teostas autor arvutuskäigud raskuskeskmete kõrgustega vahemikus 150-850 mm. Antud vahemik on valitud lähtuvalt soovitud raskuskeskme kõrgusest. Valemis kasutatavaks rööpmeks on $d=1100$ mm ja kurvi raadius $R=3000$ mm. Saadakse tulemused, mis on tehtud arvestusega, et Tallinna Lennujaama territooriumi puhul on tegu tasase pinnaga, kuid samuti võib tulla ette minimaalsel määral kallakuid. Seega tuleb teha arvutused eeldusel, et tasapinnal on kalle. Eelduseks võetakse, et kallaku suurus on 10°. Ümberpaiskumiseks vajalikud tingimused kallakuga teel leitakse järgneva võrrandi 4.8 alusel [75]. Mõlemal tingimusel läbi viidud arvutuste tulemused on koondatud tabelisse 3.2.

$$v_{roll} = \sqrt{g \cdot R \cdot \left(\frac{h \cdot \tan \beta + \frac{d}{2}}{h - \frac{d}{2} \tan \beta} \right)}, \quad (4.9)$$

- kus v_{roll} - rullumiseks vajalik kiirus, m/s,
 g - raskuskiirendus, m/s²,
 R - kurvi raadius, m,
 h - raskuskeskme kõrgus, m,
 β - teepinna kaldenurk, °,
 d - rööbe, m.

Tabel 3.2 Ümberpaiskumiseks vajaminev kiirus sõltuvalt raskuskeskme kõrgusest

Jrk nr	Raskuskeskme kõrgus (mm)	Ümberpaiskumiseks minev kiirus (km/h) tasane pind	Ümberpaiskumiseks minev kiirus (km/h) kallak
1	150	45,80	18,46
2	200	37,40	16,97
3	250	32,39	15,62
4	300	28,97	14,37
5	350	24,48	13,21
6	400	22,90	12,10
7	450	21,59	11,05
8	500	20,48	10,03
9	550	19,53	9,02
10	600	18,70	8,01
11	650	17,96	6,98
12	670	17,69	6,55
13	700	17,31	5,89
14	750	16,72	4,69
15	770	16,51	4,15
16	800	16,19	3,21
17	850	14,48	-

Allikas: autori koostatud

Saadud tulemuste põhjal selgub, et masin on ohutu, kui selle raskuskese jääb külgiirendusega alla 700 mm kiirusel $v = 4,91$ m/s = 17,69 km/h tasasel pinnal. See tähendab, et varasemalt leitud raskuskeskme kõrgus 670 mm vastab autori ootustele. 10° kallakul, aga alla 200 mm, kuid nii madalat raskuskesket pole võimalik saavutada, mis tõttu tuleks rullumise vältimiseks hoida kallaku puhul kiirus alla 6,55 km/h.

Tehes läbi samad arvutused masina raskuskeskme kõrguse leidmiseks maksimaalse veetava pagasi massiga, saame tulemusteks $h = 770$ mm ja nurk, mille korral veokummuli käib, on $\alpha = 35,54^\circ$. On näha raskuskeskme asukoha muutust kõrgemale 100 mm võrra. Joonisel 4.4 kujutatud raskuskeskme asukoht $h = 670$ m nihkub raami

alumise osast raami kõrgusele. Antud raskuskeskme asukoha tingimus on täidetud, kui raskemad pagasid on laetud alla ning kergemad peale. Vastasel juhul tõuseks raskuskeskme asukoht kõrgemale ja ümber paiskumiseks vajaminev kiirus väheneb, muutes veoki kontseptsiooni ebastabiilsemaks. Teades, et raskuskeskme asukoht on nihkunud kõrgemale, kui algselt soovitud raskuskeskme asukoht, siis tulemuste põhjal on näha võttes arvesse külgiirendust $a_y = 7,01 \text{ m/s}^2 = 0,71 \cdot g$ ja raskuskeskme uut punkti $h = 770 \text{ mm}$ alustab veok ümber paiskumist kiirusel $v = 16,51 \text{ km/h}$ tasase pinna korral. Kallakuga pinnal peab kiirus jääma alla $v = 4,15 \text{ km/h}$.

3.2 Libisemine

Eespool hinnatud ümberpaiskumise tingimused on need, mida tuleks vältida, sest masin ei tule sellest ise välja. Lisaks ümberpaiskumisele võib kurvis tekkida rataste libisemine. Libisemine tekib juhul, kui tsentrifugaaljõud F_c ületab hõõrdejõudu. Joonisel 4.4 on kujutatud hõõrdejõud tähistusega F_A ja F_B . Leidmaks kiirust, millest alates hakkaks masin libisema, arvestatakse tsentrifugaaljõu võrdsust hõõrdejõuga (valem 4.10) [76].

$$\frac{m \cdot v_{\text{libisemine}}^2}{R} = F_A + F_B, \quad (4.10)$$

kus m - sõiduki mass, kg,
 R - kurvi raadius, m,
 F_A - sisemiste rataste hõõrdejõud, N,
 F_B - välimiste rataste hõõrdejõud, N,
 $v_{\text{libisemine}}$ - libisemiseks vajalik kiirus, m/s².

Antud valemis on hõõrdejõudude summa avaldatav valemiga 4.11:

$$F_A + F_B = \mu \cdot R_A + \mu \cdot R_B = \mu \cdot m \cdot g, \quad (4.11)$$

kus R_A - sisemiste rataste reaktsioonijõud, N,
 R_B - välimiste rataste reaktsioonijõud, N,
 μ - hõõrdetegur,
 m - sõiduki mass, kg,
 g - raskuskiirendus, m/s².

Sisemiste ja välimiste rataste hõõrdejõudude summa arvutamisel tuleb arvestada hõõrdeteguriga, mis kuiva asfaldi puhul on $\mu = 0,8$ [76], ja rataste reaktsioonijõududega R_A, R_B (joonis 4.4). Asendades hõõrdejõu summa valemi esialgsesse valemisse, on võimalik leida libisema hakkamise kiirus järgneva valemiga (valem 4.12):

$$v_{libisemine} = \sqrt{\mu \cdot g \cdot R}, \quad (4.12)$$

kus $v_{libisemine}$ - libisemiseks vajalik kiirus, m/s,

μ - hõõrdetegur,

g - raskuskiirendus, m/s²,

R - kurvi raadius, m.

Teades kõiki muutujaid, saadakse tulemuseks, et rataste puhul toimuks libisemine kiirusel $v_{libisemine} = 4,85$ m/s = 17,47 km/h. Kõige esimesena leitud kiirus, mis masinale mõjub maksimaalse tsentrifugaaljõu korral, on $v = 4,91$ m/s = 17,68 km/h. See tõestab, et masin ei kukuks esimesena pikali, vaid enne kriitilist überpaiskumist toimub libisemine. Libisemine enne überpaiskumist on tagatud kui raskuskese jääb alla 700 mm.

Samuti viiakse läbi arvutuskäik kallakul 10°. Libisemiseks vajaliku kiiruse leidmiseks nimetatud kallakul leitakse valemi 4.13 abil [73].

$$v_{libisemine} = \sqrt{g \cdot R \cdot \left(\frac{\mu + \tan \alpha}{1 - (\mu \cdot \tan \alpha)} \right)}, \quad (4.13)$$

kus g - raskuskiirendus, m/s²,

μ - hõõrdetegur,

R - kurvi raadius, m,

α - kaldenurk, °,

d - rööbe, m.

10° kallakul hakkab veok libisema kiirusel $v_{libisemine} = 3,39$ m/s = 12,20 km/h, kui eelnevalt leitud tingimustel toimus überpaiskumine kiirusel Velleman $v = 17,68$ km/h. Mis tõestab, et veok hakkab enne libisema kui über paiskub. Kui eelpool saadud tulemused olid leitud tühja veoki põhjal, siis täis laetud masinal on tasase pinna korral

libisemise kiiruseks $v_{\text{libisemine}} = 10,22$ km/h ja kallakul kiirusel korral $v_{\text{libisemine}} = 2,17$ km/h.

3.3 Hinnang sõiduki dünaamikale

Sõiduki dünaamika analüüsi käigus teostatud arvutused tasasel ja kaldega pinnal andsid ülevaate sõiduki libisemise ja rullumise kohta. Tulemustest selgus järgnev:

- masin opereerib vaid enda massiga
 - raskuskeskme kõrgus 670 mm,
 - rullumiseks vajalik $39,29^\circ$ kaldenurk,
 - rullumiseks on vajalik 0,82·g külgiirendus,
 - tasasel pinnal hakkab masin libisema kiirusel 17,47 km/h ja kaldega pinnal kiirusel 12,20 km/h,
 - tasasel pinnal peab pöörde sooritamisel jääma masina kiirus alla 17,69 km/h ja kaldega pinnal liikumiseks peab kiirus jääma alla 6,55 km/h;
- masin opereerib täismassiga
 - raskuskeskme kõrgus 770 mm,
 - rullumiseks on vajalik $35,54^\circ$ kaldenurk,
 - rullumiseks on vajalik 0,71·g külgiirendus,
 - tasasel pinnal alustab sõiduk libisemist kiirusel 10,22 km/h ja kaldega pinnal 2,17 km/h,
 - tasasel pinnal peab kiirus jääma alla 16,51 km/h, et vältida ümberpaiskumist, ja kaldega pinnal alla 4,15 km/h.

Tulemuste põhjal hinnatakse sõiduk piisavalt stabiilseks, kui selle raskuskeskme kõrgus suudetakse hoida alla 670 mm ja lasti vedamisel alla 770 mm. Raskuskeskme kõrguse määramisel on tähtis silmas pidada pagasite laadimise järjekorda: raskemad pagasid laadida allapoole ja kergemad nende peale. Suutes tagada raskuskeskme nimetatud kõrgustel, siis toimub rataste libisemine enne rullumist.

4 TASUVUSANALÜÜS

Teises peatükis valitud komponendid ja määratud tingimuste kontroll ei ole piisav mõistmaks kontseptsiooni vajalikkust. Selleks oleks vaja läbi viia SWOT- (tabel 4.1) ja tasuvusanalüüs. Tasuvusanalüüs annab informatsiooni, millal projekt tasub end ära. Arvutuste läbiviimiseks antakse valitud toodetele hinnad, et saada teada uue kontseptsiooni ligikaudne maksumus ja võrreldes saadud tulemust hetkel kasutuses oleva lahendusega.

Tabel 4.1 SWOT-analüüs

Tugevused	Nõrkused
<ul style="list-style-type: none"> • Kaasaegne tehnoloogia • Lühem tarneahela ooteaeg (klient saab varem pagasi kätte) • Mahub opereerima kitsastes tingimustes • Pagasi transport ei sõltu töötajate vabast ajast ja võimalusest • Elektriline – ei saasta keskkonda • Vaikne – ei tekita lisa müra • Laadimisjaamad juba olemas • Kerge kasutamine – paari klikiga võimalik veok teele saata 	<ul style="list-style-type: none"> • Soetusmaksumuse kulukus • Programmeerimise keerukus • Kontseptsiooni analüüs ja katsete läbiviimine võtab võtab aega
Võimalused	Ohud
<ul style="list-style-type: none"> • "Õpetada" masin sõitma mööda perimeetri äärt, et tuua posti ja kaupa • Lisada automaatne sildilugeja, mis saab vajadusel printida kärul olnud ühikute info 	<ul style="list-style-type: none"> • Lennundus ei taastu niipea tavapärasele tasemele • Turu avamine teistele teenusepakkujatele • Töötajate arvu vähendamine ettevõttes, kui neile pole võimalik uusi tööülesandeid jagada

Allikas: autori koostatud

Käesolevas peatükis hinnatakse projekti klassikaliste tasuvusanalüüsi meetoditega. Need meetodid põhinevad diskonteeritud rahavoogudel, mis seisneb kõikide rahavoogude diskonteerimist ühte ja samasse perioodi ehk tänasesse päeva, kuna hilisemaid tulusid-kulusid mõjutab inflatsioon ning siis poleks võimalik neid omavahel võrrelda. Selleks on võimalus kasutada järgnevaid meetodeid:

- nüüdispuhasväärtus (ing. k. *net present value method*, NPV),
- sisemine tulumäär (ing. k. *internal rate of return*, IRR),
- tasuvusaeg (ing. k. *payback period*, PP). [77]

NPV puhul on tegu kõige kasutatavama valemiga (valem 5.1), kuna see arvestab raha ajaväärtust diskonteeritud rahavoogude abil. Selleks on vaja kindlaks teha kõik sissetulevad ja väljuvad rahavood, mis antud projektiga kaasnevad. Rahavood võivad olla oodatavad rahavood, nagu dividendid, intressimaksed, või muud mitterahalised kirjed, nagu põhivara kulum, edasilükatud maksud. Koondades tulemused ühte tabelisse ja arvutades nüüdispuhasväärtuse võib tulemuseks olla üks järgnevast stsenaariumist:

- NPV > 0 – projekti võib vastu võtta;
- NPV < 0 – projekt tagasilükata;
- NPV = 0 – projektiga puudub tulu. [77]

$$NPV = -C_0 + \frac{C_n}{(1+r)^n}, \quad (5.1)$$

kus C_0 - alginvesteering,
 C_n - sissetulevate rahavoogude summa n. aastal,
 r - diskontomäär,
 n - perioodide arv.

Lisaks projekti nüüdispuhasväärtuse hindamisele, vaadeldakse ka selle sisemist tulumäära, mis näitab investeeritud raha tootlust. IRR-i arvutamisel (valem 5.2) esitatakse projekti eeldatavad rahavood ja NPV võrdsustatakse nulliga ehk algse perioodi esialgne investeering võrdub selle investeeringu tulevaste rahavoogude nüüdisväärtusega. Kui saadud sisemine intressimäär on madalam kui oodatav tootlus, lükatakse see tagasi. Lisaks finantsilistele hinnangutele, hinnates projekti tasuvust ajas. Tasuvusaeg on aeg, mil projekti panustatud investeering tasub end ära. Selle leidmiseks liidetakse kõik sissetulevad rahavood iga aasta lõpus kokku ja võrreldakse iga aasta lõpus saadud kumulatiivseid tulemusi projekti elluviimiseks kulutatud summaga. [77]

$$C_0 + \frac{CF_1}{(1+IRR)} + \frac{CF_2}{(1+IRR)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+IRR)^n} = 0, \quad (5.2)$$

kus C_0 - alginvesteering,
 CF_n - sissetulev rahavoog n. aastal,
 n - perioodide arv,
 IRR - sisemine tulumäär, %.

Nüüdisväärtuse ja sisemine tulumäära leidmiseks tuleb kaardistada hetkel kasutuses oleva süsteemile kuluvad rahavood ning uue projekti omad. Rahavoogude kirja

panemise alusel saab leida tasuvusaja. Tallinna Lennujaama territooriumil kasutusel olev STILL R07-25 maksab 13. mai 2021 seisuga järelturul kuni 11 900 € [25]. Kõrgema müügihinnaga elektrilised veokid on väljalaske aastaga 2011-2013. Lisaks masinale on tarvis lisada sellele üks pagasikäru, et veetavad mahtude alusel oleksid erinevad lahendused võrreldavad. Ühe käru maksumus ~1000 €. Kui täna peaks loobuma hetkel kasutusel olevast süsteemist ühe kombinatsiooni võrra, mis on STILL veok ja üks käru, oleks võimalik ettevõttel võimalik müüa tooted kokku turuhinnaga 13 000 €.

Uue masina kontseptsiooni tarbeks on vaja arvestada mootori, aku, rehvide, vedrustuse, jõuülekanne, raami, vilkuri, helkurite maksumusega. Maksumused on välja toodud järgnevalt:

- Nissan Leaf 40 kWh aku maksumus vahemikus 5500-6300 €,
- SUMO MD HV1500-3P mootor-inverter ~7000 €,
- 6,6 kW Nissani pardalaadija ~950 €,
- Continental Conrad HT rehvid 4,00-8 330 €/rehv,
- Helleman HAA40A vilkur 12 €,
- Delphi DC/DC konverter 1200 €,
- jõuülekanne ~300 €,
- topelt õõtshoova vedrustus 100 €/tk.

Sõidukis kasutatav raam ei ole standard ja ühes valmistükis ostetav, tuleb viia läbi arvutused teada saamaks palju läheks valitud materjalidega raam maksma. Teises peatükis, kus autor viib läbi arvutused kogu kuluva materjali teada saamiseks. Vajamineva 29,248 m terasest nelikanttorude suurusega 50x50x4 mm soetamiseks on tarvis arvestada 506,5 € [67]. Põhja tarbeks lisatavad alumiiniumlehed lähevad maksma 222 € [67]. Külgedele ja alumise raamiosa peamiseks kattedeks lisatav süsinikkiuga tugevdatud polümeer maksab 42-100 €/kg kohta. Töö autor võtab hindamiseks keskmise hinna, milleks oleks 71 €/kg kohta. See tähendab, et süsinikkiuga tugevdatud polümeeri maksumus on 4423 €. Lisaks nimetatud elementidele on autonoomsele sõidukile tarvis helkurribasid, polte, mutreid, muid kinnitusi hinnangulise kuluna ~200 € väärtuses. Samuti tuleks lisada kaamerad väärtuses 100 €/tk ja LIDAR 15 000 €. Lisaks materiaalsetele kulutustele tuleb arvesse võtta programmeerimisega seonduvad kulud, hinnanguliselt jääb programmeerija kuutasu 2500 € kanti. Uue töökindla ja usaldusväärse kontseptsiooni elluviimine programmeerimise abil võib võtta aega paar kuud, mis tõttu tuleb arvestada 5000 € kuluga. Sellest tulenevalt saadakse kontseptsiooni ligikaudne maksumus võiks jääda 45 000 € kanti. Uue kontseptsiooni ja vana süsteemi hindamisel ei võeta arvesse hoolduskulusid, sest ettevõttes on olemas

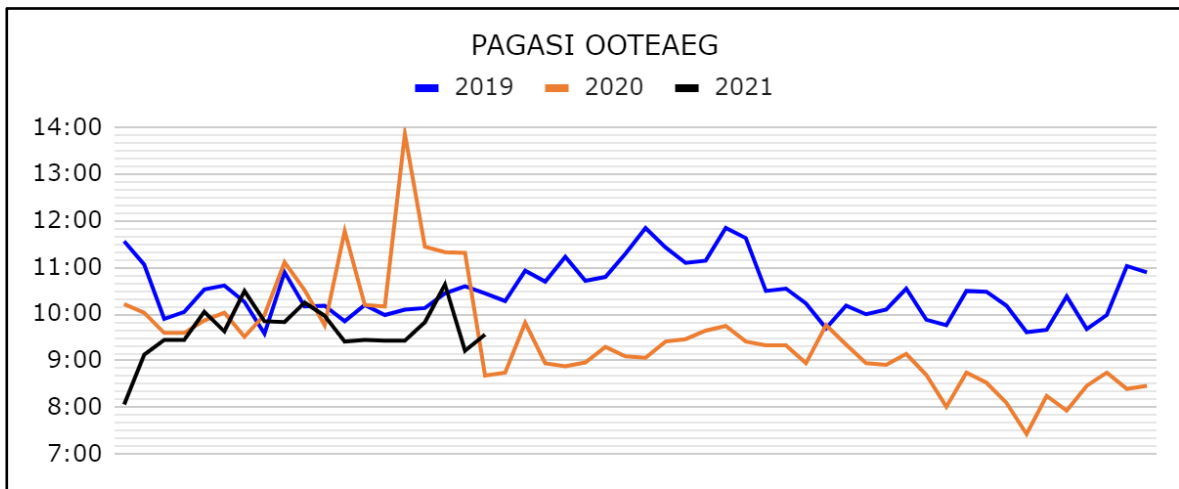
personal, kes tegeleb masinate hooldamisega, ega ei arvestata elektrile minevaid rahavoogusid. STILL R07-25 ja autonoomse pagasiveoki rahavood on koondatud tabelisse 4.2.

Tabel 4.2 Rahavoogude tabel

Rahavood	0	1	2	3	4	5
Kulude kokkuhoid		18000	18000	18000	18000	18000
Investeering uude seadmesse	-45000					
Vana masina müük (STILL R07-25)	13000					
Rahavood kokku	-32000	18000	18000	18000	18000	18000
Kumulatiivne rahavoog (sisse)		18000	36000	54000	72000	90000
Nõutav tulunorm	20%					
NPV	21831	€				
IRR	48%					
Tasuvusaeg (STILL müüakse)	1,5	aastat				
Tasuvusaeg (STILL ei müüda)	2,67	aastat				

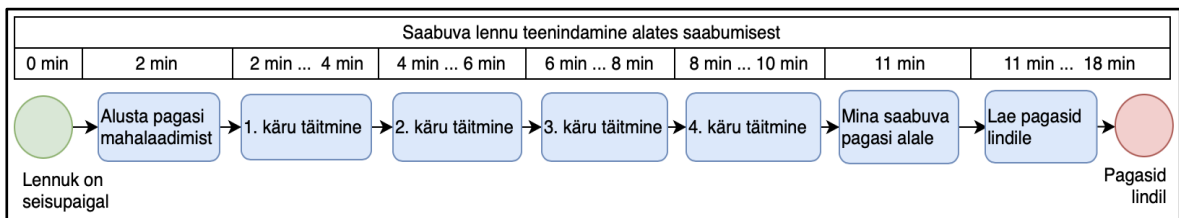
Allikas: autori koostatud

Tulemuste (tabel 4.2) põhjal on näha, et NPV on projekti puhul positiivne, mis tähendab, et nüüdispuhasväärtuse alusel võiks vana seadme välja vahetada uue vastu. Seda kinnitab ka sisemine tulumäär. Projekt tasuks vana seadme mahamüümisel ja uue soetamisel ära juba 1,5 aastaga. Kui STILL R07-25 maha ei müüa, tasuks investeering end ära enne kolmanda aasta täitumist ehk 2,67 aastaga. Lisaks rahalisele mõõtele, on kõige suurem kasum mehitamata pagasiveoki kasutusele võtmise, l ajalisel aspektil. Kõige suurem ajaline võit tuleb saabuvate lendude pagasi äraveol lindile. Lennujaamade vaheline tihe konkurents reisijate kogemuse parendamiseks nõuab kvaliteetsemaid teenuseid. Reisijate teeninduskvaliteeti saab tõsta näiteks lühema jalutuskäigu teel lendude väravast pagasikarussellini või lühendades pagasi ooteaegu [78].



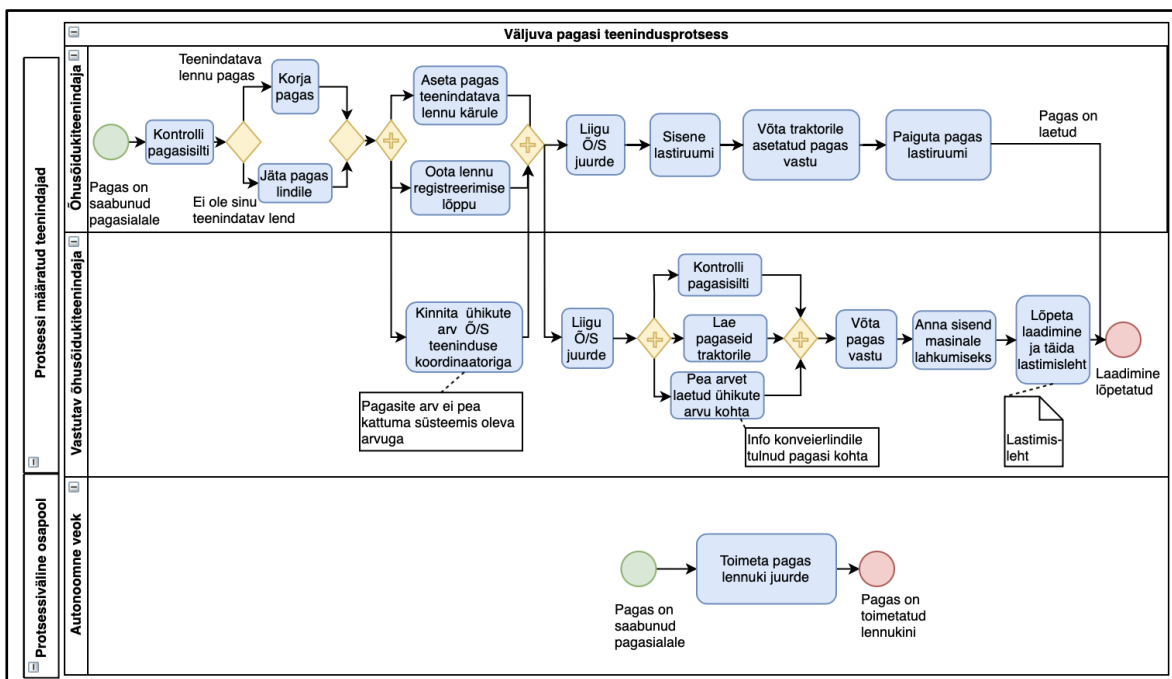
Joonis 4.1 Autori koostatud joonis pagasi ooteaegade kohta alates aastast 2019

Sissetuleva pagasi käitlemise protsess algab kohe, kui saabuv lend jõuab seisuplatsile. Võttes vaatluse alla pagasi ooteajad (joonis 4.1) alates 2019. aastast, on näha, et 2019. aasta keskmine ooteaeg oli 10:29, 2020. aastal 09:29 ja käesoleval aastal 09:38 (L2.2). Hetkel kulub saabuva lennu pagasite maha laadimiseks ja reisijale pagasi kättesaamiseks 9-10 minutit, sest lastiruumid peavad olema tühjad enne pagasi ära viimist. Mahalaadimine võtab tellimislennu puhul aega keskmiselt 8 minutit. See tähendab, et praeguse süsteemiga saab alustada pagasite transporti terminali suunas alles peale viimase kÄru täitmist. Olenevalt pagasite rohkusest toimub see ühendkümnendal minutil pärast saabumist. TO-BE protsessi rakendamisel väheneb saabuva lennu pagasite mahalaadimiseks kuluv aeg: iga autonoomne kÄru alustab teekonda peale selle täitmist. Esimene kÄru neljanda minuti, teine kuuenda, kolmas kaheksanda, neljas kümnenda minuti lõpus peale õhusõiduki saabumist (joonis 4.2). Pagasialal saabuva lennu pagasid vastuvõttev õhusõidukiteenindaja saab alustada pagasite paigutamist konveierlindile varem muutes protsessi sujuvamaks. Esimesed reisijad saaksid enda pagasi kätte kaks-kolm minutit varem, lühendades üldist reisijate üldist pagasite ooteaega. Väikese lennujaama puhul on ajaline võit märkimisväärne, lisaks reisijakogemuse parendamisele.



Joonis 4.2 Autori koostatud saabuva lennu mahalaadimiseks ja reisijatele pagasite toimetamiseks kuluv aeg

Ehkki väljuva lennu teenindamisel ei tule märgatavat ajalist võitu, on selle võit seotud tööprotsesside sujuvamaks ja efektiivsemaks muutmisega. Kui hetkel väljuva lennu pagasiteenindus protsessis osaleb 3 kuni 4 spetsialisti ja pagasite puudujäägi (L2.1) toob isik, kes pole planeeritud antud lennu laadimisel osalema, saab uue süsteemiga puudujäägi kohale toimetada autonoomne veok: väljuva lennu teenindusprotsess piirdub lennule määratud töötajatega (joonis 4.3). Sel ajal saab õhusõidukiteeninduse spetsialist pagasite transpordi asemel tegeleda teiste tööülesannetega.



Joonis 4.3 Autori koostatud väljuva lennu teenindusprotsessi TO-BE mudel

Peale protsessi analüüsimist leiti, et kõige enam saadav kasu seisneb ressursside efektiivses kasutamises, kui lennu teenindamisele mittemääratud töötaja eemaldatakse protsessist. See annab võimaluse rakendada töötajat teistel tööülesannetel, näiteks vee- või tualetiteenuse pakkumine, pukseerimised, saatmisteenus. Saadud tulemustest lähtuvalt võib öelda, et uue kontseptsiooni kasutuselevõtt tasub end ära nii finantsiliselt kui ka ajalise võidu aspektist lähtuvalt. Lisaks aitab see lihtsustada töötajate tööd, mis tähendab, et protsessis ei pea enam osalema protsessiväline töötaja, keda on võimalik rakendada teiste tööülesannete täitmiseks vastavalt vajadusele.

KOKKUVÕTE

Automatiseeritud lennujaamad on tuleviku suundumuse lahutamatu osa. Praegu on suurem osa selles valdkonnas tehtud uuringutest suunatud nutikate lahenduste pakkumisele, et parandada reisijate kogemusi ning hõlbustada lennujaama igapäevaseid toiminguid. Sellised lahendused muudavad revolutsiooniliselt lennujaamasid, parandades õhusõiduki pagasi pealelaadimist, mahalaadimist ja nende käitlemise tõhusust. Kuna hetkel loodud kõrge automatiseeritusega pagasi transpordi lahendused ei vasta Tallinna Lennujaama maapealse teeninduse ootustele, oli käesoleva magistr töö eesmärgiks luua kontseptsioon, mis rahuldaks oodatavaid vajadusi.

Saamaks aru võimalikest piirangutest ja ootustest autonoomse veoki kontseptsioonile, viidi läbi kaks ekspertintervjuud, vaatlus ja tehti dokumendianalüüs. Ühe meetodina läbiviidud vaatluse käigus koguti andmeid AS-IS protsessi kaardistamiseks ja ajalise mõõtme saamiseks. Intervjuudest kogutud teabe ja dokumendianalüüsi käigus saadud piirangute informatsiooni järel alustati sobivate komponentide valimist. Töö käigus osutusid valituks SUMO HV1500-3P mootor-inverter CO150 süsteem, Nissan Leaf 40 kWh akupakk, Delphi DC/DC konverter, Nissan 6,6 kW pardalaadija, Continental HT 4,00-8 pneumorehvid, topelt õõtshoova vedrustus igale rattale, jõuülekanne ja raami materjalid, nagu terase nelikanttorudest alumine osa, alumiiniumlehtedest valmistatud katted ja ülemise osa tarbeks süsinikkiuga tugevdatud polümeertorud. Jõuülekandeks valiti fikseeritud käigukast-diferentsiaali jõuülekanne, mis paigutatakse sõiduki tagumisse ossa paremaks koha pealt minema saamiseks ja seeläbi on ka tagatud parem juhitavus esirataste poolt. Põgusalt anti ülevaade sobivatest valgustusseadmetest, nagu viikur ja LED-tuled. Komponentide valikule järgnes sõiduki dünaamika analüüs, et hinnata selle stabiilsust ja võimet ohutuks opereerimiseks.

Analüüsi sooritamiseks paigutati eelpool nimetatud osad masinasse. Nende paigutamisel lähtuti põhimõttest, et raskemad asjad on jaotatud telgede vahel võrdselt. Osade asetamise järel sooritatud dünaamika analüüs tõestas, et valitud paigutus toob raskuskeskme, mis on esiteljest 1333 mm kaugusel, masina keskele. Selle kõrgus on tühimassi $h = 670$ mm ja täislaetuna tõuseb see $h = 770$ mm peale. Lisaks raskuskeskme leidmisele teostas autor sõiduki ümberpaiskumise-, maksimaalse kaldenurga- ja libisemisanalüüsi. Arvutused tehti nii tasase kui ka kallakuga pinna kohta. Loodava kontseptsiooni tühimassil oleks tasasel pinnal ümberpaiskumiseks tarvis $\alpha = 39,29^\circ$ kallakut ja täislaetuna peaks selleks nurgaks olema $\alpha = 35,54^\circ$, ent selliste kallakutega ei puutu autonoomne sõiduk lennujaama territooriumil kokku. Tulemuste põhjal leiti, et

vedades maksimaalse võimaliku massi väärtuses pagaseid toimuks ümberpaiskumine kiirusel $v = 10,22$ km/h ja kallakul $v_{libisemine} = 2,17$ km/h, kui masina enda kaaluga oleks tasasel pinnal ümberpaiskumine kiirusel $v = 16,51$ km/h. Kallaku puhul kiirusel $v_{libisemine} = 4,15$ km/h. Samuti hinnates ümberpaiskumise ja libisemise kiiruseid saadi tulemusteks, et libisemine toimub nii tasase pinna kui ka kallaku puhul enne ümberpaiskumist, näidates planeeritud komponentide paigutuse sobilikkust.

Lisaks kontseptsiooni töövõime hindamisele, viis autor läbi tasuvusanalüüsi, mille põhjal hinnati projekti finantsilist tasuvust ja aega, mil alginvesteering end ära tasub. Tasuvusanalüüsil saadud NPV > 0 ja kõrge sisemine tulumäär on indikatsiooniks, et tasub panustada autonoomse veoki kasutusele võtmisele. Investeeringu tootlus ettevõttele on hea, tasudes end ära 1,50 aasta jooksul, kui STILL R07-25 soovitakse müüa maha. Kui pole soovi pagasiveokit müüma hakata, tasub projekt end ära 2,67 aasta pärast. Lisaks tööülesannete lihtsustamisele väljuva lennuteenindamisel, kus ei peaks protsessis osalema protsessiväline töötaja, tõstab uue kontseptsiooni kasutuselevõtt reisikogemust paremuse suunas ja vähendab saabuva pagasi ooteaega.

Kokkuvõtteks võib öelda, et magistritöö eesmärk sai täidetud. Samuti saadi töö käigus vastused püstitatud uurimisküsimustele territooriumil liiklemise piirangute, kontseptsiooni töökindluse ja tasuvusanalüüsi kohta. Kuid võttes arvesse lõputöö mahtu, ei olnud võimalik valida programmeerimiskeele valikuid ja minna komponentide valikul detailsemaks, et kontseptsiooni oleks ehitusvalmis. Samuti lõputöö raames vaatluse all olev maksimaalse lastikoguse $m = 1500$ kg laadimine kärule on väga ebatõenäoline ning sellest aspektist tulenevalt võib tulevikuvaates viia läbi analüüs keskmise pagasikaaluga korrigeerimaks reaalseid kiiruseid kurvides ja kallakutel. Töö edasiarendamiseks oleks tarvis programmeerimine, detailide valik ja potentsiaalne kandevõime korrigeerimine võtta päevakorda.

SUMMARY

Automated airports are an important component of the future trend. Today, the majority of research in this field has been created to give smart solutions to improve the passenger experience and to improve the airports' day-to-day operations. Airports will be transformed as a result of solutions, which will enhance the loading, unloading, and management of baggage. So far, the most technologically advanced baggage transportation systems do not fulfill the expectations of Tallinn Airport ground handling, which laid the ground for this Master's thesis to develop a concept that would satisfy the projected requirement and cost-effectiveness of the assessment project.

In order to understand the possible limitations and expectations for the concept of an autonomous truck, two expert interviews were conducted, an observation was made and document analysis was performed. Based on the data obtained, the selection of components was started. During the work, the author chose SUMO HV1500-3P motor-inverter system, Nissan Leaf 40 kWh battery pack, Delphi DC/DC converter, Nissan 6,6 kW onboard charger, Continental HT 4,00-8 pneumatic tires, double wishbone suspension for each wheel, transmission, and frame materials, such as the lower part of the square steel tubes, the coatings made of aluminium sheets and the carbon-fiber-reinforced polymer for the upper part. The transmission was a fixed gearbox differential, which was installed in the vehicle's rear for better grounding and, as a result, better steering by the front wheels. There was a brief overview of acceptable lighting technologies, such as blinking lights and LED lights. After deciding on the components, the vehicle was pre-analysed to determine its stability and performance.

The above parts had to be placed in the machine for preliminary analysis. The location was chosen based on the principle that heavier objects should be placed evenly between the axles. After putting the pieces together, the preliminary study revealed that the selected configuration puts the center of gravity to the middle of the machine, which is 1333 mm from the front axle. The height of the center of gravity at unladen weight is $h = 670$ mm, and it rises to $h = 770$ mm when fully loaded. In addition to determining the center of gravity, the author conducted a rollover study of the vehicle, also a maximum tilt angle study, a determination of the rollover speed on a flat and sloping road, and a slippage analysis. The concept under examination would need a slope of $\alpha = 39.29^\circ$ for overturning on a flat surface and $\alpha = 35.54$ km/h angle when fully loaded, however an autonomous vehicle would not be faced with such a slope. It was discovered that when transferring baggage with the maximum feasible weight, there would be

overturning at $v = 10.22$ km/h and sliding at $v_{slide} = 2.17$ km/h. If the weight of the machine were on a flat surface, overturning would take place at speed $v = 16.51$ km/h. On a slope, the slip speed is $v = 4.15$ km/h. By evaluating the overturning and sliding rates, it was found that the sliding takes place on both, a flat surface and a sloping surface before overturning which was indicating the suitability of the planned components placement.

In addition to evaluating the concept's feasibility, the author conducted a cost-benefit analysis, which allows one to estimate the project's financial profitability and its break-even period. The net present value of the project was more than zero, indicating that it is worthwhile to consider adopting the project and investing in the commissioning of an autonomous vehicle based on the high internal rate of return, because the return on investment is significant, paying off in 1.50 years assuming STILL R07-25 is sold. If STILL R07-25 is not sold, the project will pay off in 2.67 years. The implementation of a new concept will decrease the waiting time for arriving baggage, thus the customer experience is improved by the fact that he/she has to wait less time to pick up the luggage, and eliminating such tasks of outbound aircraft services that do not require an out-of-process employee.

In conclusion, the purpose set for this Master's thesis was accomplished. The project also gave answers to the questions related to vehicle restriction in the territory, the concept's reliability, and the cost-benefit analysis. However, due to the scope and delimitations of the thesis, it was not possible to choose the programming language options and proceed into the specifics of component selection in order to have the concept ready for execution. Furthermore, loading the maximum quantity of goods $m = 1500$ kg on the dolly under consideration in the thesis is extremely unlikely. As a result, an assessment with average luggage weight can be performed in the future to adjust real speeds in curves and inclines. In addition, further development of the work also needs programming, part selection, and potential load-bearing capability changes.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] T. E. Evjemo and S. O. Johnsen, "Lessons Learned from Increased Automation in Aviation: The Paradox Related to the High Degree of Safety and Implications for Future Research," Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL), 2019, doi: [10.3850/978-981-11-2724-3_0925-cd](https://doi.org/10.3850/978-981-11-2724-3_0925-cd).
- [2] T. J. Crayton and B. M. Meier, "Autonomous vehicles: Developing a public health research agenda to frame the future of transportation policy," Journal of Transport & Health, vol. 6, pp. 245-252, 2017, doi: [10.1016/j.jth.2017.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jth.2017.04.004).
- [3] J. Zhao, B. Liang and Q. Chen, "The key technology toward the self-driving car," IJIUS, vol. 6, no. 1, pp. 2-20, 2018, doi: [10.1108/IJIUS-08-2017-0008](https://doi.org/10.1108/IJIUS-08-2017-0008).
- [4] Y. Noy, D. Shinar and W. J. Horrey, "Automated driving: Safety blind spots," Safety Science, vol. 102, pp. 68-78, 2018, doi: [10.1016/j.ssci.2017.07.018](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.07.018).
- [5] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. Mollah and E. Hossain, "A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development," Energies, no. 8, pp. 1217, 2017, doi: [10.3390/en10081217](https://doi.org/10.3390/en10081217).
- [6] Riigi Teataja, *Sisepiiril piirikontrolli ja riigipiiri valvamise ajutine taaskehtestamine*, 2020. [Online].
<https://www.riigiteataja.ee/akt/115032020001> (30.01.2021).
- [7] "Tallinna lennujaam koondab 17% töötajatest," Tallinna Lennujaam, 2020. [Online].
<https://www.tallinn-airport.ee/uudised/tallinna-lennujaam-koondab-17-tootajatest/> (30.01.2021).
- [8] F. Serrano and A. Kazda, "The future of airports post COVID-19," Journal of Air Transport Management, vol. 89, 2020, doi: [10.1016/j.jairtraman.2020.101900](https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101900).
- [9] M. Schultz, J. Evler, E. Asadi, H. Preis, H. Fricke and C.-L. Wu, "Future aircraft turnaround operations considering post-pandemic requirements," Journal of Air Transport Management, vol. 89, 2020, doi: [10.1016/j.jairtraman.2020.101886](https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101886).
- [10] A. Kattepur, H. K. Rath, A. Simha and A. Mukherjee, "Distributed optimization in multi-agent robotics for industry 4.0 warehouses," SAC 2018: Symposium on Applied Computing, 2018, doi: [10.1145/3167132.3167221](https://doi.org/10.1145/3167132.3167221).
- [11] T. Morita and S. Managi, "Autonomous vehicles: Willingness to pay and the social dilemma," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 119, 2020, doi: [10.1016/j.trc.2020.102748](https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102748).
- [12] M. Johnson, "BA trials driverless luggage carts to speed up loading," Prolific London, 2019. [Online].

- <https://www.prolificlondon.co.uk/marketing-tech-news/tech-news/2019/10/ba-trials-driverless-luggage-carts-speed-loading> (20.01.2021).
- [13] *Tugs and tractors: High-tech systems add to pushback capability*, vol. 47. London: EVA International Media Ltd, 2019.
- [14] "World first autonomous baggage carrying dolly," Aurrigo.com, 2019. [Online]. <https://aurrigo.com/baggage-dolly/> (20.01.2021).
- [15] "Driverless emission-free baggage vehicles trialled at Heathrow," International Airport Review, 2019. [Online]. <https://www.internationalairportreview.com/news/106546/driverless-emission-freebaggage-vehicles-trialled-at-heathrow/> (20.01.2021).
- [16] Q. Li, F. K. K. Wong and T. Fung, "Mapping multi-layered mangroves from multispectral, hyperspectral, and LiDAR data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 258, pp. 112403, 2021, doi: [10.1016/j.rse.2021.112403](https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112403).
- [17] "One for the road: How the Midlands is fast-tracking driverless cars," *The Manufacturer*, 2020. [Online]. <https://www.themanufacturer.com/articles/one-for-the-road-how-the-midlands-is-fast-tracking-driverless-cars/> (28.02.2021).
- [18] "Robot Baggage System Comes to DFW Airport," *Robot News*, 2021. [Online]. <https://yellrobot.com/robot-baggage-system-handlers-dfw-airport-fleet/> (04.02.2021).
- [19] P. Kingsland, "Developing autonomous baggage handling tech," *Airport Technology*, 2019. [Online]. www.shorturl.at/gkHIL (04.02.2021).
- [20] "The March of the Robots," *Airline Routes and Ground Services*, 2019. [Online]. <https://airlinergs.com/issue-article/the-march-of-the-robots/> (03.04.2021)
- [21] "Changi airport's terminal 4 to set new benchmarks," *Bridging skies*, 2021. [Online]. <https://www.caas.gov.sg/who-we-are/our-organisation/our-publications/past-issues> (15.03.2021).
- [22] K. Park, "Singapore's Changi Airport Blazes a Trail by Embracing Automation," *Skift*, 2018. [Online]. <https://skift.com/2018/09/17/singapores-changi-airport-blazes-a-trail-by-embracing-automation/> (30.03.2021).
- [23] "Red Dot driving A.I.," *International Innovation Awards*, 2019. [Online]. <https://innovationaward.org/portfolio-item/red-dot-2019> (30.03.2021).
- [24] "Tallinna Lennujaam laiendab reisiterminali ja rajab lennujaama linnaku," *Tallinna Lennujaam*, 2019. [Online].

- <https://www.tallinn-airport.ee/uudised/tallinna-lennujaam-laiendab-reisiterminali-ja-rajab-lennujaama-linnaku/> (03.04.2021).
- [25] "Laadurid STILL R07, elektriline," Autoline, 2021. [Online].
<https://autoline.ee/-/laadurid/STILL/R07/elektriline-c386tm2770m8945fuel4115> (30.01.2021).
- [26] "DIN Tray Sizes & GPN - Selection Guide," Ras Al Khaimah: Todobaterias, 2021. [Online].
https://www.todobaterias.com/archivos_productos/14766018960a1.pdf (14.02.2021).
- [27] "R 07/08 Technical Data," Hamburg: STILL GmbH, 2013. [Online].
<http://www.mlmanutencion.com/wp-content/uploads/sites/26/2013/06/R07-25L.pdf> (10.03.2021).
- [28] J. Laugis and U. Agur, *Elektrijamid*. Tallinn: Valgus, 1984.
- [29] "Tallinna Lennujaama aastaaruanne 2020," Tallinna Lennujaam, 2021. [Online].
<https://www.tallinn-airport.ee/wordpress/wp-content/uploads/2021/04/Aastaaruanne-2020.pdf> (15.04.2021).
- [30] M.-L. Laherand, *Kvalitatiivne uurimisviis*. Tallinn: M.-L. Laherand, 2008.
- [31] J. M. Spector, M. D. Merrill, J. Elen and M. J. Bishop, *Handbook of Research on Educational Communications and Technology*. Springer New York, 2014.
- [32] S. Hirsjärvi, P. Remes and R. Sajavaara, *Uuri ja kirjuta*. Tallinn: Medicina, 2010.
- [33] "ABB 432RS6," *ABB: product-details*. [Online].
<https://new.abb.com/products/2CMA193139R1000/surface-socket-outlet-6h-32a-ip44-3pne> (28.03.2021).
- [34] "Sõidukite liikluskorraldus Tallinna lennuvälja kinnisel territooriumil," AS Tallinn Airport GH käsiraamat, no. 14, 2020.
- [35] "Pagasi töötlemise tsoonide režiimi eeskiri," AS Tallinn Airport GH käsiraamat, no. 5, 2017.
- [36] "Ohutuse üldnõuded Tallinna lennuvälja kinnisel territooriumil," AS Tallinn Airport GH käsiraamat, no. 7, 2019.
- [37] Riigi Teataja, *Liiklusseadus*, 2020. [Online].
<https://www.riigiteataja.ee/akt/130122015027?leiaKehtiv> (30.01.2021).
- [38] E. D. Kostopoulos, G. C. Spyropoulos and J. K. Kaldellis, "Real-world study for the optimal charging of electric vehicles," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 418-426, 2020, doi: [10.1016/j.egy.2019.12.008](https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.008).
- [39] S. Lemon and A. Miller, "Electric Vehicles in New Zealand: Technologically Challenged?" 2013. [Online].
https://www.researchgate.net/publication/319162842_Electric_Vehicles_in_New_Zealand_Technologically_Challenged (28.04.2021).

- [40] C. Ackermann, R. Isermann, S. Min and C. Kim, "Collision avoidance with automatic braking and swerving," IFAC Proceedings Volumes, vol. 47, no. 3, 2014, doi: [10.3182/20140824-6-ZA-1003.00353](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00353).
- [41] "Tallinna Lennujaama tutvustus," Tallinna Lennujaam. [Online]. <https://www.tallinn-airport.ee/ettevottest/tallinna-lennujaama-tutvustus/> (25.03.2021).
- [42] N. Hashemnia and B. Asaei, "Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles," 18th International Conference on Electrical Machines, pp. 1-5, 2008, doi: [10.1109/ICELMACH.2008.4800157](https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2008.4800157).
- [43] "Mõõdmed ja tehnilised andmed," Nissan. [Online]. <https://www.nissan.ee/soidukid/uued-soidukid/leaf/mootmed-tehnilised.html> (13.04.2021).
- [44] "TM4 SUMO MD Motor/Inverter System," Dana TM4 Inc., 2020. [Online]. <https://www.danatm4.com/wp-content/uploads/2018/08/TM4-SUMO-Product-Brochure.pdf> (26.03.2021).
- [45] "2015 LEAF - Roadside Assistance Guide," Nissan, 2015. [Online]. <https://aar.com/standards/pdfs/Nissan/Leaf%20Roadside%202015.pdf> (05.03.2021).
- [46] "2021 Nissan LEAF Range, Charging & Battery," Nissan, 2021. [Online]. <https://www.nissanusa.com/vehicles/electric-cars/leaf/features/range-charging-battery.html> (22.02.2021).
- [47] "DELPHI 2.2 kW DC-DC Converter," Media3.evtv, 2015. [Online]. <http://media3.ev-tv.me/DelphiUserManual.pdf> (24.04.2021).
- [48] "User Guide Chevrolet Volt: Accessory Power Control Module," Media3.evtv, 2015. [Online]. <http://media3.evtv.me/VoltAPMUserGuide.pdf> (25.04.2021).
- [49] "6.6 KW On-Board Charger," NetPower, 2019. [Online]. <http://www.netpowercorp.com/Upload/pdfLEDOReV/CA26K6-1AL.pdf> (01.04.2021).
- [50] R. Beaumar and R. Daniels, "On-board charger," Nissan North America, Inc, 2013. [Online]. http://www.nissantechnicianinfo.mobi/htmlversions/2013_EV_Special/EV_LEAF_TOC.html (01.04.2021).
- [51] S. Saxena, J. MacDonald and S. Moura, "Charging ahead on the transition to electric vehicle with standard 120 V wall outlets," Applied Energy, vol. 157, pp. 720-728, 2015, doi: [10.1016/j.apenergy.2015.05.005](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.005).
- [52] G. Bryce, "What is CHAdeMO charging?" The Driven, 2018. [Online]. <https://thedriven.io/2018/12/10/what-is-chademo-charging/> (05.05.2021).

- [53] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo and K. Ebrahimi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles, 18th ed.* Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [54] M.- A. Beaudoin and B. Boulet, „Fundamental limitations to no-jerk gearshifts of multi-speed transmission architectures in electric vehicles,” *Mechanism and Machine Theory*, no. 160, 2021, doi: [10.1016/j.mechmachtheory.2021.104290](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104290).
- [55] “Technical Data Book: Industrial/MPT/EM Tyres,” PartsSystem, 2003. [Online]. http://partssystem.pl/htmlarea/uploaded/Continental_Technical_Data_Book.pdf (19.02.2021).
- [56] “Off-the road tyre solutions,” *Emeraldtyres.com*, 2019. [Online]. <https://ndetal.com/img/catalog/shiny/pdf/files/emerald.pdf> (07.03.2021).
- [57] “Tire Load Index Chart,” Tyre Size Calculator. [Online]. <https://www.tyresizecalculator.com/charts/tire-load-index-chart> (01.03.2021).
- [58] “Viikur HAA40A 12VDC 150mA kollane,” Westbalt, 2021. [Online]. <http://www.westbalt.eu/store/index.php/electronic-flash-light-haa40a-12vdc-150ma-yellow.html> (28.02.2021).
- [59] K. V. Reddy, M. Kodati, K. Chatra and S. Bandyopadhyay, “A comprehensive kinematic analysis of the double wishbone and MacPherson strut suspension systems,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 105, pp. 441–470, 2016, doi: [10.1016/j.mechmachtheory.2016.06.001](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.06.001).
- [60] “Stellox Leaf Springs,” *Stellox: spare parts expert*. [Online]. <https://stellox.com/production/new-products/84/142.html> (10.03.2021).
- [61] M. Kraas, “Auto vedrustussüsteem - töökord ja tüüpilised probleemid”, Carfox, 2017. [Online]. <https://carfox.ee/blog/auto-vedrustussusteem-kuidas-tootab-millest-koosneb/> (10.03.2021).
- [62] R. Baguley, “3D Printing Materials: The Pros and Cons of Each Type,” Tom's Guide, 2017. [Online]. <https://www.tomsguide.com/us/3d-printing-materials,news-24392.html> (10.03.2021).
- [63] J. W. Stansbury and M. J. Idacavage, “3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities,” *Dental Materials*, vol. 32, no. 1, pp. 54–64, 2016, doi: [10.1016/j.dental.2015.09.018](https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018).
- [64] M. Rajyaguru, “Pros and cons of carbon fiber,” ResearchGate, 2019. [Online]. https://www.researchgate.net/publication/334450959_PROS_AND_CONS_OF_CARBON_FIBER (23.03.2021).
- [65] “Polüetüleen (PE),” Nelgeron. [Online]. <https://nelgeron.ee/polumeerid/poluetuleen-pe/> (23.03.2021).

- [66] A. Peppas, K. Kollias, D. A. Dragatogiannis and C. A. Charitidis, "Sustainability analysis of aluminium hot forming and quenching technology for lightweight vehicles manufacturing," *International Journal of Thermofluids*, vol. 10, 2021, doi: [10.1016/j.ijft.2021.100082](https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100082).
- [67] "Tooted," Metall24.ee. [Online].
<https://www.metall24.ee/tooted/> (16.04.2021).
- [68] A. Pramanik, "Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 101, pp. 1–29, 2017, doi: [10.1016/j.compositesa.2017.06.007](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.007).
- [69] J.-S. Zhao, X. Liu, Z.-J. Feng and J. S. Dai, "Design of an Ackermann-type steering mechanism," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 227, no. 11, pp. 2549–2562, 2013, doi: [10.1177/0954406213475980](https://doi.org/10.1177/0954406213475980).
- [70] Transportation Research Board, *Assessment of the national highway traffic safety administration's rating system for rollover resistance*, 265th ed. Washington, D.C.: National Academy Press, 2002.
- [71] P. Kulu and E. Hendre, *Mehaanikainseneri käsiraamat*, 1st ed. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2015.
- [72] B. Kunjunni, M. A. bin Zakaria, A. P. P. Majeed, A. F. A. Nasir, M. H. B. Peeie and U. Z. Abdul Hamid, "Effect of load distribution on longitudinal and lateral forces acting on each wheel of a compact electric vehicle," *SN Appl. Sci.*, no. 2, 2020, doi: [10.1007/s42452-020-1996-9](https://doi.org/10.1007/s42452-020-1996-9).
- [73] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, 1st ed. Warrendale, US: SAE International, 1992.
- [74] J. C. Dixon, *Suspension Geometry and Computation*, 1st ed. New York: John Wiley & Sons, Incorporated, 2009.
- [75] M. Blundell and D. Harty, *The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics*, 1st ed. Oxford, UK: Elsevier Science & Technology, 2004.
- [76] S. J. Zammit, *Motor Vehicle Engineering Science for Technicians*, 1st ed. Harlow, UK: Pearson Education Limited, 1987.
- [77] S. Ross, R. Westerfield and B. Jordan, *Fundamentals of corporate finance*, 10th ed. New York: McGraw-Hill/Irwin, 2013.
- [78] M. Frey, F. Kiermaier and R. Kolisch, "Optimizing Inbound Baggage Handling at Airports," *Transportation Science*, vol. 51, no. 4, pp. 1210–1225, 2017, doi: [10.1287/trsc.2016.0702](https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0702).

LISAD

Lisa 1 STILL R07-25 tehnilised andmed

Characteristics	Manufacturer		STILL
	Model		R07-25
	Power supply		electric
	Carrying capacity	kg	300
	Trailer load	kg	25 000
Weight	Weight	kg	3800
	Axle loadings laden front / rear	kg	2000 / 2100
	Axle loadings unladen front / rear	kg	1900 / 1900
Tyres	Tyres		pneumatic
	Tyre size - front		6.00 R9
	Tyre size - rear		7.00 R12
	Wheels number front		2
	Wheels number rear (x=drive wheel)		2x
Performance	Speed laden / unladen	km/h	11 / 25
	Brakes		electric/hydraulic
Motors	Drive motor hourly capacity	kW	20
	Battery equipment		43536 A
	Battery voltage	V	80
	Battery capacity	Ah	460 / 560
	Battery weight	kg	1558
	Battery measurements	mm	1026 x 996 x 462 [26]
Other	Frame		Steel
	Steering		Servo-steering
	Rolling resistance on level surface	N/t	200
	Frictional coefficient for tyres		0.80
	Tipping limit		20% below the net weight of the tractor
	Turning radius	mm	3280
	Loading platform, width	mm	1170
	Loading platform, length	mm	1955

Allikas: STILL R07/08 tehnilised andmed [27]

Lisa 2 Lendude teenindamisprotsessi ajakulu

L2.1 Väljuvate lendude pagasi laadimiseks kulunud aeg

Jrk	Lend		Sihtkoht	Pagaseid	Laadimise algusaeg	Laadimise lõpuaeg	Aeg	Kas käidi pagaseid juurde toomas?	Mitu korda toodi pagaseid juurde?
1	MAI	MYX	Antalya	117	05:15	05:50	35 min	Jah	2 korda
2		CAI	Antalya	79	10:00	10:15	15 min	Ei	-
3		CAI	Antalya	142	10:41	11:08	27 min	Jah	1 kord
4		MYX	Antalya	140	04:40	05:18	38 min	Jah	2 korda
5		MYX	Sharm El Sheik	141	15:01	15:34	33 min	Ei	-
6		MYX	Antalya	108	05:04	05:56	52 min	Jah	1 kord
7		DMS	Antalya	149	10:10	10:40	30 min	Jah	2 korda
8		GTR	Gran Canaria	75	16:24	16:37	13 min	Ei	-
9		MYX	Antalya	166	05:05	05:55	50 min	Ei	-
10	APRILL	MYX	Hurgada	163	06:37	07:06	28 min	Ei	-
11		MYX	Tenerife	168	07:51	08:47	56 min	Jah	2 korda
12		MYX	Sharm El Sheik	166	08:00	08:40	40 min	Jah	1 kord
13		MYX	Hurgada	176	06:41	07:05	24 min	Ei	-
14		GTR	Gran Canaria	154	16:55	17:20	25 min	Ei	-
15		GTR	Gran Canaria	175	17:00	17:20	20 min	Ei	-
16		MYX	Sharm El Sheik	176	08:34	08:54	20 min	Ei	-
17		MYX	Hurgada	167	06:20	06:46	26 min	Ei	-
18		MYX	Tenerife	173	07:40	08:35	55 min	Ei	-
19		MYX	Hurgada	164	06:05	06:36	31 min	Ei	-
20		GTR	Gran Canaria	126	16:44	17:06	22 min	Jah	1 kord
21		MYX	Sharm El Sheik	169	08:02	08:44	42 min	Jah	1 kord
22		GTR	Gran Canaria	98	17:07	17:19	12 min	Ei	-
23		GTR	Gran Canaria	194	16:19	16:47	28 min	Ei	-
24		MYX	Sharm El Sheik	180	08:25	08:52	27 min	Jah	1 kord
25		MYX	Hurgada	167	06:20	06:56	36 min	Ei	-
26		MYX	Tenerife	155	07:39	08:05	26 min	Ei	-
27		MYX	Hurgada	168	06:31	07:05	34 min	Ei	-
28		GTR	Gran Canaria	170	16:18	16:47	29 min	Ei	-
29		MYX	Sharm El Sheik	171	08:00	08:40	40 min	Ei	-
30	MÄRTS	MYX	Hurgada	169	06:08	06:53	45 min	Jah	1 kord
31		MYX	Tenerife	164	07:05	08:04	59 min	Ei	-
32		MYX	Sharm El Sheik	177	08:28	08:50	22 min	Ei	-
33		MYX	Hurgada	159	06:15	06:55	40 min	Ei	-
34		GTR	Gran Canaria	179	17:06	17:34	28 min	Ei	-
35		MYX	Sharm El Sheik	164	08:25	08:50	25 min	Ei	-
36		MYX	Hurgada	167	06:35	06:59	24 min	Ei	-
37		MYX	Tenerife	162	07:49	08:26	37 min	Ei	-
38		MYX	Sharm El Sheik	178	07:15	08:05	50 min	Jah	1 kord
39		MYX	Hurgada	175	06:24	06:55	31 min	Ei	-

L2.1 järg

Jrk	Lend		Sihtkoht	Pagaseid	Laadimise algusaeg	Laadimise lõpuaeg	Aeg	Kas käidi pagaseid juurde toomas?	Mitu korda toodi pagaseid juurde?
40	MÄRTS	GTR	Gran Canaria	177	16:15	16:50	35 min	Ei	-
41		MYX	Sharm El Sheik	175	08:10	08:47	37 min	Ei	-
42		MYX	Hurgada	175	06:27	07:00	33 min	Jah	1 kord
43		MYX	Tenerife	166	07:59	08:50	51 min	Ei	-
44		MYX	Sharm El Sheik	162	08:20	08:50	30 min	Ei	-
45		MYX	Hurgada	165	06:20	06:49	29 min	Ei	-
46		GTR	Antalya	79	10:20	10:35	15 min	Ei	-
47		MYX	Antalya	140	07:40	08:20	40 min	Jah	1 kord
48		MYX	Antalya	164	05:10	05:56	46 min	Ei	-
49		GTR	Antalya	149	10:10	10:40	30 min	Jah	2 korda

Allikas: autori koostatud

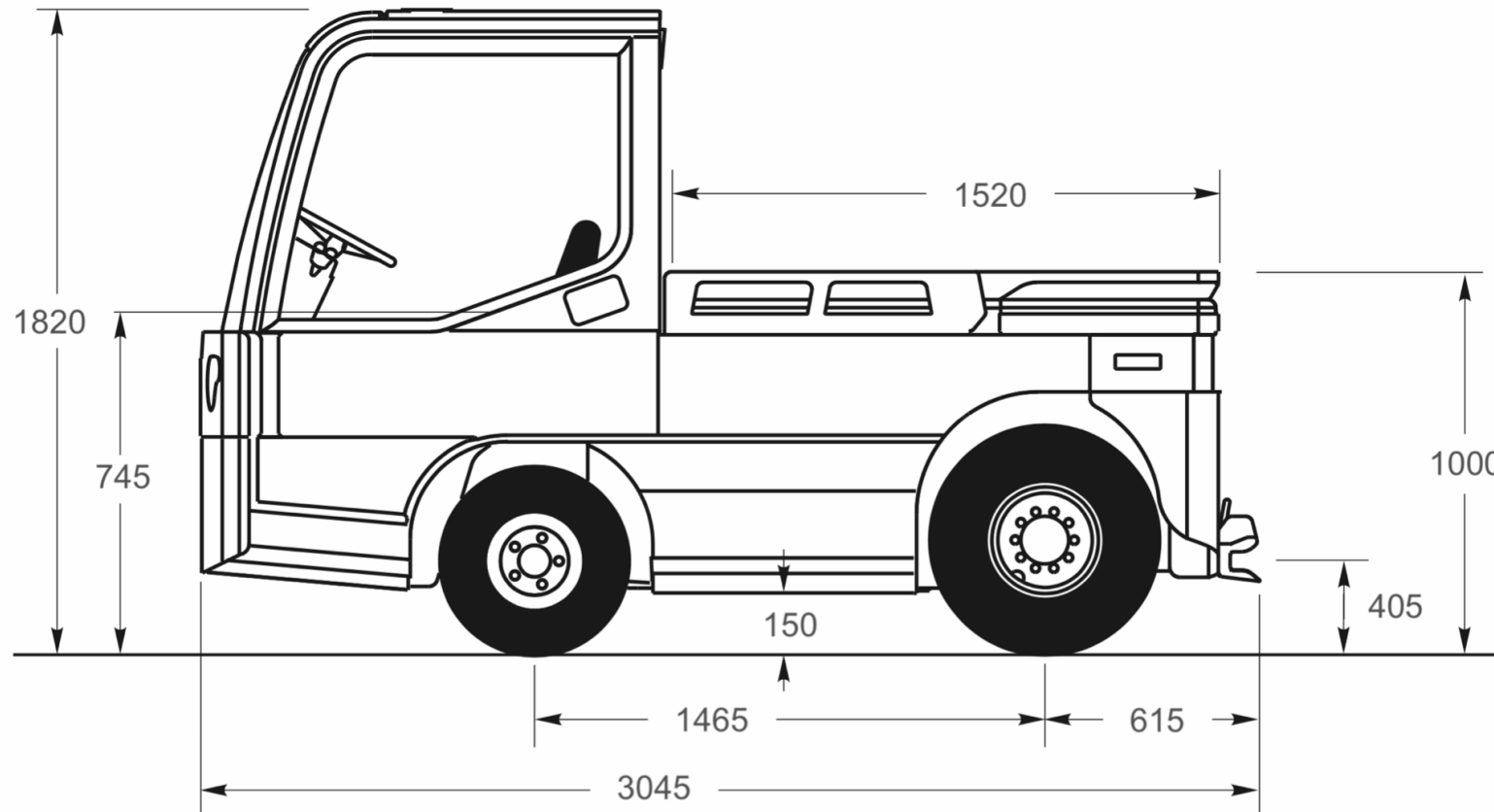
L2.2 Saabuvate lendude pagasi ooteaeg

Pagasi ooteaeg (min)			
Nädal	2019	2020	2021
1. nädal	11:34	10:13	08:04
2. nädal	11:04	10:02	09:08
3. nädal	09:54	09:36	09:27
4. nädal	10:03	09:36	09:27
5. nädal	10:32	09:52	10:03
6. nädal	10:37	10:02	09:38
7. nädal	10:16	09:31	10:30
8. nädal	09:35	09:59	09:51
9. nädal	10:54	11:07	09:50
10. nädal	10:10	10:31	10:15
11. nädal	10:11	09:46	09:58
12. nädal	09:51	11:47	09:25
13. nädal	10:12	10:12	09:27
14. nädal	09:59	10:10	09:26
15. nädal	10:06	13:52	09:26
16. nädal	10:08	11:27	09:50
17. nädal	10:27	11:20	10:38
18. nädal	10:36	11:19	09:13
19. nädal	10:27	08:41	09:34
20. nädal	10:17	08:45	
21. nädal	10:56	09:49	
22. nädal	10:42	08:57	

Pagasi ooteaeg (min)			
Nädal	2019	2020	2021
23. nädal	11:14	08:53	
23. nädal	10:43	08:58	
24. nädal	10:48	09:18	
25. nädal	11:18	09:06	
26. nädal	11:51	09:04	
27. nädal	11:26	09:25	
28. nädal	11:06	09:28	
29. nädal	11:09	09:39	
30. nädal	11:51	09:45	
31. nädal	11:38	09:25	
32. nädal	10:30	09:20	
33. nädal	10:33	09:20	
34. nädal	10:14	08:57	
35. nädal	09:42	09:46	
36. nädal	10:11	09:21	
37. nädal	10:00	08:57	
38. nädal	10:06	08:55	
39. nädal	10:33	09:09	
40. nädal	09:53	08:42	
41. nädal	09:46	08:01	
42. nädal	10:30	08:45	
43. nädal	10:29	08:32	
44. nädal	10:11	08:06	
45. nädal	09:37	07:26	
46. nädal	09:40	08:15	
48. nädal	10:23	07:56	
49. nädal	09:41	08:28	
50. nädal	09:59	08:45	
51. nädal	11:02	08:24	
52. nädal	10:54	08:28	
Keskmine ooteaeg	10:29	09:29	09:38

Allikas: autori koostatud

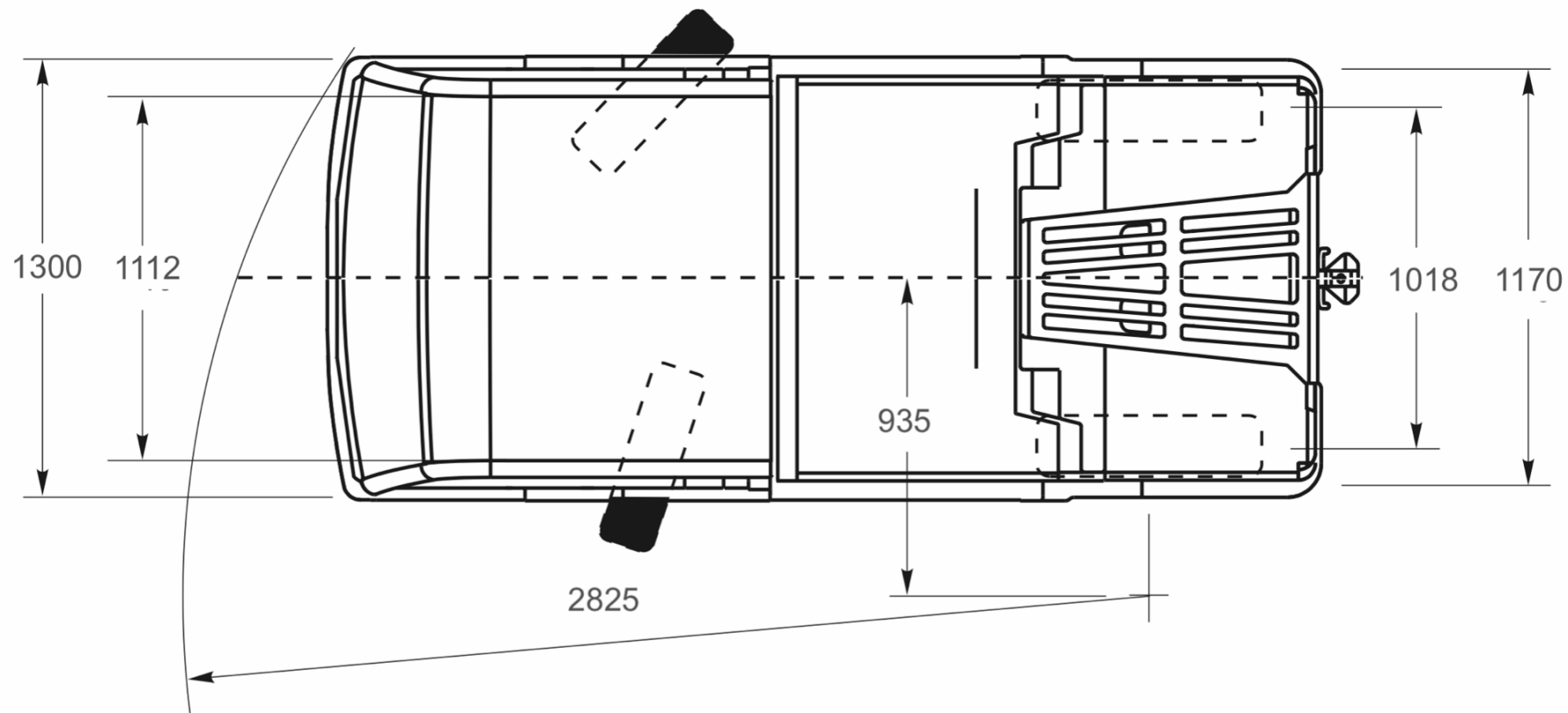
L3.1 STILL R07-25 mõõtmed külgsuunas



Autori kohandatud joonis STILL R07/08 tehniliste andmete [27] põhjal

Ühik: mm

L3.2 STILL R07-25 mõõtmed pealtvaates



Autori kohandatud joonis STILL R07/08 tehniliste andmete [27] põhjal

Ühik: mm

Lisa 4 SAE automatiseerituse tabel

SAE level	Name	Definition	Steering/ Acceleration/ Deceleration	Monitoring driving environment	Fallback performance of dynamic driving	System capability (driving modes)
Human driver monitors the driving environment						
0	No automation	The full-time performance by the human driver of all aspects of the dynamic driving task, even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver			N/A
1	Driver assistance	The driving mode specific execution by a driver assistance system of the either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the human driver performs all remaining aspects of the dynamic driving task	Human driver + system	Human driver		Some driving modes
2	Partial automation	The driving mode specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the expectation that the human driver performs all remaining aspects of the dynamic driving task	System	Human driver		Some driving modes
Automated driving system monitors the driving environment						
3	Conditional automation	The driving mode specific performance by an automated driving system, the expectation that the human driver will respond appropriately to a request to intervene	System		Human driver	Some driving modes

SAE level	Name	Definition	Steering/ Acceleration/ Deceleration	Monitoring driving environment	Fallback performance of dynamic driving	System capability (driving modes)
4	High automation	The driving mode specific performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task, even if a human driver does not respond appropriately to a request to intervene	System			Some driving modes
5	Full automation	The full performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task under all roadway and environmental conditions that can be managed by a human driver	System			All driving modes

Allikas: T. Morita and S. Managi [11]

Current type	Region			
	Japan	America	Europe, rest of world	China
AC				
Plug name:	J1772 (or Type 1)	J1772 (or Type 1)	Mennekes (or Type 2)	GB/T
DC				
Plug name:	CHAdeMO	CCS1	CCS2	GB/T

Allikas: G. Bryce [52]