



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

MEHITAMATA ÕHUSÕIDUKI STARDIKATAPULT

LAUNCHER FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Lauri Valdmann

Üliõpilaskood 183681MATM

Juhendaja: Toivo Tähemaa, teadur

(Tiitellehe pöördel)

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.

"....." 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Lauri Valdmann (sünnikuupäev:17.12.1994)

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

Mehitamata Õhusõiduki stardikatapult

mille juhendaja on

Toivo Tähemaa

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.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkirjastatud digitaalselt)

_____ 26.05.2020 _____ (kuupäev)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Lauri Valdmann 183681MATM
Õppekava, peeriala: MATM02/18 - Tootearendus ja tootmistehnika
Juhendaja(d): Teadur, Toivo Tähemaa, 620 3252
Konsultant: Kristjan Tiimus, Chief Technology Officer
Threod Systems OÜ, +372 517 7186, Kristjan.tiimus@threod.com

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Mehitamata õhusõiduki stardikatapult
(inglise keeles) Launcher for unmanned aerial vehicle

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Katapuldi simulatsiooni loomine Matlab Simulink tarkvaras
2. Katapuldi süsteemi disain ja lahenduste väljatöötamine
3. Nõuetele vastava katapuldi projekteerimine

Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus | Tähtaeg |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1. | Olemasolevate lahenduste analüüs ja põhikontseptsiooni määramine | 05.10.2019 |
| 2. | Simulatsiooni loomine Matlab Simulink tarkvaras | 15.10.2019 |
| 3. | Eelprojekti loomine ning süsteemi disaini väljatöötamine. (Preliminary Design Review) | 27.11.2019 |
| 4. | Süsteemi lõplik disain ning lahenduste väljatöötamine, tugevusanalüüsid. Lõpliku 3D mudeli loomine. (Critical Design Review) | 06.03.2020 |
| 5. | Tootmisdokumentatsiooni loomine (Production Readiness Review) | 06.04.2020 |
| 6. | Dokumentatsiooni vormistamine | 11.05.2020 |

Töö keel: Eesti Keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 25. mai 2020

Üliõpilane: Lauri Valdmann /Allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Toivo Tähemaa /Allkirjastatud digitaalselt/

Konsultant: Kristjan Tiimus /Allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: Martin Eerme /Allkirjastatud digitaalselt/

Lõputöö avalikustamise piirangu tingimused on formuleeritud pöördel.

TAOTLUS

Ainult lõputöö avalikustamise piirangu seadmiseks

Üliõpilase kood: 183681MATM
Üliõpilase ees- ja perekonnanimi: Lauri Valdmann
Üliõpilase õppekava kood ja peeriala: MATM02/18 - Tootearendus ja tootmistehnika
Magistritöö pealkiri: Mehitamata õhusõiduki stardikatapult
Juurdepääsupiirangu lõpp: Juuni 2025

Põhjendus:

Mehitamata õhusõiduki stardikatapult on tegemist kahesesuguse kasutusega tootega.

Antud skaala stardikatapultil on maailmas praegu ainult 2-3 konkurenti. Võrreldes konkurentidega on arendatav katapult ligikaudu 2000kg kergem, ülesse seatav 15 minutiga, võimeline töötama temperatuurivahemikus -20°C kuni $+55^{\circ}\text{C}$, mahub pakituna 20ft ISO konteinerisse ning seda on võimalik transportida tavalise sõiduautoga.

Antud projekti raames loodi unikaalne simulatsioonisüsteem, mis võimaldab katapultide kiirendus ja pidurdussüsteemi üheaegselt simuleerida ning seeläbi lühendada märkimisväärselt arenduse aega ning süsteemi toimimist enne prototüübi ehitamist testida. Simulatsioonisüsteem võimaldab kiiresti skaleerida suurema või väiksema õhusõiduki jaoks ning seeläbi optimeerida kogu süsteem kindlasse võimsusvahemikku. Lisaks kajastatakse töös väga täpseid arvulisi parameetreid süsteemi põhikomponentidele, ning erinevate osade tehnilisi lahendusi, mis võimaldaks konkurentidel lihtsalt maha kopeerida.

Kogu infot arvestades tuleks antud magistritöö sisule kehtestada juurdepääsupiirang ning magistritööd ei tohiks avalikustada mitte varem kui 2025. aasta juunis. Nõue ei kehti lühikokkuvõttele ja postrile.

Üliõpilase allkiri:

Lauri Valdmann
/Allkirjastatud digitaalselt/

Ettevõtte esindaja allkiri:

Kristjan Tiimus
/Allkirjastatud digitaalselt/

Instituudi direktori allkiri:

Kristo Karjust
/Allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

| | |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| SISUKORD | 6 |
| EESSÕNA | 8 |
| Lühendite ja tähiste loetelu..... | 9 |
| SISSEJUHATUS | 10 |
| 1. KATAPULDI KONTSEPTSIOON..... | 12 |
| 1.1 Turuanalüüs | 13 |
| 1.1.1 Meggit Defence System – MDS Hercules | 13 |
| 1.1.2 Aries Defence & Security ATLAS ME-01 | 15 |
| 1.1.3 Ruag Aviation DC4 | 16 |
| 1.1.4 Robonic Ohto | 18 |
| 1.1.5 Turuanalüüsi kokkuvõte | 20 |
| 1.2 Ülesande püstitus..... | 21 |
| 1.3 Kontseptsiooni loomine..... | 24 |
| 1.4 Pika pneumosilindriga katapuldi kontseptsioon..... | 24 |
| 1.5 Plokisüsteemiga katapuldi kontseptsioon..... | 26 |
| 1.6 Esialgse füüsikalised arvutused..... | 28 |
| 1.6.1 Reelingu pikkus | 28 |
| 1.6.2 Katapuldi põhiparameetrid | 29 |
| 1.7 Simulatsioonimudeli loomine Matlab Simulink keskkonnas | 32 |
| 1.7.1 Simulatsioonimudeli valideerimine | 33 |
| 1.7.2 Plokisüsteemiga katapuldi simulatsioonimudel..... | 35 |
| 1.7.3 Simulatsiooni tulemused..... | 37 |
| 2. PROJEKTEERIMINE..... | 40 |
| 2.1 Kiirendus- ja pidurdussüsteem | 40 |
| 2.1.1 Keskmise plokisüsteem | 42 |
| 2.1.2 Kiirendussilinder..... | 42 |
| 2.1.3 Nööri pingutusüsteem | 43 |
| 2.1.4 Kasutatav nõör | 44 |
| 2.1.5 Pidurdussüsteem | 47 |
| 2.1.6 Pidurdusamortisaator | 49 |
| 2.2 Kõrgsurve pneumaatikasüsteem..... | 52 |

| | | |
|-------|-----------------------------------------------|----|
| 2.2.1 | Kõrgsurve paak | 54 |
| 2.2.2 | Pneumosilindri õlitussüsteem | 55 |
| 2.2.3 | Kõrgsurve kompressor | 57 |
| 2.3 | Reeling..... | 60 |
| 2.3.1 | Esimene reeling..... | 61 |
| 2.3.2 | Keskmine reeling | 62 |
| 2.3.3 | Tagumine reeling | 64 |
| 2.3.4 | Reelingu kallutusmehhanism | 65 |
| 2.3.5 | Stardiadapteri lukustusmehhanism | 69 |
| 2.4 | Stardiadapter | 72 |
| 2.5 | Hüdro süsteem | 73 |
| 2.5.1 | Hüdrojaam | 75 |
| 2.5.2 | Hüdro silindrid..... | 76 |
| 2.6 | Juhtpaneel | 77 |
| 2.6.1 | Kasutajaliidese disain | 79 |
| 2.7 | Juhtsüsteem..... | 80 |
| 2.7.1 | 24 VDC Elektrisüsteem | 81 |
| 2.7.2 | Juhtmestik | 83 |
| 2.7.3 | Juhtsüsteem | 84 |
| 2.8 | Projekteerimise tulemus | 86 |
| 3. | MAJANDUSLIK OSA..... | 91 |
| 3.1 | Kulud ostukomponentidele ja detailidele | 91 |
| | KOKKUVÕTE | 93 |
| | SUMMARY | 95 |
| | KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU | 97 |
| | LISA 1. GRAAFILINE OSA | 99 |

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema tuli ettevõttest Threod Systems OÜ. Ettevõttel on varasemast 10 kJ katapult, mis on projekteeritud kuni 20 m/s lõppkiiruseni ning varasema kogemuse baasil otsustati siseneda suuremate mehitamata õhusõidukite katapultide turule. Lõputöö autor töötab nimetatud ettevõttes alates 2016 aasta novembrist, ning antud projekt pakkus kohesest huvi, lõi väga palju väljakutseid, nõudis erinevate süsteemide uurimist ja tundmaõppimist ning pakkus suurt eneseteostuse võimalust.

Threod Systems OÜ põhisuunaks on mehitamata lennudevahendite arendamine ja tootmine. Lisaks on ärisuunaks ka alamsüsteemide arendamine ning tootmine. See hõlmab endast juhtpulte, kaamerasüsteeme, antennisüsteeme ja ka katapult. Lõputöös projekteeritava katapuldi puhul on tegemist täiesti uue tootega, sest on mõeldud suurema massi ja lõppkiiruse jaoks ning kogu süsteem on ehitatud treilerile. Tootele on antud oma lühinimi CATA, mis on lühend ingliskeelsest sõnast *catapult*. CATA katapult on arvutuslikult 100 kJ võimsusega katapult ning suurimaks erinevuseks võrreldes väiksemate katapultidega on kiirendus- ja pidurdussüsteem, mis kasutab plokisüsteemi. See võimaldab lennuki kelgu kiirust mitmekordistada, ning võimaldab kelgu kiirendus ja pidurdussüsteemi integreerida ühtseks süsteemiks. Seeläbi on võimalik kogu süsteem kinniseks projekteerida, märkimisväärselt suurendada süsteemi rõhku ja lennuki massi ning lõppkiirust suures vahemikus sujuvalt reguleerida.

Antud arendus oli ettevõtte jaoks projektijuhtimise seisukohalt esmakordne, sest kogu arenduse spetsifikatsioonid ja muu dokumentatsioon vormistati vastavalt erinevatele MIL standarditele. See lõi ettevõttesse väga tugeva kompetentsi, kuidas mahukaid projekte vastavalt standarditele läbi viia ning saavutada täielik kliendi nõuetele vastavus.

Lõputöö koostamisel on olnud abiks Tallinna Tehnikaülikooli teadur Toivo Tähemaa, kes on ühtlasi ka antud lõputöö juhendaja. Sooviksin tänada teda abivalmiduse ja kiire tagasiside eest. Katapuldi erinevate teiste alamsüsteemide projekteerimisel, mida antud lõputöös otseselt ei kajastata, olid abiks Robert Jakobson, Henrik Heinmets, Kadi Kadak, Ramon Jakobs.

Lõputöö võtmesõnad: katapult, CATA, tootearendus, magistritöö

Lühendite ja tähiste loetelu

CAD – arvutipõhine disain (ingl k *Computer-Aided Design*)

CATA – tootenimetus katapulidile

UAV – mehitamata õhusõiduk (ingl k *Unmanned Aerial Vehicle*)

RCP – juhtimispult (ingl k *Remote Control Panel*)

VTOL – vertikaalne õhkutõus ja maandumine (ingl k *Vertical Takeoff and Landing*)

SISSEJUHATUS

Antud magistritöö eesmärgiks on projekteerida katapult, mis vastaks täielikult kliendi poolt esitatud nõuetele ning mis suudaks 60 kg lennuvahendi kiirendada kuni 52 m/s. Katapult kasutatakse mehitamata õhusõidukite startimiseks, kus lennuvahend paigutatakse katapultdi stardiadapterile ning pneumaatiliselt kiirendatakse kuni 16.8 m pikkusel siinil soovitud lõppkiiruseni. Seejärel lennuvahend läheb lendu ning stardiadapteri hoog pidurdatakse uuesti maha, mis võimaldaks kiiret lähtestamist ning opereerimist.

Magistritöö teema tuli ettevõttest Threod Systems OÜ, kes arendab ja toodab mehitamata õhusõidukeid ja nende alamsüsteeme. Ettevõttes ei ole varasemalt samaväärset katapulti projekteeritud ning projekt oli väga ambitsioonikas ja huvitav. Seetõttu pakkus see kohest huvi ning nõudis uute programmide tundmaõppimist, et lahendada ning mõista kogu süsteemi toimimist. Kogu projekt on piisavalt mahukas, et sellel teemal magistritöö vormistada. Lisaks võib ettearvatavalt mainida, et kogu maailma katapultide seas, on tegemist kõige kergema katapultiga sellises võimsusklassis ning seda on ainukesena võimalik transportida tavalise sõiduautoga.

Magistritöö autor oli kogu süsteemi peainsener, kes on antud projektiga tegelenud alates selle algusest. See tähendab, et kogu kontseptsioon, keerukamad tehnilised lahendused ja komponentide valik on magistritöö autori poolt välja töötatud või valitud. Sealhulgas tuleb ära märkida, et kõik magistritöös kajastatud süsteemid on täielikult projekteeritud magistritöö autori poolt ning tööst on välja jäänud süsteemid, mis on teiste inseneride poolt projekteeritud.

Magistritöö algab sissejuhatusega katapultdi tutvustusse, mille eesmärk on selgitada, kuidas selliseid katapulte kasutatakse, mis on projekteeritava katapultdi eripärad ning anda üldine ülevaade millistest alamsüsteemidest ja komponentidest katapult koosneb.

Magistritöö järgmise osana viiakse läbi turuanalüüs, mille põhieesmärgiks on põhjalikult uurida konkureerivate katapultide erinevaid disainilahendusi ning seeläbi luua baas lõputöös projekteeritava katapultdi disainile ning tehnilistele lahendusele. Kuna puudub varasem põhjalik kogemus erinevate katapultide projekteerimisel ja kasutamisel, oli kriitilise tähtsusega koguda võimalikult palju informatsiooni ja tagasisidet konkurentide süsteemide kohta. Kliendipoolsete nõuete järgi loodi ülesandepüstitus, et luua arusaam süsteemi nõuete kohta.

Lõputöö põhiosa sisaldab endas kontseptsiooni loomist, kaalutledes erinevaid lahendusvariante ning seejärel leitakse esmased katapuldi põhiparameetrid. Kontseptsioonivalikut ja põhiparameetreid arvestades luuakse Matlab Simulink keskkonnas katapuldi simulatsioonimudel, mille abil simuleeritakse kiirendus- ja pidurdussüsteemi ning täpsustuvad katapuldi põhiparameetrid nagu pneumosüsteemi rõhk, kolvi diameeter ja töökäik. Simulatsioonist tulnud andmetega arvestatakse komponentide valikul ning järgmises etapis – projekteerimine. Projekteerimise osa on mahukaim lõputöö osa, kus kirjeldatakse täpsemalt katapuldi erinevaid osasid ja nende tööpõhimõtteid, lisaks selgitatakse konstruktsiooni projekteerimisel tehtavaid valikuid ja koostatakse kogu katapuldi konstruktsioon. Lõputöö põhiosa lõpus antakse ülevaade ka katapuldi juhtpaneelist ning kogu juhtsüsteemi toimimisest. Kogu katapuldi konstruktsioonile tehti üle 40 tugevusanalüüsi, mida antud lõputöös ei kajastata, kuna see lisaks lõputöö mahule üle 40 lehekülje. Põhiosa lõpus esitletakse projekteeritud katapult piltide ja tehniliste parameetrite poolest ning tuuakse välja projekteeritud katapuldi nõuetele vastavus. Kogu projekteerimise osa teostatakse Solid Edge 2019 ja simuleerimiseks kasutatakse Matlab Simulink programmi.

Lõputöö lõpus antakse ülevaade katapuldi omahinna protsentuaalne jagunemine erinevateks osadeks. Magistritöö lõpeb graafilise osaga, mis sisaldab üldjooniseid katapuldist.

1. KATAPULDI KONTSEPTSIOON

Käesolev peatükk sisaldab mehitamata lennuvahendi stardikatapuldi põhiliste konstruktsioonide tutvustamist, konkurentide katapultide toodetest analüüsi ning katapuldi projekteerimise ülesandepüstitust.

CATA katapuldi puhul on tegemist 100kJ pneumaatilise katapuldiga, mis on võimeline kiirendama 60 kg lennuvahendi lõppkiiruseni 52 m/s. Katapuldi kiirendussüsteemi tööpõhimõtte on väga sarnane lennukikandjatel kasutatava aurukatapuldiga. Lennukikandjatel kasutatakse töösurve saamiseks veeauru ning stardiadapteri pidurdamiseks veepidurit. Töösurve silindrites on umbes 60 bari. Süsteemi tööpõhimõtte on suhteliselt lihtne. Igal katapuldil on kaks silindrit, mõlema pikkuseks 74 – 93 m, mis on paigaldatud otse lennukikandja raja alla. Silindri kolbide otstel on metallist kinnitus, mis ulatub läbi silindrite ülaosa asuva kitsa pilu. Kaks klappi ulatuvad läbi silindrite sulgevate kummist äärikute ja läbi stardiraja, kus need kinnituval väikese stardikelgu külge. Startimisel avatakse klappid, mis lasevad kõrgsurve auru silindritesse. Aur annab vajaliku jõu, et kiirendada lennuk suurele kiirusele. Esialgu on kolvid lukustatud oma kohale, nii et silindrite survet kasvatatakse järkjärgult. Startimiseks paneb piloot lennuki mootorid täisvõimsusele ning lennukit hoitakse spetsiaalse mehhanismi abil lukus. Seejärel vabastatakse silindri kolvid ning veeauruga kiirendatakse 20 000 kg lennuk 2 sekundiga 250 km/h. Lennuk läheb lendu ja kelk koos kolvidega sõidab veepidurdussüsteemi, mis pidurdab kogu süsteemi kiiruse maha. Seejärel tuuakse kolvid koos kelguga vintsisüsteemi abil tagasi stardipositsiooni. [1]

Üldise kontseptsiooni poolest on CATA tööpõhimõtte poolest sarnasem II maailmasõja ajal lennukikandjate peal kasutuses olnud hüdrauliliste katapultidega. Mõlemal süsteemil kasutatakse kiiruse kordistamiseks plokisüsteemi, liikumapanevaks energiaks on suruõhk, nõõri pingutamiseks on kasutusele nõõri pingutussüsteemid, lennuvahendid kiirendatakse läbi adapteri, mida hoitakse enne starti lukustatult ning lisaks on adapteri pidurdussüsteem. [2]

1.1 Turuanalüüs

Antud peatükis teostatakse magistritöös projekteeritava katapuldiga konkureerivate toodete turuanalüüs. Analüüsi eesmärgiks on tutvuda teiste konkureerivate tootjate katapultidega, uurida nende lahendusi ning seeläbi saada teadmisi erinevatest disainilahendustest ning nende tehnilistest andmetest ja katapuldi võimekustest.

Analüüsis uuritakse sarnase laskevõimekusega katapultide mudelid üle maailma, ehk fookuses on katapuldid, mis suudaksid 60 kg lennukit kiirendada kuni 50 m/s. Lisaks uuriti lennukikandjate katapultide tööpõhimõtteid, mida turuanalüüsis ei kajastata. Analüüsi põhihoiatus on erinevad disainilahendused ning kiirendus- ja pidurdussüsteemi tööpõhimõte. Kuna tegemist ei ole laiatarbekaubaga, osutus tõeliselt katsumuseks leida kasulikku infot erinevate tootjate kohta.

1.1.1 Meggit Defence System – MDS Hercules

Meggit Defence Systems UK on Inglismaal asuv kaitsetööstuse ettevõtte, mis on asutatud 1982 aastal. Ettevõtte kuulub Meggit PLC alluvusse. Meggit Defence Systems UK on maailma juhtiv lendavate sihtmärkide väljatöötaja, tootja ja käitleja. Katapult MDS Hercules on spetsiaalselt arendatud õhusihtmärgi startimiseks. [3]

MDS Hercules katapult on võimeline startima 250 kg lennuvahendi kiiruseni kuni 55 m/s. See saavutatakse madala 10 bar rõhuga pneumaatilise süsteemiga. Reelingule on võimalik kinnitada väga erinevate lennuvahendite adaptereid ning reelingu adapteri pidurdamine toimub veepiduriga. Süsteem koosneb kahest suure tootlikkusega kompressorist, mis võimaldavad tööõhu saavutada kuni 5 minutiga. Katapuldi põllul liigutamiseks on ratastele paigaldatud hüdro mootorid. Katapuldi juhtimine toimub juhtpaneeli abil, mis on võimalik viia katapuldist eemale, et tagada ohutus. Lähtestamise aega hoitakse minimaalsena, sest kompressorid on võimalik kelgu tagasitoomise ajaks sisse lülitada. Kogu katapult on projekteeritud üheteljelisele veoauto treilerile, mis vastab Euroopa nõuetele. [4]

Tabel 1-1. MDS Hercules tehnilised andmed [4]

| Mõõtmed | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Pikkus | 11.06 m – (Transpordiasend) |
| | 16.28 m – (Töoasend) |
| Laius | 2.26 m |
| Kõrgus | 2.9 m – (Töoasend) |
| | 2.65 m – (Transpordiasend) |
| Mass | 6000 kg |
| Katapuldi Andmed | |
| Maksimaalne lõppkiirus | 55 m/s |
| Maksimaalne lennuvahendi mass | 250 kg |
| Maksimaalne töö rõhk | 10 bar |
| Survestamise kiirus | Ligikaudu 1 bar / minutis |



Joonis 1-1. Meggit katapult MDS Hercules [4]

Antud süsteemi teeb eriliseks selle pneumosüsteem, mis kasutab ainult 10 bar maksimaalset töö rõhku ja et kelgu pidurdamiseks kasutatakse veepidurit, mille veepaaki on näha Joonis 1-1. Meggit katapult MDS Hercules [4] all vasakus nurgas. Veepidur teeb katapuldi lähtestamise pärast lasku mõnevõrra tülakaks ja aeganõudvaks. Pneumosüsteemi disaini kohta puudub täpsem kirjeldus ning seetõttu jääb selgusetuks kuidas reguleeritakse võimsust erinevate lennukiiruste ja lennuvahendi massi korral. Selge on see, et ainult 10 bar rõhu alandamisest ei piisa ning lisaks peavad nad reguleerima ka õhu ligipääsu peasilindrile. MDS Hercules on väga raske – 6000 kg ning seetõttu võib maastikul hätta sattuda.

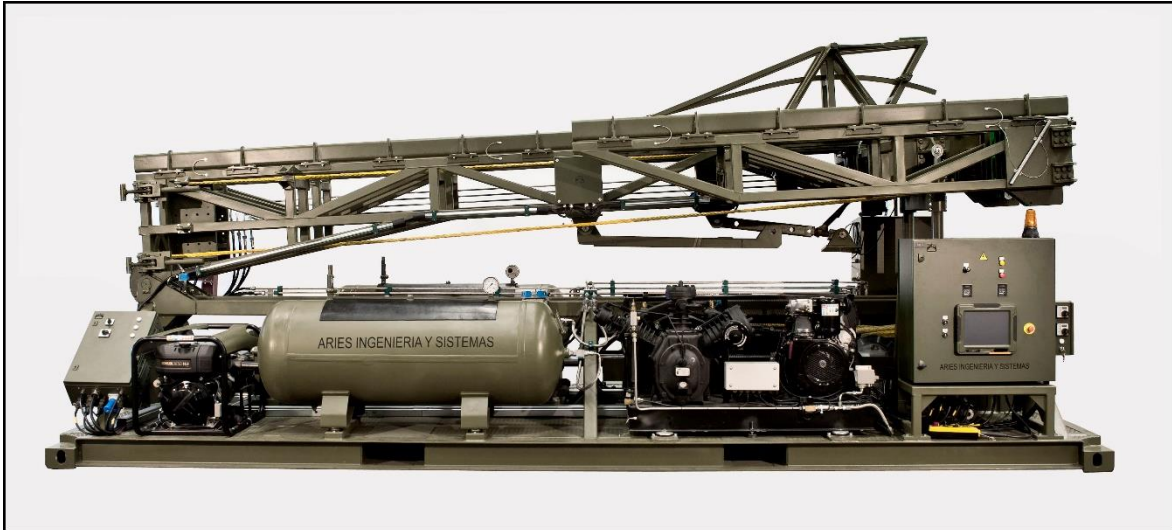
1.1.2 Aries Defence & Security ATLAS ME-01

Aries Ingeniería y Sistemas S.A. on 1985. aastal loodud Hispaania ettevõtte, mis on spetsialiseerunud testsüsteemide arendamisele auto-, raudtee- ja lennutööstusele. Ettevõtte reklaamib ennast kui UAV katapultide turu liidrit, kellel on süsteemide väljatöötamisega üle 13 aasta kogemust. Ettevõtte on spetsialiseerunud katapultide erilahenduste väljatöötamisele ning on võimelised disainima eri lennuvahendite masside ja lõppkiiruste jaoks katapulte. [5]

ATLAS ME-01 on mõeldud keskkalu mehitamata lennuvahendite jaoks. ATLAS ME-01 on projekteeritud transpordialusele, mis võimaldab selle lihtsalt paigaldada laevadele ja järelkärule ning kogu süsteem mahub pakituna ISO20 merekonteinerisse. Süsteem on täielikult kohandatav erinevate lennuvahendite jaoks, kasutab kõrgrõhu suruõhku, süsteem on kasutatav ekstreemsetes keskkondades, on väga hea töökindlusega ning vajab vähest hooldust. Kõik Aries katapultid kasutavad uudet disaini, milles kasutatakse kiirenduseks ja pidurduseks samat pneumosilindrit. [6]

Tabel 1-2. Aries Defence & Security ATLAS ME-01 tehnilised andmed [6]

| Lennuvahendi mass ja kiirus | |
|------------------------------------|------------------|
| Maksimaalne lennuvahendi mass | 150 kg |
| Maksimaalne lõppkiirus (200 kg) | 38 m/s |
| UAV katapultide andmed | |
| Pikisuunaline kiirendus | < 8g |
| Töötemperatuur | -32°C kuni +50°C |
| Esialgne ülesseadmise aeg | < 15 minutit |
| Lähtestamise aeg pärast lasku | < 5 minutit |
| Süsteemi mass | ~ 2 000 kg |



Joonis 1-2. Aries Defence & Security katapult ATLAS ME-01 [6]

Tehnilise poole pealt on näha süsteemi modulaarsus, kuid seeläbi ei tundu süsteem olevat väga ilmastikukindel. Enamus komponente ei ole tolmu ja vihma eest kaitstud. Reeling on valmistatud terasest sõrestikkonstruksioon, mis koosneb kolmest sektsioonist. Reelingu nurga muutmine toimub hüdraulikaga. Süsteem kasutab kahte kõrgrõhu pneumopaaki, mis tunduvad olevat pildi järgi ligikaudu 100 liitrised. Täpsema tööõhu osas puuduvad andmed. Kiirendussüsteemis kasutatakse plokisüsteemi, kuid kahjuks jääb samuti selgusetuks, kuidas pidurdussüsteem täpselt toimib. Analüüsidest pilti, tundub et reelingu ees on kaks plokiratast, ning reelingu kelk ühest rattast üle sõidab, hakkab süsteem tagurpidi tööle ning kelk pidurdatakse sama pneumosüsteemi abil maha. Samasugust süsteemi kasutavad väiksemad kuni 12 kJ katapultid.

1.1.3 Ruag Aviation DC4

Ruag Holding AG on üle 20 aastane kosmose, lennunduse ja maapealsete süsteemide arendamise ja tootmisega. Tegemist on väga suure kontserniga, kelle aastaseks käibeks on üle 1.8 miljardi, ning kus töötab üle 9000 töötaja. [7]

DC4 on antud ettevõtte ainuke katapult, mis on disainitud alusplatvormile, mida on võimalik kinnitada maapealsele pjedestaalile või veoauto järelhaagisele. DC4 on üks vähestest UAV katapultidest, mis kasutab lämmastiku ja hüdraulika kombinatsiooni, mis võimaldab neil startida kuni 350 kg lennuvahendeid. Tööpõhimõttelt tähendab see seda, et kelgu liikumine tekitatakse hüdraulikaga, kuid hüdraulikavedeliku energia salvestamiseks kasutatakse kõrgsurve all olevat lämmastikku, mille abil surutakse hüdraulikavedelik ühest silindrist teise ja seeläbi tekitatakse vajalik kiirendus. Kiirendussüsteem koosneb hüdrosilindrist ja trosside plokisüsteemist, mille abil

kiirendatakse kelku 18m pikkusel reelingul. Silindri algspositsiooni tagasitoomiseks kasutatakse peasilindrit kahepoolse hüdrosilindrina ning lämmastik surutakse esialgsesse paaki tagasi. Seeläbi on kogu süsteem täiesti kinnine. [8]

Tabel 1-3. Ruag Aviation DC4 tehnilised andmed [8]

| Lennuvahendi mass ja kiirus | |
|-----------------------------------------|------------------|
| Maksimaalne lennubahendi mass | 350 kg |
| Maksimaalne lõppkiirus (200 kg) | 55 m/s |
| UAV katapultdi andmed | |
| Maksimaalne töö rõhk | 350 bar |
| Pikkus – laskmisasendis | 18 m |
| Kõrgus – laskmisasendis ja 9° nurk | 3.8 m |
| Pikkus transpordiasendis | 5 m |
| Kõrgus transpordiasendis (ilma aluseta) | 1.7 m |
| Laius | 2 m |
| Mass | 4500 kg |
| Kiirendusmaa | 13.5 m |
| Laskenurk | 5° kuni 15 ° |
| Opereerimispinge | 24 VDC |
| Töötemperatuur | -30°C kuni +50°C |
| Säilitus ja transpordi temperatuur | -35°C kuni +70°C |



Joonis 1-3. Ruag Aviation katapult DC4 [8]

Tehnilisi andmeid analüüsid jääb selgusetuks, kuidas on lahendatud kelgu pidurdussüsteem. Arvestades kogu süsteemi massi, on reeling tõenäoliselt tehtud terasest, sest järelkäru mass ei ole arvestatud süsteemi kogumassi hulka. Selle süsteemi konstruktsioon erineb teistest märkimisväärselt, sest nende reeling voldib 4-ks osaks ning reelingul puudub tagumine tugijalg. Reeling jääb kokku pakitult 5° nurga

alla, mis võib tähendada, et reelingu kokku ja lahti voltimine toimub hüdraulikaga. Esile tuleb tuua ülejäänud süsteemi kompaktsuse, mille võimaldab energia salvestamine kõrgsurve lämmastikuballoonides. Kahjuks ei tule olemasolevast infost välja süsteemi ülesse seadmise aega ega iga lasu vahelist tagasitoomise aega.

1.1.4 Robonic Ohto

Robonic Ltd Oy on Soomes asuv ettevõtte, mis on katapultide arendamisega tegelenud juba 30 aastat ning ettevõtte põhitegevuseks on katapultide arendamine ja tootmine. Robonic on ettevõtte Safran Electronics And Defence tütarettevõtte. Robonic on praegu juhtiv ülemaailmne katapultide tarnija ning hetkel pakuvad nad enda tootevalikus kolme katapultit, üks väiksemate lennudevahendite stardiks ning kaks suuremat katapultit, millest üks on teise edasiarendus, vastavalt kolmas ja neljas generatsioon. Nende süsteemid on edukalt integreeritud enam kui 20 erineva õhusõiduki tüübiga ning kasutusel nii sõjaväe kui kommertsrakendustes. [9]

Robonic OHTO (MC1555LLR) on ettevõtte neljanda generatsiooni kõrgsurve pneumaatiline katapult, millel on lai võimuvahemik erinevate UAV masside ning lõppkiirustele. Katapult on disainitud töötama nii kuumas kõrbes kui külmas põhjamaas. Süsteem on projekteeritud veoauto järelkärana ning mahub pakituna ISO20 merekonteinerisse. Reeling koosneb kolmest sektsioonist ning kogu reelingu struktuur on valmistatud alumiiniumist. Katapult töötab kõrgrõhul ning peasilinder töötab nii pneumosilindriga kui ka hüdroosilindrina kelgu tagasitoomisel. See tagab ka pneumosilindri õlituse. Kelgu pidurdussüsteem on integreeritud kiirendussüsteemi silindriga. [9]

Tabel 1-4. Robonic OHTO tehnilised andmed [9]

| Lennuvahendi mass ja kiirus | |
|------------------------------------|-------------------|
| Maksimaalne lennuvahendi mass | 300 kg |
| Maksimaalne lõppkiirus (150kg) | 55 m/s |
| UAV katapultdi andmed | |
| Ülesse seadmise aeg | < 10 minutit |
| Töötemperatuur | -30°C kuni + 45°C |
| Lähtestamise aeg pärast lasku | < 3 minutit |
| Transpordi kiirus | 80 km/h |
| Süsteemi mass | 3500 kg |
| Laskenurk | 8 - 12° |
| Pikkus – transpordiasend | 5400 / 7450 mm |
| Pikkus – tööasend | 16100 mm |
| Laius | 2100 mm |
| Kõrgus | 1950 mm |



Joonis 1-4. Robonicu katapult OHTO [9]

Robonicu katapult on teistest süsteemidest märkimisväärselt põhjalikum kui ka keerulisem. Suurimaks erinevuseks on treileri tugijalad, millega toetatakse kogu treilerit, kui teistel tootjatel toetatakse reelingu tagumine osa maapinnale ning eest toetavad treileri rattad. See annab ka reelingu nurga muutmise suure vahemiku. Tehnilist teostust analüüsid selgus, et nende toodetel on kaks patenti - pneumosüsteemi lahendus, kus nad on integreerinud pneumo- ja hüdrocilindri lahenduse ning stardikiirendusest löökide vähendamine. Lisaks oli neil patenditaotlus sisse antud veel erinevatele lahendustele, kuid need olid teadmata põhjustel tagasi võetud või tagasi lükatud. Pneumo- ja hüdrocilindri lahenduse abil on neil võimalik pneumoga silindrit ühtpidi kiirendada ning kelgu tagasitoomiseks silindrit hüdrocilindrina kasutada ehk silindrit käitatakse nii pneumaatiliselt kui ka hüdrauliliselt. See võimaldas neil projekteerida väga kompaktsed süsteemi, mis on täielikult suletud. Katapultide lähtestamiseks surutakse peasilindris olev õhk paaki tagasi, seetõttu saavutatakse väga kiire lähtestamiskiirus pärast lasku. Teine kehtiv patent on mehhanism, mis võimaldab kiirendamisel vähendada lööke stardiadapterisse ja seeläbi märkimisväärselt vähendada lennavahendile mõjuvaid maksimaalseid kiirendusi. Kiirenduse liikumise ülekande tekitamiseks kasutatakse plokisüsteemi, millest ühe nõoriga kiirendatakse ning teise nõoriga pidurdatakse. Põhiliseks miinuseks on süsteemi mass, kolmas generatsioon kaalub 5500 kg, neljas generatsioon kaalub 3500 kg, kuid üheteljelise haagisega võib maastikul liikudes ikkagi probleeme tekkida. [10], [11]

1.1.5 Turuanalüüsi kokkuvõte

Turuanalüüsisist selgus, et katapultide tootjaid üle maailma on väga vähe. Erinevate tootjate tehnilised lahendused on väga erinevad, kuid silma paistis üks põhimõtteline sarnasus – liikumapanevaks jõuks on suruõhk ja kõikidel on ülekande tekitamiseks plokisüsteem, et hoida peasilinder lühikesena.

Turuanalüüsil on välja toodud nelja erineva tootja katapultid. Välja toodud süsteemid on üldiselt konstruktsioonilt üsna sarnased, kuid tehniliste lahenduste poolest on eristatav turul kauem tegutsenud ettevõtte, kes on spetsialiseerinud katapultide arendamisesse. Robonicu süsteem on arendatud ohutumaks ja kasutajasõbralikumaks ning nende süsteemiga on integreeritud kõige rohkem lennubahendeid.

Järgnevas tabelis on koondatud turuanalüüsis uuritud katapultide olulisemad andmed ning võrdluseks on lisatud magistritöös arendatava katapultide saavutatud tehniliste andmetega.

Põhjus, miks klient otsustas Threodi kasuks, oli asjaolu, et kliendile ei leidunud turul ühtegi sobivat toodet ja soovis endale sobivate parameetritega toodet, mis tuli välja arendada vastavalt etteantud nõuetele.

Tabel 1-5. Turuanalüüsis uuritud katapultide tehnilised andmed

| Omadus | MDS Hercules | ATLAS ME01 | RUAG DC4 | OHTO | THREOD CATA |
|--------------------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Maksimaalne lennubahendi mass | 250 kg | 150 kg | 350 kg | 300 kg | 150 kg |
| Maksimaalne lõppkiirus | 55 m/s | 38 m/s | 55 m/s | 55 m/s | 52 m/s |
| Süsteemi mass | 6000 kg | 2000 kg | 4500 kg | 3500 kg | 2200 kg |
| Laskenurk | - | - | 5° - 15° | 8° - 12° | 10° - 15° |
| Transpordikiirus | 90 km/h | - | 90 km/h | 80 km/h | 90 km/h |
| Reelingu pikkus | 16.28 m | - | 18 m | 16.1 m | 16.8 m |
| Mõõtmed (transpordiasend) | 11060 x 2260 x 2650 mm | - | 5000 x 2000 x 1700 mm | 5400 x 2100 x 1950 mm | 5800 x 2100 x 2030 mm |
| Töötemperatuur | - | -32°C - +50°C | -30°C - +50°C | -30°C - +45°C | -20°C - +55°C |
| Ülesse seadmise aeg | 10 minutit | <15 minutit | - | <10 minutit | <15 minutit |
| Lähtestamise aeg pärast lasku | 5 minutit | <5 minutit | - | <3 minutit | <5 minutit |

1.2 Ülesande püstitus

Vastavalt kliendi poolt etteantud spetsifikatsioonile, on magistritöö eesmärk projekteerida treilerile kinnitatud mehitamata õhusõiduki katapult, mis on võimeline 60 kg lennubahendi kiirendama lõppkiiruseni kuni 52 m/s. Kliendil oli endal väga selge nägemus, millistele nõuetele katapult peab vastama ning kliendi poolt tuli MIL-STD-490A standardile vastav põhjalik 30-leheküljeline spetsifikatsioon, kus oli välja toodud disaini põhiparameetrid ning nõuded. MIL-STD-490A lähtudes koostati kogu katapultide tehniline dokumentatsioon. Kliendi põhiprobleem olemasolevate lahenduste juures on süsteemi mass ja töökindlus. Saadavalolevad lahendused kaaluvad >3500 kg ning maastikul ja pehmel pinnasel jääb nendega kergesti kinni. Lisaks on probleeme olnud osade süsteemide töökindlusega, mistõttu on võimalik teha ainult paar lasku, kui tuleb hakata vahetama olulisi komponente. Seetõttu on süsteemi üleväljapidamine kulukas ning enamuse aega kulub hoolduse peale. [12]

Kogu projekti läbiviimise aeg oli väga lühike, toode tuli valmis arendada 6-kuuga. Arendusprojekt oli jagatud kolmeks põhietapiks: eelprojekti ülevaade (ingl. k – Preliminary Design Review), detailprojekti ülevaade (ingl. k. – Critical Design Review) ja tootmisvalmiduse ülevaade (ingl. k – Production Readiness Review). Eelprojekti ülevaatuses tuli luua kontseptsioon iga katapultide osa kohta, ning tõestama kliendile kuidas me oleme võimelised looma nõuetele vastava toote. Detailprojekti ülevaatuses olime lõpetanud projekteerimise ning esitlesime kliendile lõpptoodet – sealhulgas ka kõige väiksemaid alamkoostusid nagu juhtmetikku, süsteemi loogika ülesehitust ning kasutajaliidese disaini. Lisaks esitleti kliendile testspetsifikatsiooni, ehk kuidas ja mis kujul me prototüübi testimist läbi viime. Tootmisvalmiduse ülevaatuses esitleti kliendile tootmise iseärasusi ning näidati põhilisi koostamisjooniseid, et kinnistada kliendile disaini läbimõtlemit tootmiskeskseks projekteerimiseks. Kõik ülevaatused ning ülevaatusete läbiviimiseks vajaliku dokumentatsiooni läbiviimiseks juhitudi rahvusvaheliselt militaarstandardist tehniliste ülevaatusete läbiviimiseks - MIL-STD-1521B. [13]

Enne projekteerimise alustamist loodi põhjalik nõuete kaardistamise dokument, kus määratleti kliendi poolt sisendina tulnud põhinõuded. Põhinõuded jagati omakorda alamnõueteks, mille defineerisime ise vastavalt meiepoolse süsteemi disainile. Lisaks jagati alamnõuded vastavalt mehaanilisteks ja tarkvaralisteks nõueteks. Iga nõude kohta tuli selle kinnitamise kirjeldus, ehk kuidas me hiljem testimise iga nõude vastavust. Tegemist on väga

põhjaliku ning olulise dokumendiga, mille abil on võimalik kontrollida iga süsteemi osa vastavust nõuetele.

Kuna loodud põhinõuete dokument (ingl. k. Design Specification) on väga mahukas ning sisaldab ka salastatud informatsiooni kliendi ja disaini kohta, tuuakse siinkohal ainult osalised kliendipoolsed põhinõuded, millest süsteemi disainil lähtuti.

Tabel 1-6. CATA katapuldi kliendipoolsed põhinõuded

| Katapuldi jõudluse nõuded | | |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Lennuvahendi kaal | 35 kuni 60 kg (<i>ei sisalda lennuki adapteri massi</i>) |
| 2. | Lennuvahendi lõppkiirus | 35 kuni 52 m/s (<i>126 kuni 187.2 km/h</i>) |
| 3. | Maksimaalne aksiaalne kiirendus | 100 m/s ² või 10.2 g |
| 4. | Minimaalne püsiv telgkiirendus | >50 m/s ² või >5 g kauem kui 400ms |
| 5. | Maksimaalne vertikaalne / põiki kiirendus | 30 m/s ² või 3 g (<i>löögikoormus</i>) |
| 6. | Reelingu laskenurk | 10° kuni 15° |
| Katapuldi füüsilised ja operatiivsed nõuded | | |
| 7. | Maksimaalne reelingu pikkus | 18 m |
| 8. | Maksimaalsed nõuded kokkupandud asendis | 5.9 m x 2.35 m x 2.35 m |
| 9. | Ümberpaigutamisevõime | Peab mahtuma standardsesse 6m merekonteinerisse |
| 10. | Maksimaalne mass | 2000 kg |
| 11. | Operatiivne ülesseadmise aeg | < 15 minutit, kui opereeritud kolmeliikmelise meeskonnaga |
| 12. | Minimaalne aeg kapitaalremondi vahel | 200 lasku |
| 13. | Töökindlus | Ebaõnnestunud lasu tõenäosus peab olema väiksem kui 0.01 lasu kohta. |
| Muud olulised süsteemi osa nõuded | | |
| 14. | Madalrõhu suruõhu olemasolu | 6-8 bar (<i>kasutatakse puhastamiseks / rehvide täitmiseks</i>) |
| 15. | 24 VDC elektri väljundi olemasolu | 20 A alaline / 100 A kuni 1 sekundiks (<i>Väljundpinge peab vastama standardile MIL-STD-1275E</i>) |
| 16. | Transpordikasti olemasolu | Minimaalsed mõõtmed 55 x 40 x 25 cm (<i>kasutatakse varustuse hoidmiseks</i>) |
| 17. | Iseseisva elektrisüsteemi | Masin ei vaja opereerimiseks välist toidet |
| 18. | Lennuvahendi kiirendamiseks vajalik süsteem | Integreeritud sisemine pneumaatiline süsteem ja reeling |
| 19. | Süsteemi transporditavus ja juhitavus | Paigaldatud / integreeritud treilerisse, nelja rattaga, transpordituled, tänavalegaalne, rööbe – 1900mm |

| | | |
|-----|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20. | Süsteemi juhtpult | Stardikäsu andmiseks turvaliselt positsioonilt. 20m juhtmega ühendus süsteemi. |
| 21. | Stardiadapteri pidurdus reelingul | Stardiadapter ei tohi reelingult väljuda |
| 22. | Muudetav stardienergia seadistamise võime | Võimaldab operaatoril kontrollierist muuta stardienergiat erineva massi ja kiiruse jaoks |
| 23. | Nivelleerimissüsteem | Võimaldab operaatoritel tasandada süsteem kuni 5° kaldega maastikul |
| 24. | Hooldatavus | Plaanilise hoolduse nõuet tuleb hoida minimaalsena ning võimaluses disainis välistada |
| 25. | Keskkond | <ul style="list-style-type: none"> • Töötemperatuur -20° kuni +55° • Hoiustamistemperatuur -30° kuni +70° • Õhuniiskus: 0% kuni 100% • Vastupidavus tugevale päikesekiirgusele • Vastupidavus soolaudule • Vastupidavus liivatolmule • Vastupidavus keskkonnatasemele IP65. • Kõik keskkonna nõuded testitud vastavalt standardile MIL-STD-810G |

1.3 Kontseptsiooni loomine

Antud peatükis alustatakse katapuldi CATA süsteemi ülesehituse loomist, alustatakse kontseptsiooni loomisest ja teostatakse füüsikalised arvutused pneumaatilise kiirendussüsteemi kohta. Esialgsete füüsikaliste arvutuste baasil luuakse Matlab Simulink keskkonnas katapuldi pneumaatiline ja kinemaatiline mudel, mis võimaldab süsteem täpselt läbi simuleerida ning optimeerida töötama kindlas jõuvahemikus vastavalt etteantud tehnilistele andmetele.

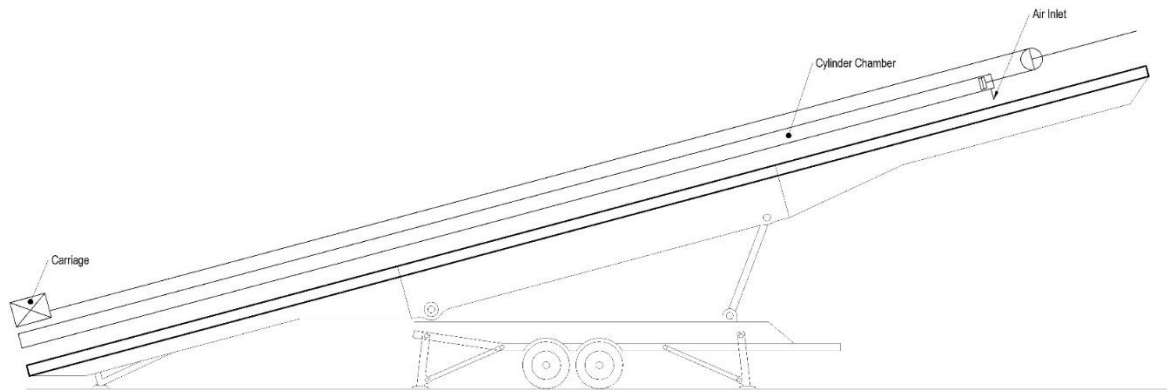
Vastavalt ülesande püstitusele peab katapuldi kiirendussüsteem vastama väga kindlatele tingimustele, mis on toodud alapeapeatükis 1.2 „Ülesande püstitus“. Lisaks tuleb täpsemast ülesande püstituselt välja, et süsteemi kasutuskeskkonna tingimused on väga karmid, ning süsteem peab töötama tugevas vihmas ja peenikese tolmu keskkonnas.

1.4 Pika pneumosilindriga katapuldi kontseptsioon

Kuigi kliendipoolset nõuet ei olnud, milline on katapuldi kiirendavaks mehhanismiks, selgus nii konkurente uurides kui ka esimesi analüüse tehes, et kõige mõistlikumaks lahenduseks on pneumaatiline katapult. Muud süsteemid ei võimalda sujuvalt reguleerida võimsust, on liiga keerulised või ei täida teisi nõudeid.

Esimene idee oli skaleerida ettevõtte praegust katapultit ning seeläbi suurendada kõiki komponente, et saavutada vastavus etteantud nõuetele. Praegune katapult on projekteeritud kuni 22 m/s lõppkiiruse jaoks 35 kg massi juures. Disain on suhteliselt robustne ja lihtne – katapult koosneb pikast reelingust ning reelinguga sama pikast eri alumiiniumprofiilist pneumosilindrist, mille sees liigub kolb. Õhk vabastatakse silindri eestotsast ning kolb ja kelk liiguvad 1:1 suhtega, kolb tõmbab kelku trossi abil. Sellise disaini puhul tuleks kasutada 16 m reelingut ning pneumosilinder peaks koosnema kolmest lahtikäivast sektsioonist, mis avavad süsteemi ilmastikule. Lisaks on kasutatav õhusurve piiratud ning süsteemi maksimaalne rõhk võib ulatuna ainult kuni 15 bar-ini. Täpsemate parameetrite saamiseks loodi lihtne Matlab Simulink pneumaatiline mudel, mis lubas erinevate stsenaariumite korral süsteemi tööd simuleerida. Simulatsioonist tuli välja, et õhupaagid peaksid 10 barise tööõhu juures olema ligikaudu 800 liitrit. Õhu sissevõtt silindrisse peab olema minimaalselt diameetriga 50 mm, et saavutada vajalik kiirendus ja seeläbi lõppkiirus. Optimaalseks kolvi läbimõõduks tuli 130 mm. Simulatsioonist tuli välja märkimisväärne probleem, süsteemi ei ole võimalik optimeerida usaldusväärselt töötama madalamatel võimsustel ning lisaks rõhu

alandamisele tuli muuta ka sissetuleva õhutoru läbimõõtu ning seeläbi kontrollida õhuvoolu kiirust.



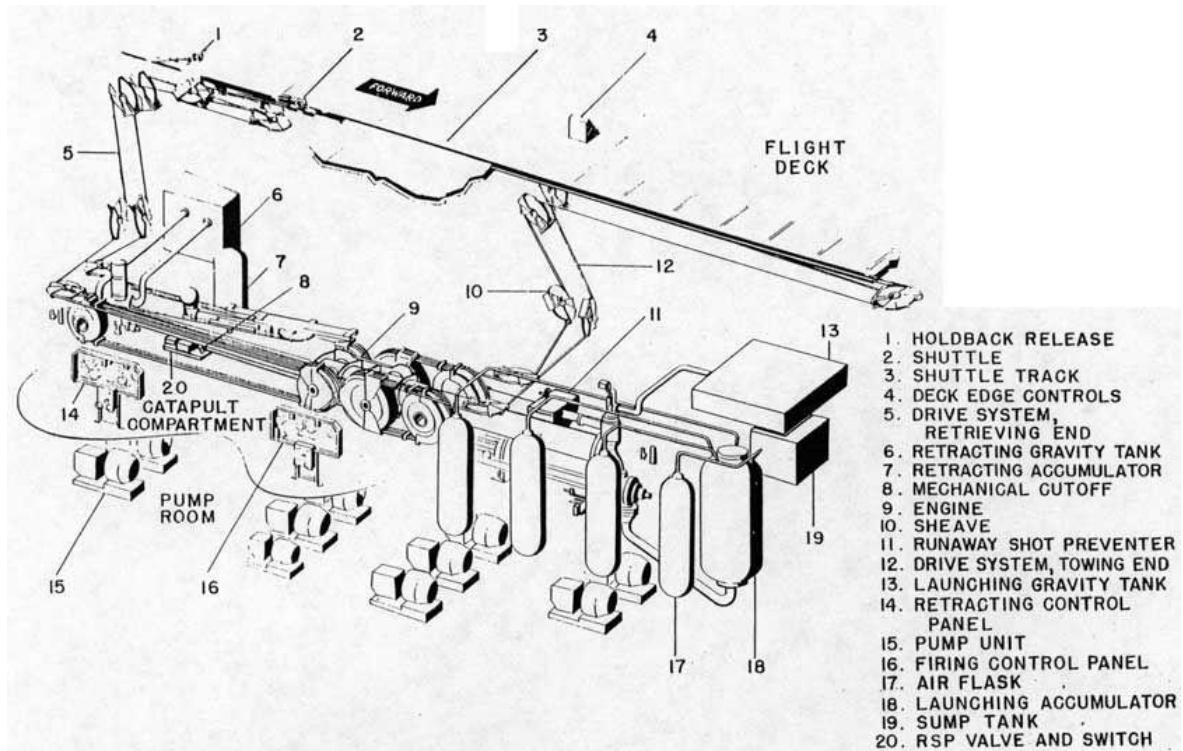
Joonis 1-5. Pika pneumosilindriga katapuldi tööpõhimõte

Lisaks simulatsioonimudelile analüüsiti süsteemi nõrkuseid ja tugevusi. Üks väga suur tugevus oli süsteemi üleüldine lihtsus – vähe komponente ja madala rõhu komponendid on odavad. Põhiline miinus oli süsteemi mitte reguleeritavus ning süsteemi on keerukas ilmastikukindlaks teha. Kuna üks nõuetest on tolmu / liiva kindlus siis antud lahenduses tuleks pneumosilinder täielikult sulgeda ka ühenduskohtadest. Kui liiv peaks silindri sisse sattuma, võib kolb sinna kinni kiiluda ning lennuki start seetõttu ebaõnnestuda. Lisaks tekkis probleem kelgu pidurdussüsteemi lahendamisel, sest kelk ja kolb liiguvad mõlemad suuremal kiirusel. Kõige mõistlikum lahendus oli veepidur, mis nõuab peale igit lasku membraani taastamist.

Kaalutledes antud kontseptsiooni miinuseid, otsustati et selle kontseptsiooni puhul ei ole võimalik tagada nõuetele vastavust ja süsteemi töökindlust ning loodi uus kontseptsioon.

1.5 Plokisüsteemiga katapuldi kontseptsioon

Teiseks ideeks oli kasutada plokisüsteemi ning luua sarnane süsteem nagu II maailmasõja aegsetel lennukikandjatel, kus olid kasutusel hüdrokatapuldid. Pneumaatiline ja hüdrauliline katapult on teineteisega tööpõhimõttelt küllaltki sarnased. Mõlemad kasutavad kiirendamiseks suruõhku. Pneumaatilise katapuldi korral suunatakse suruõhk otse peasilindrisse, hüdraulilise katapuldi puhul surutakse suruõhu abil hüdrovedelik peasilindrisse ning seeläbi kiirendatakse kelku.



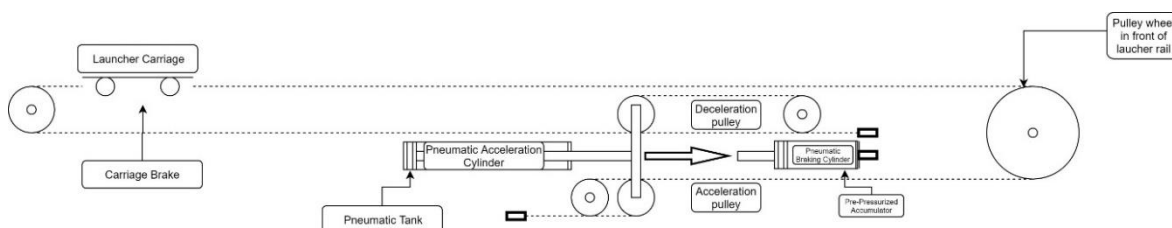
Joonis 1-6. Lennukikandja hüdrauliline katapuldi tööpõhimõte [2]

Antud kontseptsioonis kasutatakse lühikest pneumosilindrit ning plokisüsteemi, et kiirendada lennukivahend soovitud kiiruseni. Kuna kasutatakse plokisüsteemi, on võimalik peasilindri liikumiskiirust märkimisväärselt vähendada ning peasilindriks on võimalik kasutada kohandatud hüdroosilindrit. Seeläbi on peasilinder täielikult suletud ning vastupidav erinevates ilmastikutingimustes ning tolmus. Põhiliseks miinuseks antud süsteemi puhul on selle keerukus ning simuleerimiseks tuli luua Matlab Simulink Multibody mudel.

Süsteem koosneb kiirendusnõoriga ja pidurdusnõoriga. Mõlema nõori üks ots on kinnitatud stardiadapteri külge ning teine ots fikseeritud liikumatuks. Nõoriga jooksevad läbi plokisüsteemi ning plokisüsteem koosneb samuti kiirendusplokkidest ja pidurdusplokkidest ning töötavad teineteisele vastupidises suunas. See tähendab, et mõlema nõori pingsus on igal ajahetkel identne. Süsteemi analüüsis selgus, et kõige

optimaalsem on plokisüsteemiga stardiadapteri kiirust suurendada 8 korda. See tähendab, et kui stardiadapter liigub 52 m/s, siis peasilinder liigub 6.5 m/s. Stardiadapteri liikumine saavutatakse tänu peasilindrile kinnitatud plokimehhanismile, mis kiirendusnööri kaudu tõmbab stardiadapterit suhtega 1:8 ning pidurdusnööri kaudu antakse suhtele 8:1 nööri vastavalt järgi.

Sellega saavutatakse peasilindri liikumisulatus kuni 1.8m ning maksimaalseks peasilindri liikumiskiiruseks on 6.5 m/s. Seeläbi on võimalik kasutada peasilindriks hüdroasilindrit spetsiaalsete tihenditega. Peasilindri pikkuse vähendamiseks tuli suurendada süsteemi rõhku 100 barini, mis teeb süsteemi märkimisväärselt kallimaks komponentide ja kompressori hinna poolest. Võrreldes eelmise kontseptsiooniga on peasilindri jõud ligikaudu 10 korda suurem. Antud süsteemiga saavutati oluline nõue pidurisüsteemi integreerimiseks – maksimaalne kolvi liikumiskiirus on kuni 6.5 m/s. See tähendab, et võimalik on kasutada pneumaatilist õhupidurit, hüdraulilist pidurit või isegi tööstuslikku amortisaatorit. Pidurdussüsteem on paigaldatud samatelgselt peasilindriga ning pidurdatakse kogu peasilindrit ning seeläbi ka kelku, mis on pidurdusnööri ja plokisüsteemi kaudu ühenduses. Süsteemi töö rõhku suurendades on võimalik kasutada väiksemat survepaaki ning seeläbi saavutada kaaluvõit. Kuna kogu kiirendus ja pidurdussüsteem on võimalik paigutada katapultil sisuliselt ükskõik kuhu, on võimalik kogu süsteem projekteerida kinniseks, et operaator ei saaks kuskile vahele jääda ning seeläbi on süsteem märkimisväärselt ohutum.



Joonis 1-7. Plokisüsteemi kontseptsioon

Põhiliseks miinuseks on antud süsteemi keerukus. Süsteem koosneb väga paljudest osadest ja kõrgsurve kompressorid ning liitmikud on tunduvalt kallimad madalarõhu komponentidest. Lisaks peab looma süsteemi peasilindri määrimiseks et õlitada tihendeid ja vältida silindri sisepinna korrosiooni.

Uurides konkurentide tooteid ning võrreldes pika pneumosilindri ja plokisüsteemi simulatsioonitulemusi, jätkati arendust plokisüsteemiga katapultide arendamisel. Põhiliseks otsustuskohaks osutus pidurdussüsteemi disainimine, mis plokisüsteemi puhul on võimalik projekteerida töökindlaks ja lihtsaks. Süsteem on tunduvalt ohutum, kuna suurel kiirusel liigub ainult stardiadapter. Lisaks on antud süsteemiga on võimalik tagada kõikidele nõuetele vastavus.

1.6 Esialgsed füüsikalised arvutused

Probleemist täpsema ülevaate saamiseks ning esialgsete parameetrite määramiseks on kõige otstarbekam alustada füüsikalistest arvutustest. See võimaldab lihtsalt saada minimaalse reelingu pikkuse ning seeläbi arvestada välja ülejäänud süsteemi osad.

Sisendparameetrid arvutusteks:

- Stardiadapteri mass (esialgne hinnang) – 30 kg
- Lennuki adapter mass (esialgne hinnang) – 15 kg
- Lennuvahendi mass - 60 kg

1.6.1 Reelingu pikkus

Nõuetest on määratud, et UAV maksimaalne kiirus on 52 m/s ning see võimaldab meil arvutada reelingu vajaliku pikkuse, arvestades et maksimaalne kiirendus ei ületaks 10.2 g.

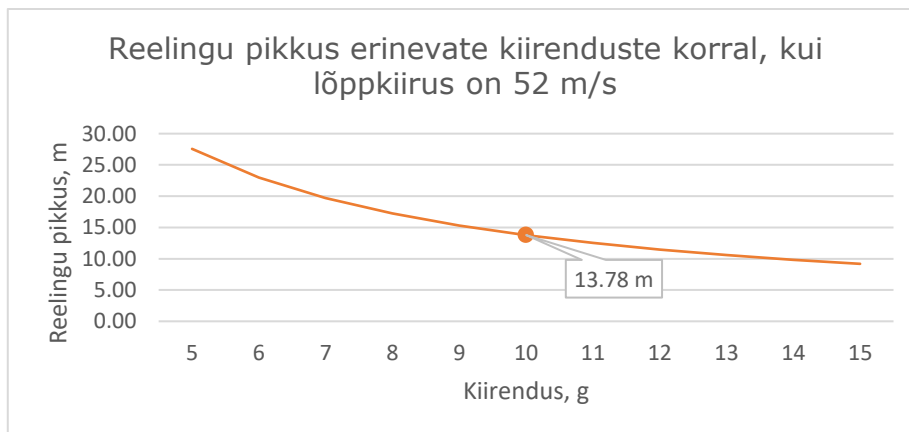
Kasutatav valem reelingu pikkuse arvutamiseks:

$$d = v_0 \cdot t + \frac{1}{2}at^2 \quad (1)$$

kus

a – kiirendus, m/s^2 ;
 v_0 – algkiirus, m/s ;
 v – lõppkiirus, m/s ;
 t – nõutud aeg, s ;

Erinevate reelingu pikkuste arvutamiseks kasutati Exceli tabelit, mis võimaldas erinevate kiirenduste korral leida minimaalse reelingu pikkuse.



Joonis 1-8. Graafik reelingu pikkuste kohta erinevate kiirenduste korral, kui lõppkiirus on 52 m/s

Arvutustest järeldub, et konstantse 10 g kiirendusega on reelingu minimaalseks pikkuseks 13.78 m. See on väga oluline info, millest võib järeldada, et on tagatud piisav varu pidurdussüsteemi jaoks.

1.6.2 Katapuldi põhiparameetrid

Vajalik kinemaatiline energia

Kuna plokisüsteemi puhul on kiirendussüsteemil lisamass silindrivarda ja plokkide näol, suureneb vajalik kinemaatiline energia ning lisamassi tuleb arvutustes arvestada.

Stardiadapteri, lennuvahendi adapteri ja lennuvahendi (60 kg) kiirendamiseks 52 m/s vajalik kinemaatiline energia ehk maksimaalne lennuvahendi mass ja lõppkiirus.

$$E_k = \frac{mv_{T0}^2}{2} = \frac{105 \cdot 52^2}{2} = 141960 \text{ J} = 142 \text{ kJ} \quad (2)$$

kus

E_k – kinemaatiline energia, J;

m – kiirendatav mass – stardiadapter (30 kg), lennuvahendi adapter (15 kg), lennuvahend (60 kg), kg;

v_{T0}^2 – lõppkiirus, m/s;

Stardiadapteri, lennuvahendi adapteri ja lennuvahendi (35 kg) kiirendamiseks 35 m/s vajalik kinemaatiline energia ehk minimaalne lennuvahendi mass ja lõppkiirus

$$E_k = \frac{mv_{T0}^2}{2} = \frac{80 \cdot 35^2}{2} = 49000 \text{ J} = 49 \text{ kJ} \quad (3)$$

kus

E_k – kinemaatiline energia, J;

m – kiirendatav mass – stardiadapter (30 kg), lennuvahendi adapter (15 kg), lennuvahend (35 kg), kg;

v_{T0}^2 – lõppkiirus, m/s;

Lisaks tuleb arvestada silindrivarda ja plokisüsteemist tulenevat lisamassi, mille ennustatav mass on ligikaudu 100 kg ning süsteemi lõppkiirus on plokisüsteemist tulenevalt kuni 6.5 m/s

$$E_k = \frac{mv_{T0}^2}{2} = \frac{100 \cdot 6.5^2}{2} = 2218 \text{ J} \approx 2,2 \text{ kJ} \quad (4)$$

Sellest järeldub, et plokisüsteemile massi lisamine mõjutab ülejäänud süsteemi kinemaatilist energiat tegelikult väga vähe ning projekteerimise faasis ei pea väga palju optimeerima, et antud kohas massi võita. Oluline on optimeerida stardiadapterit, sest seal on võimalik pidurdussüsteemile mõjuvaid jõudusid märkimisväärselt vähendada.

Lisaks tasub süsteemis arvestada teatavaid kadusid hõõrdumisele ja õhutakistusele, mistõttu võtame täiendavaks lisakoormuseks 5 %.

Süsteemi maksimaalne kinemaatiline energia on seega:

$$E_k = (142 + 2,2) * 1.05 = 151,41 \text{ kJ} \quad (5)$$

Vajalik peasilindri kolvijõud

Süsteemi kontseptsioonist ning projekteerimisest selgus, et kõige optimaalsem on peasilindri töökäik 1.8125 m, mis saavutatakse 8-kordse plokisüsteemi ülekandega. 8-kordne ülekanne võimaldab 4 plokiratast mahutada reelingu vahele. Antud arvutusest selgub, kui suurt jõudu peab peasilinder tekitama, et tekitada vajalik kinemaatiline energia.

$$E_k = F_{Piston} \cdot S_{rail} \Rightarrow F_{Piston} = \frac{E_k}{S_{rail}} = \frac{151410}{1.8125} = 83536 \text{ N} \approx 84000 \text{ N} \quad (6)$$

kus

F_{piston} – Peasilindri jõud, N;
 S_{rail} – Peasilindri käik, m;

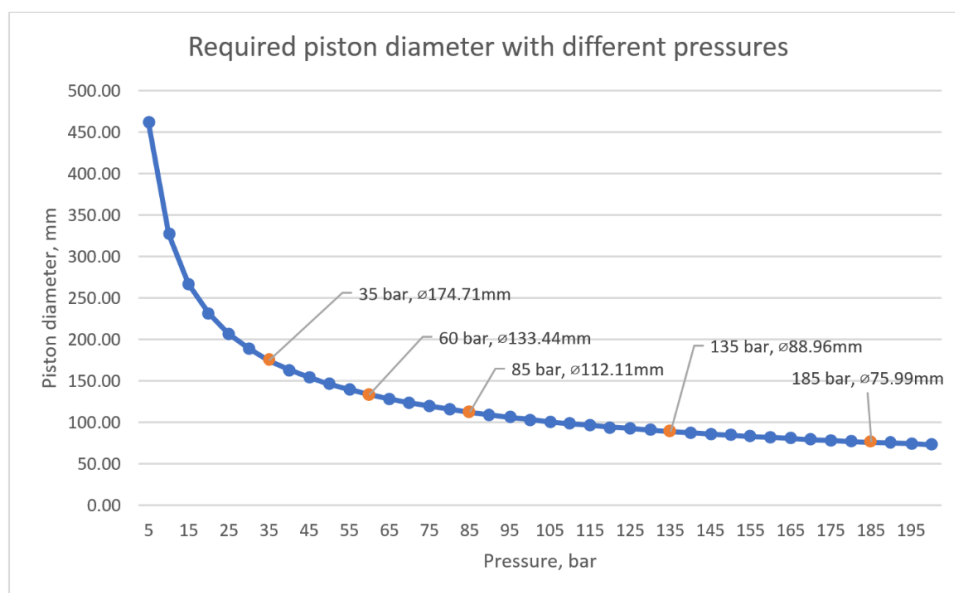
Peasilindri kolvi diameeter

Peasilindri kolvi diameetri arvutamiseks kasutati Exceli tabelit, mis võimaldas kolvi diameetrit valida vastavalt peasilindri töö rõhule. Oluline sisendparameeter on silindri poolt tekitatud jõud.

$$P = \frac{F_{piston}}{A_{piston}} = A_{piston} = \frac{F_{piston}}{P} \quad (7)$$

kus

A_{piston} – Kolvi pindala, mm²;
 P – Rõhk, N/mm²;



Joonis 1-9. Vajalik kolvi diameeter erinevate töö rõhkude korral

Kolvi diameetri esialgne valik tugines erinevate kompressorite uurimisele ning otsustamisele, millist töö rõhku oleks ohutu kasutada. Vastavalt kogutud infole otsustati kasutada 100 bar-ist töö rõhku ning vastavalt sellele tuli peasilindri läbimõõduks 100mm.

Silindri töömaht

Eelnevalt sai valitud töösilindri kolvi diameetrigks 100 mm ning töö rõhuks 100 bari. Silindri töökäik 1.8125 m.

$$V_{cylinder} = A_{piston} \cdot S_{rail} = 0.00785398 \cdot 1.8125 = 0.014235 \text{ m}^3 \quad (8)$$

kus

$V_{cylinder}$ – peasilindri ruumala, m^3 ;
 S_{rail} – silindri töökäik, m ;

Peasilindri käigu aeg

Kiirustest ülevaate saamiseks on oluline teada peasilindri töökäigu aeg.

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot S_{rail}}{1 \cdot a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.8125}{1 \cdot \left(\frac{10}{8}\right) \cdot 9.81}} = 0.5437 \text{ s} \quad (9)$$

kus

t – töökäigu aeg, s ;
 a – raskuskiirendus, m/s^2 ;

Õhupaagi mahutavus

Õhupaagi mahutavuse arvutustes tuleb arvestada rõhulangust, kui silinder liigub lõppasendisse. Mida suurem on rõhulangus, seda väiksem on kolvi poolt tekitatud jõud ja seetõttu väheneb ka kiirendus.

Arvutustes arvestame, et esialgne rõhk on 110 bar ning kui kolb on jõudnud lõppasendisse, langeb rõhk 90 barile. Nominaalrõhk on seega 100 bar.

$$V_{tank} = \frac{V_{cylinder}}{\left(\frac{P_{max}}{P_{min}}\right)^{0.714} - 1} = \frac{0.014}{\left(\frac{110}{90}\right)^{0.714} - 1} = 0.0876 \text{ m}^3 \approx 90 \text{ l} \quad (10)$$

kus

V_{tank} – õhupaagi ruumala, m^3 ;
 $V_{cylinder}$ – peasilindri ruumala, m^3 ;
 P_{max} – maksimaalne rõhk paagis enne kolvi liikumist, bar ;
 P_{min} – minimaalne rõhk paagis peale kolvi tööliikumist, bar ;

Nõutav voolukiirus silindri täitmiseks

$$Q = \frac{V_{cylinder}}{t} = \frac{0.014}{0.5342} = 0.0262 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11)$$

kus

Q – minimaalne nõutud voolukiirus, m^3/s ;

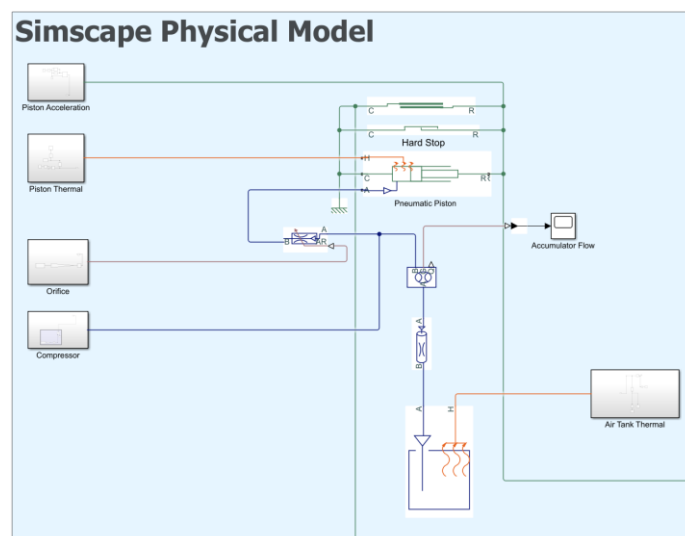
Enamus arvutusi teostati Exceli tabeliga, et leida optimaalsed parameetrid süsteemi toimimiseks. Esialgsetest arvutustest järeldub, et antud nõuetega süsteemi on võimalik täiesti teostada ning on võimalik jätkata edasiste etappidega ning luua täpsem katapuldi simulatsioonimudel, mis võimaldab arvestada erinevate muutujatega nagu hõõrdumine ning torustikus õhu liikumine.

1.7 Simulatsioonimudeli loomine Matlab Simulink keskkonnas

Selles alapeatükis keskendutakse katapultdi simulatsioonimudeli loomisele Matlab Simulink keskkonnas. Esimeseks luuakse pneumaatika osa matemaatiline mudel ning seejärel seotakse see 3D füüsilise mudeliga.

Alustati pneumaatilise osa matemaatilisest mudelist, mis koosneb põhiliselt kolmest komponendist – pneumosilindrist, õhupaagist ning torustikust. Väga sarnane katapultdi mudel on loodud kunagi Pakistanis DHA Suffa Ülikooli, ning seeläbi saadi idee, et Matlab Simulink keskkonnas on võimalik sellist pneumosüsteemi simuleerida ning otsustati kogu katapultdi pneumosüsteem koos lihtsustatud CAD mudeliga programmis läbi simuleerida. [21]

Mudelis on süsteemi komponentide väärtused kirjeldatud parameetritega, mis teoreetiliselt võimaldab süsteemi automaatselt optimeerida erinevate meetoditega, näiteks Monte Carlo simulatsiooniga. Peamudelis on ühepoolne pneumosilinder, millega on ühendatud „hard stop“, millega defineeritakse silindri töökäik ja lisaks on ühendatud translatiivne hõõrdumine, millega defineeritakse erinevad hõõrdumised silindris. Silindri kolvi kiirenduse mõõtmiseks on loodud eraldi alamplokk. Simscape ei luba pneumosilindrit ilma soojusvahetuse mudelit loomata, seetõttu on soojusvahetuse mudel loodud nii pneumosilindrile kui ka õhupaagile. Kuna antud rakenduses on tsükliite arv väga väike, kuni 6 lasku tunnis, jääb süsteemile piisav mahajahtumise / soojenemise aeg ning kiirest õhu liikumisest tulenevat soojusvahetust otseselt ei uuritud, kuid sellegi poolest tuli sealt välja huvitavaid nähtusi. Rõhupaak koos torustikuga on samuti parameetritega defineeritud ning arvestatud on toru sisediameetrid ja toru pikkust. Rõhu avamine silindrisse toimub läbi avause muutuse.



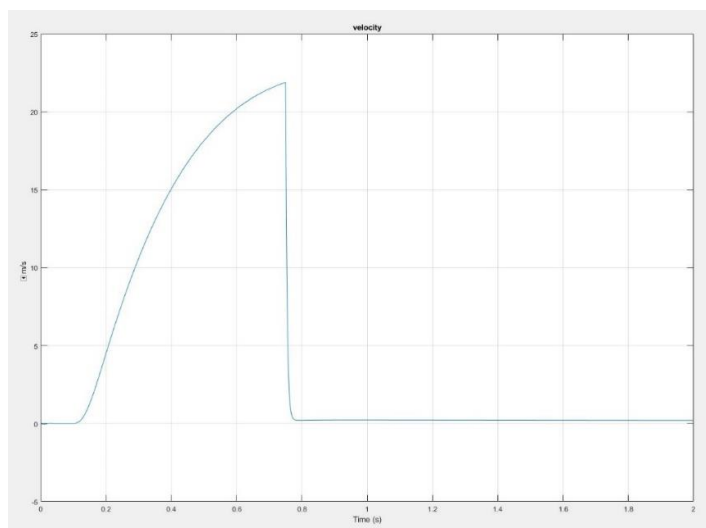
Joonis 1-10. Matlab Simscape matemaatiline mudel

1.7.1 Simulatsioonimudeli valideerimine

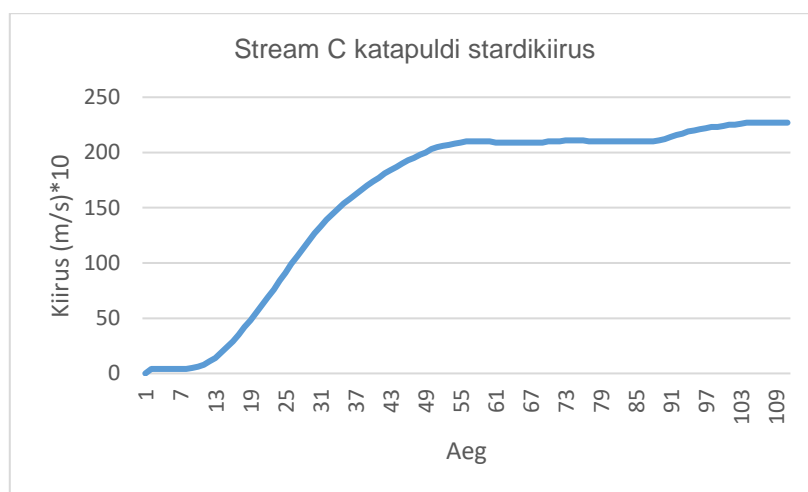
Simulatsioonimudeli valideerimiseks kasutati Threod-i esimese katapuldi mudelit, millega starditakse Stream C lennubahendit. Kuna Stream C katapult kasutab pikka pneumosilindrit, saab katapultit otse matemaatilises mudelis simuleerida, lisades pneumaatilisele silindrile massi – lennubahendi mass + stardiadapteri mass ning lisaks erinevad hõõrdumised.

Tabel 1-7. Stream C katapuldi sisendandmed simulatsioonimudelisse

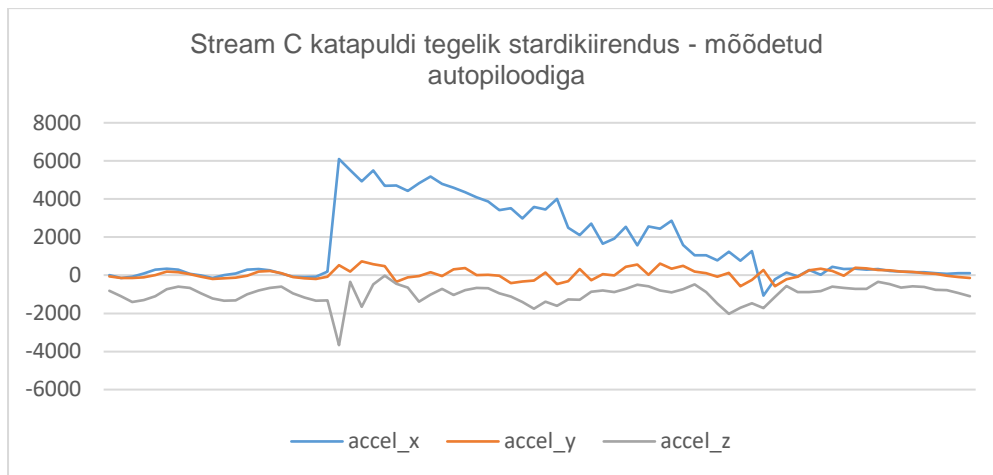
| | |
|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| Reelingu pikkus | 9.2 m |
| Kolvi pindala | 4545 mm ² = 0.004545 m ² |
| Rõhk | 1 Mpa = 10 bar |
| Minimaalne silindri sisselaskeava | 32 mm |
| Mass (lennubahend + stardiadapter) | 40 kg |
| Õhupaagi maht | 100 l |
| Lisatud hõõrdumine | Break away friction, Coulomb damping |



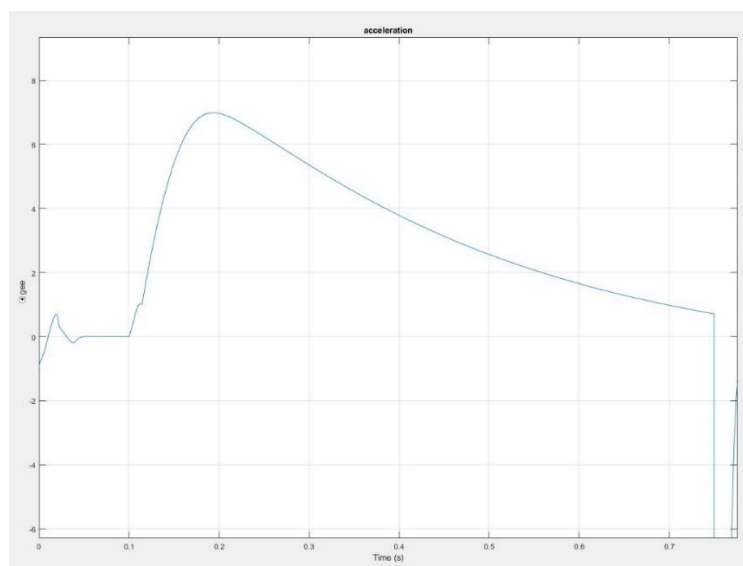
Joonis 1-11. Stream C katapuldi simulatsioonimudeli kiiruse graafik - lennubahendi lõppkiirus - ~22 m/s



Joonis 1-12. Stream C katapuldi tegelik stardikiiruse graafik - mõõdetud autopiloodiga - Lõppkiirus 22 m/s



Joonis 1-13. Stream C tegelik stardikiirenduse graafik



Joonis 1-14. Stream C katapultide simulatsioonimudeli stardikiirenduse graafik

Kuna autopiloodi andurid ei ole mõeldud nii täpseks mõõtmiseks ning täpsemad mõõtevahendid antud ajahetkel puudusid, esineb tegelikes andmetes väga palju müra. Ometi võrreldes simulatsioonimudeli graafikuid tegelike andmetega, on selgelt näha sarnaseid omadusi. Näiteks võrreldes lõppkiiruse graafikuid, saavutatakse mõlemal juhul sama lõppkiirus ning kiiruste graafikute kõverad alluvas sarnasusele. Kiirenduse graafikutelt on võimalik saada täpsemat infot tunnusjoonte kohta. Tegelik kiirendusgraafikus alustab katapult kiirendusega $\sim 6g$ ning lõpus langeb kiirendus kuni $1g$. Väga sarnaselt käitub ka simulatsioonimudel, kus alustatakse $\sim 7g$ kiirendusega ning seal langeb see samuti $1g$ peale. Kuna autopiloot on lennukis vibratsioonipatjadel, tuleneb sealt ka võimalik erinevus kiirenduse alguses.

Ometi võib simulatsioonimudeli tulemusi kõrvutades tegelike andmetega järeldada, et antud simulatsioonimudelit on võimalik tõhusalt kasutada katapultide erinevate parameetrite kohandamiseks.

1.7.2 Plokisüsteemiga katapuldi simulatsioonimudel

Kontseptsiooni luues selgus, et kõige parem nõutele vastavus on võimalik saada, kui luua plokisüsteemiga katapult. Simulatsiooni loomiseks kasutati Matlab Simulink moodulit nimega Multibody, mis on väga võimekas moodul simuleerimaks erinevaid pneumosüsteeme ja hüdrostsüsteeme. Multibody simulatsioonimudeli loomiseks projekteeriti Solid Edge tarkvaras kontseptsioon, kuidas plokisüsteem võiks toimida ning seejärel imporditi mudel Simulink keskkonda. Andud 3D mudel ühendati omavahel eelnevalt loodud pneumaatilise mudeliga.

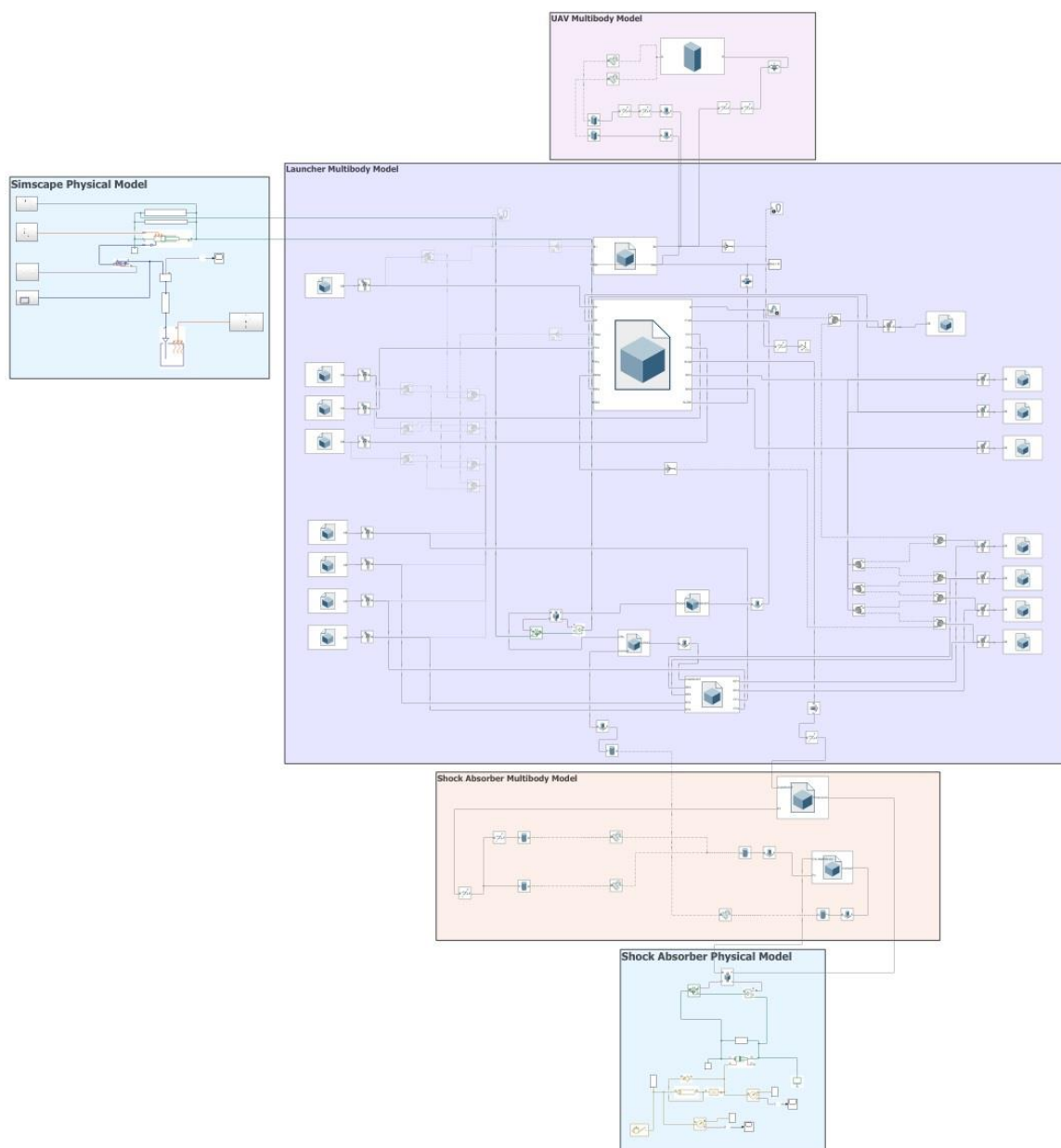


Joonis 1-15. Matlab Multibody katapuldi simulatsioonimudel

Antud mudeli keerukus kasvas väga kiiresti, avastades erinevaid programmi võimalusi. Mudel koosneb täispikast reelingust, millel liigub stardiadapter. Reelingu külge on kinnitatud peasilinder koos plokisüsteemiga. Mudelis on täielikult simuleeritud kõik kasutatavad plokirattad, iga plokiratta diameetrit on võimalik muuta, lisada laagrite veerehõõrdeid ja plokirattad on omavahel ühendatud nõoriga, mida programm on võimeline simuleerima. Lisaks on võimalik muuta gravitatsiooni, reelingu nurka, stardiadapteri veerehõõrdumist, stardiadapteri massi, lennubahendi massi, plokisüsteemi massi, silindrivarre massi – kõikide komponentide parameetreid mis mõjutavad süsteemi võimekust.

Kui esialgu oli plaanis simuleerida ainult kiirendussüsteemi, siis esialgsetest arvutustest ja simulatsioonist selgus, et jõud mida peasilinder tekitab ning et kelgu mahapidurdamisel lähevad jõud väga suureks, siis on vaja ka pidurdussüsteemi läbi simuleerida, et saavutada süsteemi suur töökindlus ning vältida suuri tagasilööke prototüübil. See nõudis kahte edasiarendust mudelisse. Esiteks tuli luua lennubahendi

mudel, mis eraldub stardiadapterist reelingu lõpus. Põhijõud pidurdamisel tuleb stardiadapteri massi ja kiiruse koosmõjul ning simulatsioon oleks vale, kui stardiadapteri mass oleks koos lennubahendi massiga koos. Selleks tuli luua stardiadapterile kontaktjõud ehk hõõrdejõud, mis hoiab lennubahendit ühes suunas kinni ning kui stardiadapteri hakatakse pidurdama, jätkab lennubahend oma trajektooriga. Teiseks tuli luua amortisaatori mudel. Amortisaatori mudeli simuleerimise tegi keeruliseks kontaktpindade äratundmise lisamine, mis tähendab et kui peasilinder liigub amortisaatorini ning puudutab amortisaatorit, hakkab amortisaator tööle ja pidurdab peasilindrit ning läbi selle stardiadapterit. Amortisaator on seotud matemaatilise Simscape mudeliga, ning sisuliselt on tegemist hüdrotsilindriga, mis on ühendatud akumulaatorpaagiga ning muutuva suurusega torustikust.



Joonis 1-16. Plokisüsteemiga katapultide simulatsioonimudel - loodud Matlab Simulink keskkonnas

1.7.3 Simulatsiooni tulemused

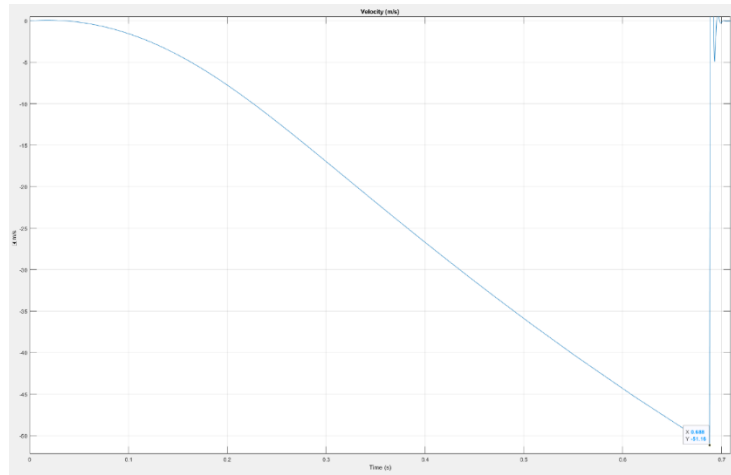
Simulatsioon andis väga väärtuslikke tulemusi ning projekti edasistes projekteerimisetappides oli võimalik tagasi tulla simulatsioonimudeli juurde ning saada kiiresti väga olulist infot, nagu peasilindri poolt tekitatud jõud, plokirataste kiirused, pidurdussüsteemile mõjuvad jõud jne. Tänu koostatud mudelile hoiti väga palju aega kokku nii projekteerimiselt kui ka erinevatelt arvutustelt, mis oleks tulnud teostada käsitsi. Mudel võimaldas süsteemi optimeerida ning valida komponendid, et saavutatakse lõppkiirus 52 m/s, sealjuures keskmise kiirendusega alla 10 g. Lisaks oli võimalik eelprojekti ülevaates kliendile ära tõestada, et sellise süsteemi loomiseks ollakse võimelised ning tänu simulatsioonimudelile täideti selles etapis mitu olulist punkti süsteemi ülesehituse kohta.

Simulatsioonist tulid optimeerides välja katapuldi pneumosüsteemi põhiparameetrid. Võrreldes käsitsi arvutatud väärtustega selgus, et käsitsi arvutatud väärtused on väga ligilähedased simulatsioonist saadud väärtustega, kuid esines teatud kõrvalekalle. Põhiline erinevus tekkis peasilindri kolvi läbimõõdust, mida tuli vajaliku kiirenduse saavutamiseks oli optimaalne tõsta 125 mm peale. Ka 100 mm diameetriga silinder oleks töötanud, kui rõhku märkimisväärselt tõsta, kuid seda ei tahetud ohutuse seisukohalt teha. Süsteemi parameetreid määrates tuli pidevalt uurida turul saada olevaid komponente ning nende tarneaegu ja hindasid, et vältida valimast peasilindri diameetrit, mis oleks valmistatud täielikult eritellimusel.

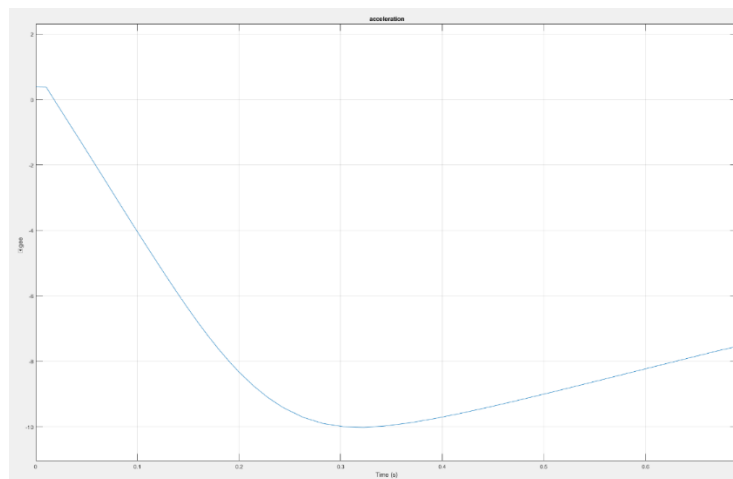
Tabel 1-8. Simulatsioonist tuletatud väärtused süsteemi komponentidele

| | |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|
| Reelingu pikkus | 16.8 m |
| Kiirendusmaa pikkus | 13.2 m |
| Pneumosilindri kolvi diameeter | 125 mm – standardmõõt |
| Pneumosilindri töökäik | 2000 mm |
| Töörõhk | Kuni 110 bar |
| Minimaalne sisselaskeava diameeter | 25 mm |
| Maksimaalne stardiadapteri ja lennuvahendi adapteri mass | 45 kg |
| Õhupaagi suurus | 100 l |

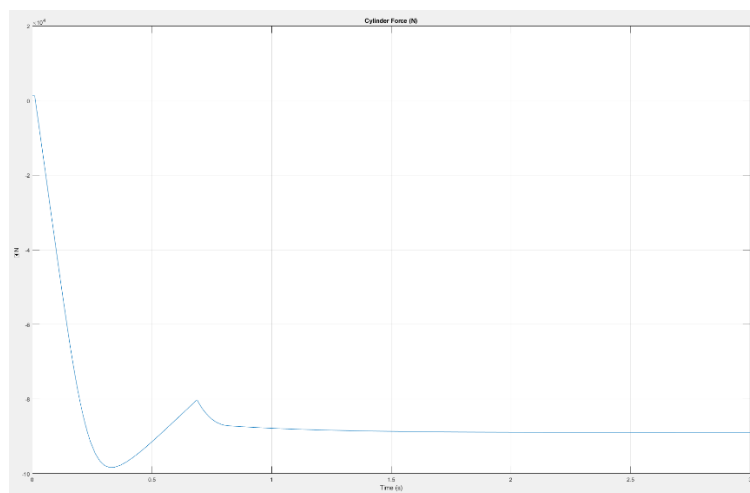
Simulatsioon võimaldas testida süsteemi tööd erinevate töörõhkude juures. Oluline oli üle kontrollida, et vastatakse nõuetele nii maksimaalse lennuvahendi massi kui stardikiiruse juures kui miinimumi juures. Esimeseks kontrolliti maksimaalse massi – 60 kg ja maksimaalse lõppkiiruse juures 52 m/s. Sellise stardi jaoks oli vajalik töörõhk 110 bari.



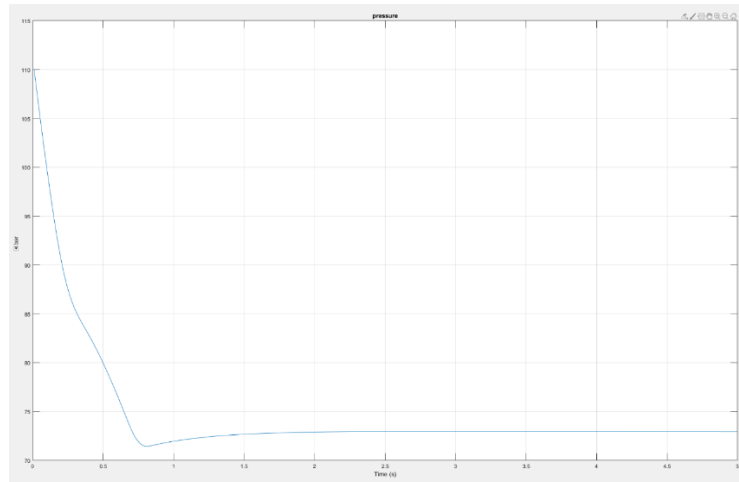
Joonis 1-17. Lennuvahendi lõppkiiruse simulatsiooni tulemused. Lennuvahendi mass 60 kg, töö rõhk 110 bar



Joonis 1-18. Lennuvahendi kiirenduse simulatsiooni tulemused. Lennuvahendi mass 60kg, töö rõhk 110 bar

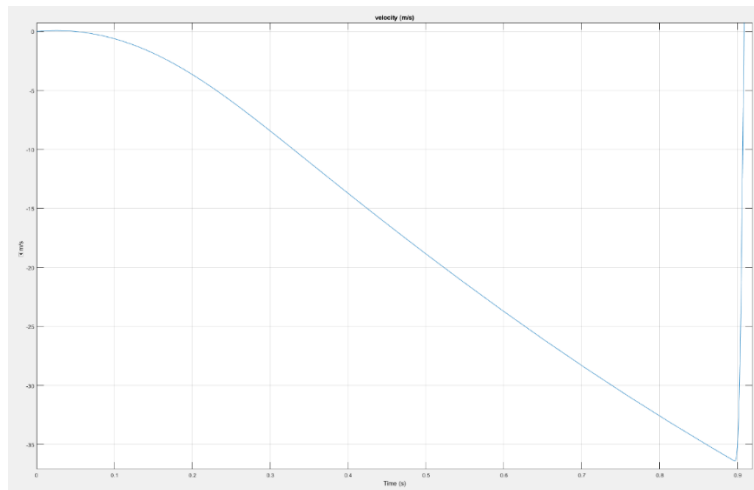


Joonis 1-19. Simulatsiooni tulemused - Pneumosilindri poolt tekitatud jõud



Joonis 1-20. Simulatsiooni tulemused - rõhulangus õhupaagis

Lisaks kui leida tööõhk, millega katapult töötab niidelda minimaalsetel väärtustel, võib olla kindel, et kogu katapultdi nõutud võimsusvahemik on täielikult kaetud. Minimaalne lennuvahendi mass on 35 kg ning minimaalne kiirus on 35 m/s. Selline lõppkiirus saavutatakse, kui kasutatakse 45 barist tööõhku.



Joonis 1-21. Simulatsiooni tulemused - lõppkiirus 35kg massi ja 45 barise tööõhu juures

Simulatsioonist saadi väga oluline info süsteemi edasi projekteerimiseks, sest nüüd on teada süsteemi komponentide põhiparameetrid, mille ümber kogu süsteem projekteeritakse. Simulatsioonimudelist loomine tähistab olulise etapi lõppu süsteemi ülesehitusel ning edasi oli võimalik alustada süsteemi projekteerimist ning erinevate komponentide valikut.

2. PROJEKTEERIMINE

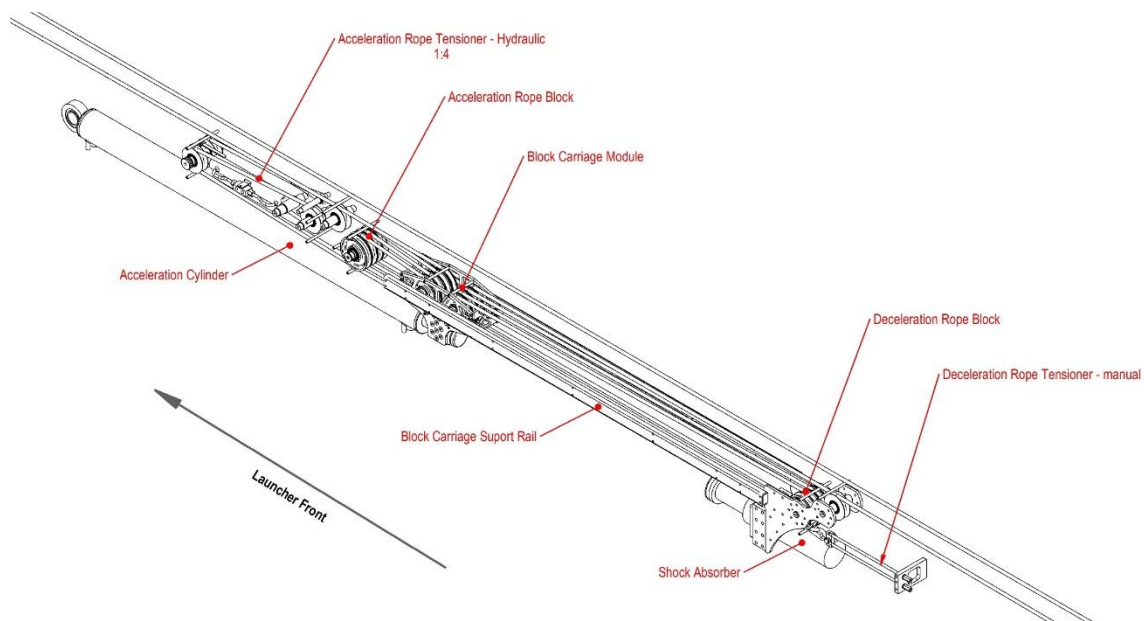
Antud peatükis alustatakse katapuldi CATA projekteerimise faasi ning seletatakse üksikasjalikult katapuldi erinevaid lahendusi, lahenduste tööpõhimõtteid ja komponentide valikuid. Lisaks koostatakse süsteemile elektrisüsteemi ülesehitus ning juhtimisloogika skeemid. Peatükkide ülesehitus on loogiliselt järjestatud nagu toimus reaalse projekteerimine. Magistritöö autor on kogu süsteemidisaini autor ning kõik järgnevalt kajastatud süsteemid ja komponendid on projekteeritud ja analüüsitud lõputöö autori poolt.

Katapuldi projekteerimisel lähtutakse ettevõttes Threod Systems kehtivast CAD standardist ning olemasolevatest ja varasemalt tõestanud disainilahendustest. Lisaks uuriti põhjalikult turuanalüüsil konkurentide tooteid ning töötati välja uusi lahendusi. Kogu projekt erineb märkimisväärselt ettevõtte varasematest projektidest, sest kunagi varem pole projekteeritud ega tootnud nii massiivset toodet. Seetõttu tuli lähtuda printsiibist, lihtsuses peitub võlu ning seda on järgitud kogu disainis.

2.1 Kiirendus- ja pidurdussüsteem

Katapult kasutab stardiadapteri kiirendamiseks ja pidurdamiseks plokisüsteemi. See võimaldas projekteerida pneumosüsteemi täielikult suletuks ilmastikutingimuste eest. Süsteemi on võimalik reguleerida kiirendama 35 kg lennuvahendit 35 m/s lõppkiiruseni kui ka 60 kg lennuvahendit 52 m/s lõppkiiruseni, reguleerides ainult süsteemi töörohku etteantud väärtuseni. Süsteem kasutab kahte eraldi nõõri – üks on stardiadapteri kiirendamiseks ja teine pidurdamiseks. Mõlema nõõri üks ots kinnitub stardiadapteri külge ja teine ots on fikseeritud kinnituspunkti keskmise reelingu küljes. Nõõrid jooksevad läbi plokisüsteemi, millega saavutatakse peasilindri ja stardiadapteri omavaheline liikumise suhe 1:8. Kiirendusnõõr jookseb reelingu etteotsa ning sealt läbi plokiratta reelingu pealt stardiadapterini, pidurdusnõõr jookseb reelingu tahaossa ning sealt plokiratta kaudu stardiadapteri külge. Pneumosilindriga ühendatud plokisüsteem liigub eraldi toetusreelingutel. Pneumosilindri liikumissuund on vastupidine stardiadapteri liikumise suunale, ehk liigub eest taha. See peaks stardiadapteri pidurdamisel vähendama katapuldi tagumise otsa maast lahti tõusmist. Lisaks võimaldab see pneumosüsteemist eemaldada sinna kogunenud vett. Keskmise plokimoodul ühendab mõlemaid nõõre ning plokide liigutamisel pneumosilindri poolt saavutatakse kiirendus. Tänu ülekande kasutamisele on

võimalik kasutada 8 korda lühemat silindrit ja ka pneumosilindri liikumiskiirus on 8 korda väiksem stardiadapteri kiirusest. See võimaldab kasutada tööstuslikku amortisaatorit kogu süsteemi pidurdamiseks. See on väga oluline element kogu pidurdussüsteemi jaoks, sest kogu kiirendus ja pidurdussüsteemi disain koondab suurimad jõud väiksemate moodulite peale – suurim jõud mõjub pidurdussüsteemi plokkidele ja pidurdusamortisaatorile. Pidurdamisel tõmmatakse peasilindrit koos plokisüsteemiga pidurdusamortisaatorisse ja kogu reelingusse mõjub ainult pneumosilindri poolt tekitatud jõud. Tänu sellele pole vaja kogu reelingut tugevdada ning konstruktsioon on seetõttu lihtsam ja kergem.

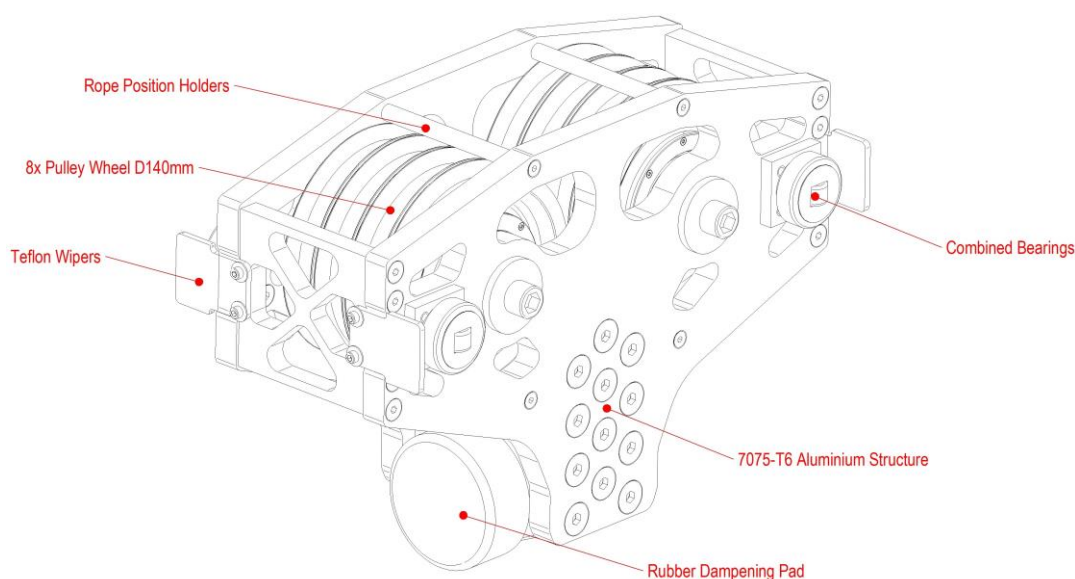


Joonis 2-1. Kiirendus- ja pidurdussüsteem koos plokisüsteemiga

Kuna katapuldi reelingud peavad olema kokku võldivad, tuli luua automaatne nõõripingutusüsteem, mis võimaldab voltimise ajaks nõõri pingsuse maha võtta. Automaatne süsteem on paigaldatud kiirendusnõõrile ning kasutab samuti plokisüsteemi, et oleks võimalik kasutada võimalikult väikest silindrit, sest maksimaalne mõjuv jõud kiirendusnõõris on 12.5 kN. Pidurdusnõõris on jõud märkimisväärselt suurem, 34.2 kN ning pidurdusnõõri pingsust reguleeritakse vastavalt vajadusele manuaalselt.

2.1.1 Keskmise plokisüsteem

Keskmise plokisüsteem on jäigalt kinnitatud pneumosilindri varre külge. Plokisüsteem on valmistatud kergest ja tugevast 7075-T6 alumiiniumist, sellel on kokku 8 plokiratast – 4 tükki kiirendusnööri jaoks ning 4 tükki pidurdusnööri jaoks. Plokirattad on projekteeritud 16 mm nööri jaoks ning igal plokirattal on üks kuullaager. Kogu plokisüsteem liigub eraldi terasreelingutel, mis toetab moodulit ning vähendab silindrivarres tekkivat väändemomenti. Iga reelinguratta ette on paigaldatud teflonist pühkija, mis puhastab terasreelingut tolmust ja mustusest ning seeläbi vähendab rataste ja reelingu kulumist.

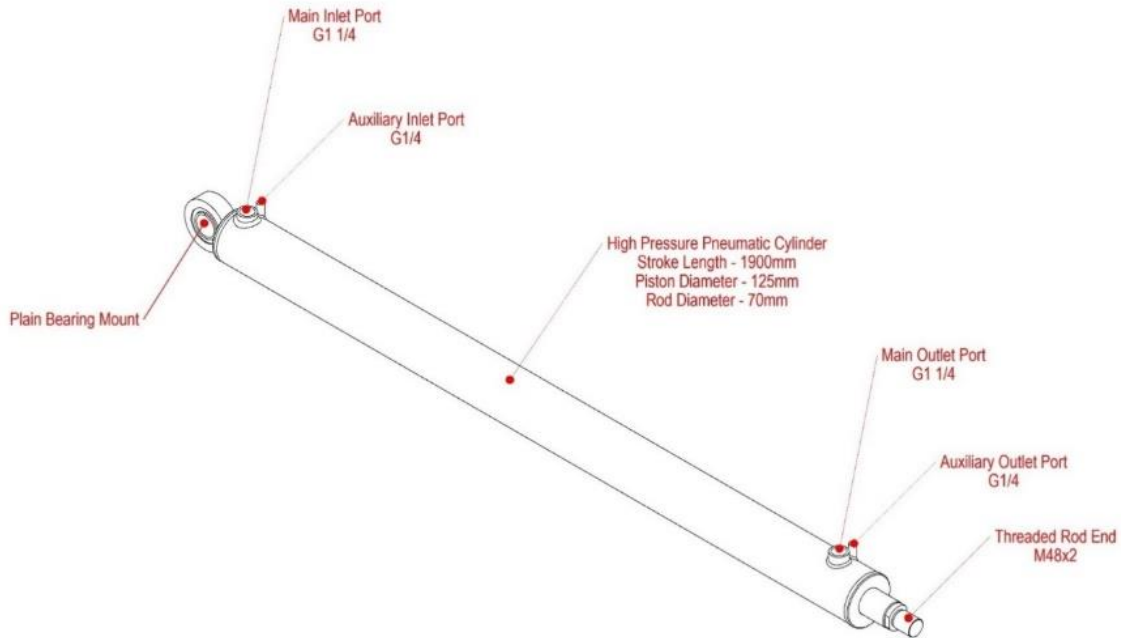


Joonis 2-2. Keskmise plokisüsteemi ülevaade

2.1.2 Kiirendussilinder

Katapult kasutab eritellimusel tehtud pneumosilinder, mis on kohandatud hüdrosilindrist. Uuritakse ka roostevaba silindri kasutamise võimalust, kuid roostevaba silinder on kordi kallim. Silindril on 2 sisendid ja 2 väljundit. Põhisisend / väljund on mõeldud kiirendamiseks, mille toru minimaalne siseläbimõõt on 25 mm. Lisasisend / väljund on mõeldud silindri tagasiliigutamiseks algasendisse. Tihendite määrimiseks ja silindri elua pikendamiseks kasutatakse silindri määrimiseks miinimum koguse õlitussüsteemi, mille abil pihustatakse silindri tagasiliigutamisel õhu sisse vastav kogus õli. Õlitussüsteemiga tagatakse, et silindri sisepinnad ei hakkaks roostetama ning tagatakse õlitus tihenditele. Silindri tagasitoomiseks algasendisse, suletakse mõlemad kuulkraanid ning silindri säärepoolne kamber survestatakse läbi õlitussüsteemi 8 bari peale. Samal ajal kasutatakse solenoidklappi ja drosselit, et lasta surve aeglaselt maha kolvipoolsest kambrist. Seeläbi saavutatakse täpne ja

sujuv silindri tagasiliikumine. Kõik sisend- ja väljundavad on silindri alumisel poolel, mis tagab kondensaadi väljumise silindrist. Silindril kasutatakse spetsiaalseid tihendeid, mis võimaldavad maksimaalset liikumiskiirust kuni 10 m/s

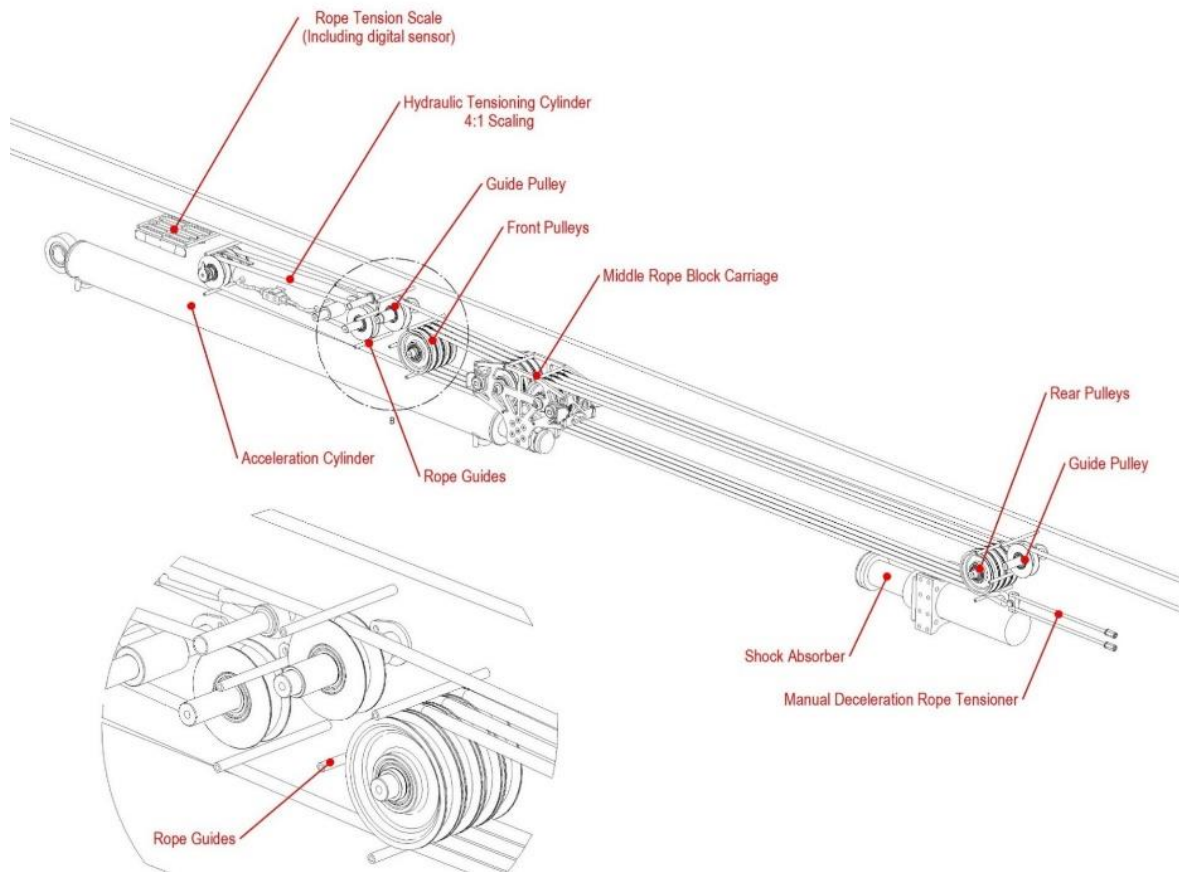


Joonis 2-3. Kiirendussilindri ülevaade

2.1.3 Nööri pingutussüsteem

Nööri pingutussüsteem on vajalik, et reelingut oleks võimalik kokku voltida. Samuti võivad nõotide pikkused varieeruda ning nõör kasutuse käigus pikeneda. Seetõttu on oluline, et nõöri pingsust reguleeritakse vastavalt vajadusele ning tegelikule nõöripikkusele. Kasutusel on kaks eraldi süsteemi, üks kiirendusnõöri ja teine pidurdusnõöri. Kiirendusnõöri pingutus koosneb plokiratastest, hüdrosilindrist ja rõhualandusventiilist. Rõhualandusventiiliga pingutatakse nõör alati samale pingsusele – ligikaudu 12.5 kN. Pingutussüsteem kasutab 1:4 plokisüsteemi, mis tähendab et hüdrosilindri töökäik on 350 mm, kuid nõöri pingutusmaa on maksimaalselt 1400 mm. Nööri pingutussüsteem on mingil määral automatiseeritud ning operaatoril ei ole võimalik katapult kasutada, kui nõöri pingutussüsteem ei ole aktiivne. Selleks on paigaldatud hüdrosilindrile positsiooniandur, mis tuvastab et hüdrosilinder oleks piisavalt välja liikunud. Samuti kui nõör aja jooksul välja venib, tuvastab andur nõöri pikenedamise ning annab operaatorile tagasisidet.

Pidurdusnõöri pikkuse reguleerimiseks on paigaldatud manuaalne pingutussüsteem. See võimaldab määrata täpse stardiadapteri positsiooni adapterilukustis reelingu tagaosas.



Joonis 2-4. Nööri pingutusüsteem koos nööri juhikutega

Nööri mahatuleku vältimiseks plokiratastelt, on iga plokiratta ümber paigaldatud juhikud, mis takistavad nööri pahatuleku transpordi või ülesse seadmise ajal. Nööri paigaldamiseks või vahetamiseks on võimalik kõik juhikud eemaldada reelingu külgedelt ja on lihtsasti ligipääsetavad. Uue nööri paigaldamiseks on ette nähtud kasutada vana nööri, millega uus peale tõmmatakse. Kõik plokirattad on ligipääsetavad, kui eemaldada katapuldi paremal reelinguküljel asuv paneel.

2.1.4 Kasutatav nöör

Katapuldil on kasutusel Dyneema SK78 polüetüleenkõis, millel on suurim tugevuse ja kaalu suhe, väike venivus, pikk tööiga, lihtne käsitlemine ning mida on terasest trossiga võrreldes kordi ohutum kasutada. Kuna nöör on üks olulisemaid osasid katapuldi töökindlusel ja ohutusel ning mõjuv pidurdusjõud toimub väga hetkeliselt, siis nööri ohutegur peaks olema minimaalselt 5.

Maksimaalne koormus kiirendusnööris:

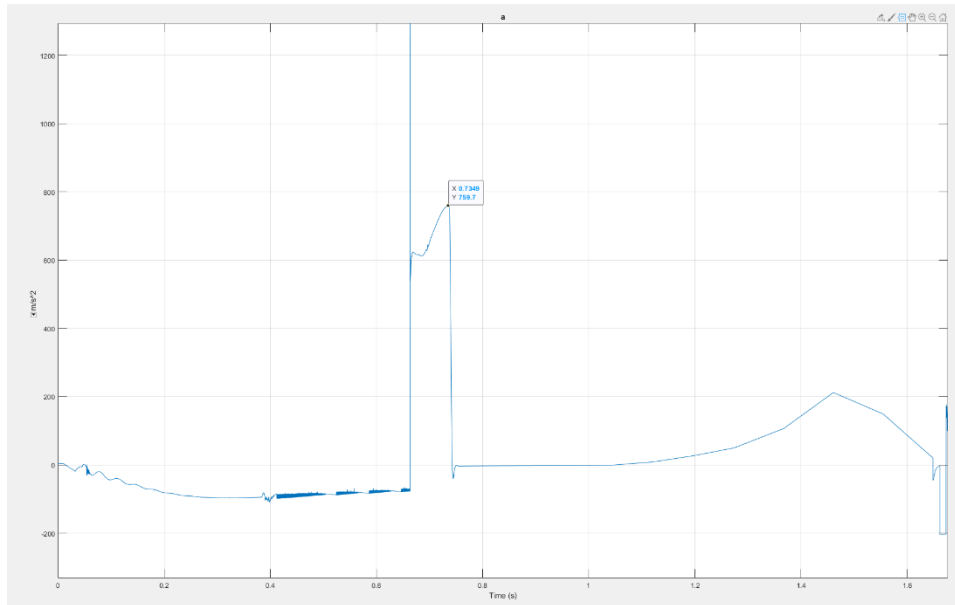
$$F = \frac{F_{max}}{n} = \frac{100 \text{ kN}}{8} = 12.5 \text{ kN} \quad (12)$$

Kus

F_{max} – maksimaalne pneumosilindri jõud, N;

N – plokirataste arv;

Maksimaalne koormus pidurdusnööris:



Joonis 2-5. Katapuldi stardiadapterile mõjuvad kiirendused

Maksimaalne koormus pidurdusnööris on võimalik välja arvutada Newtoni teise liikumisseaduse valemiga.

$$F = ma \tag{13}$$

Kus

m – pidurdatav mass, kg;

a – pidurduskiirendus, m/s^2 ;

Maksimaalne koormus pidurdusnööris on seega:

$$F = 45 \text{ kg} \cdot 760 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 34200 \text{ N} = 34.2 \text{ kN} \tag{14}$$

Valitud nööri diameetriks osutus 16mm läbimõõduga nööri, mille minimaalne katkemistugevus on 260 kN. Setõttu saavutatakse ohutegur 7.6.

$$S = \frac{260 \text{ kN}}{34.2 \text{ kN}} = 7.6 \tag{15}$$

Kus

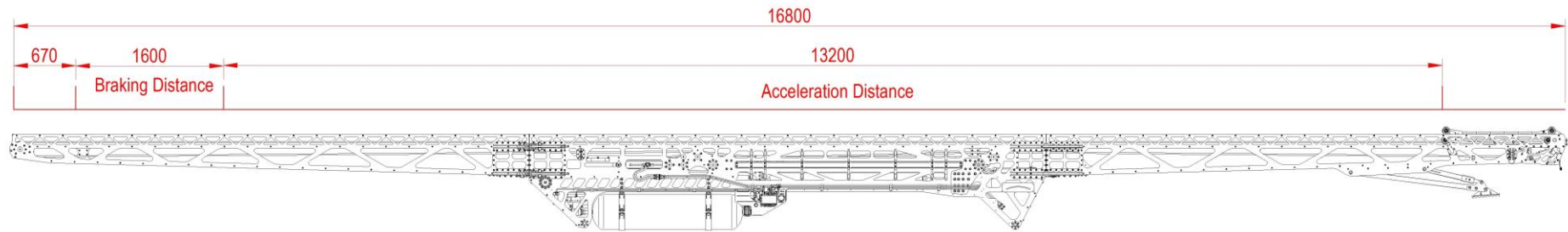
S – tugevusvaru;

Tabel 2-1. Dyneema SK78 Polüetüleen nööri spetsifikatsioon - 16 mm [15]

| | |
|------------------------------|---------------|
| Erikaal | 0.97 |
| Sulamispunkt | 150 °C |
| Katkevenivus | 4 – 5% |
| Vee imendumine | None |
| Vastupidavus soolasele veele | Excellent |
| Kulumiskindlus | Excellent |
| UV kindlus | Good |
| Minimaalne purunemiskoormus | 260 kN |
| Töötemperatuur | -60°C to 70°C |
| Mass | 160 g/m |
| Nööri diameeter | 16 mm |

Konkureerivatel toodetel on samuti sarnaste omadustega nöör kasutusel ning terastrossi ei kasuta keegi. Terastrossi põhiline miinus on selle ohtlikkus, purunemisel lähevad trossi sooned laiali ning liiguvad väga suurel kiirusel, tekitades ohtlikke kahjustusi ning võivad olla surmavad.

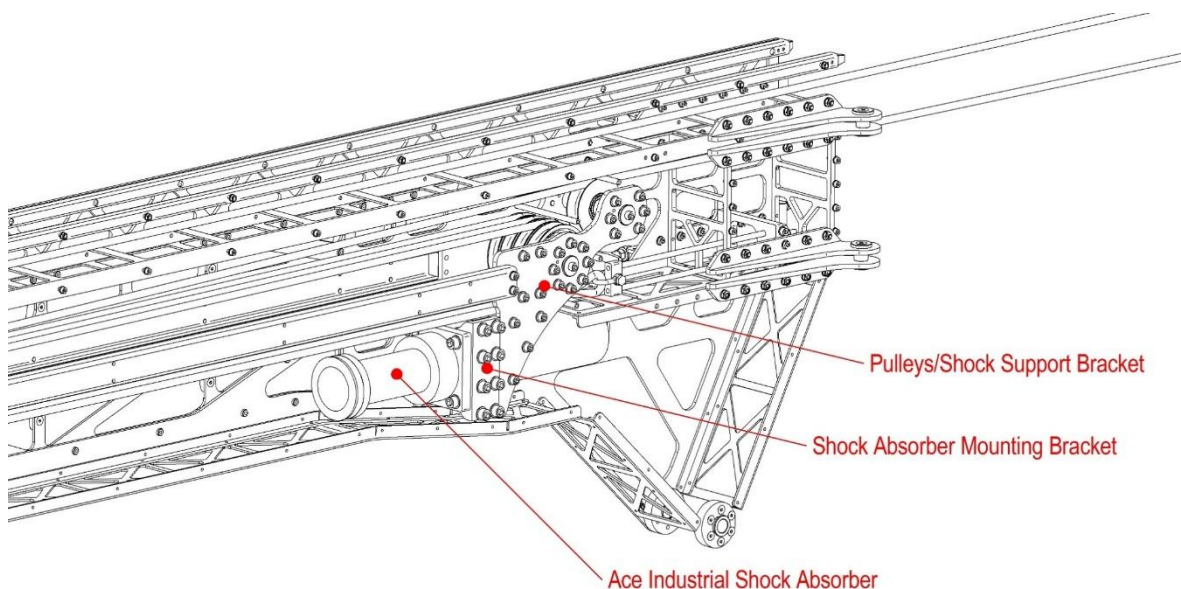
2.1.5 Pidurdussüsteem



Joonis 2-6. Katapuldi külgvaade - eraldatud distantsid kiirenduseks ja pidurdamiseks

Pidurdussüsteemist ülevaate andmiseks selgitatakse esmalt kogu reelingut. Katapuldi reeling koosneb kolmest sektsioonist – esimene sektsioon, keskmine sektsioon ja tagumine sektsioon. Katapuldi reelingul on ette nähtud 13200 mm stardiadapteri kiirendamiseks, seejärel kiirendussilinder puudutab pidurdusamortisaatorit, mis summutab kiirendussilindri ja kelgu kiiruse. Reelingul on pidurdamiseks ettenähtud distants 1600 mm, mis on võrdeline pidurdusamortisaatori käiguga 200 mm. Reelingul on lisa 670 mm, mis on jäetud varuks. Pidurdussüsteem paikneb keskmise reelingu tagumises osas.

Pidurdussüsteem on osa kiirendussüsteemist. Pidurdussüsteemi amortisaator summutab kõik keskmise plokisüsteemi ja pneumosilindri poolt üle kantavad jõud. Pidurdamiseks kasutatakse tööstuslikku amortisaatorit, mis on antud rakenduse jaoks spetsiaalselt kohandatud, et võimaldada maksimaalne löögikiirus kuni 6.5 m/s. Kogu peasilindri paiknemine pidurdussilindri suhtes on üsna unikaalne ning tänu sellele on suurimad koormused pidurdussilindri kinnituses ja selle peal paiknevas plokiratastes. See tähendab märkimisväärset kaaluvõitu ja süsteemi lihtsustamist, sest kogu keskmine reeling, kus kogu süsteem paikneb, ei pea vastu pidama koormusele, mis on pidurdamisel ligikaudu 420 kN. Lisaks annab tööstusliku amortisaatori kasutamine konkurentide ees eelise, sest amortisaator ei vaja reguleerimist, kui starditakse lennuvahendit 35 kg 35m/s või 60 kg 52 m/s. Konkureerivatel toodetel on vaja pidurdussüsteemi rõhku reguleerida või pärast igat lasku tuleb pidurdussüsteem lähtestada.



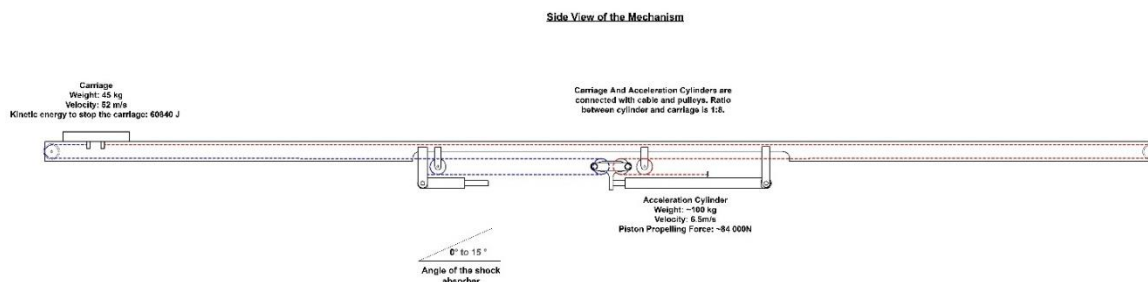
Joonis 2-7. Pidurdussüsteemi ülevaade

Amortisaator koos pidurdusnööri plokiratastega on projekteeritud ühtseks mooduliks, mis võimaldab vastu võtta suuri koormusi. Kogu moodul on projekteeritud vastu võtma 500 kN suurust koormust. Tegelik maksimaalne koormus tuleb enamuses pidurdusnöörist ~300 kN ning kolvivarrest koos keskmise plokimooduliga ~120 kN.

2.1.6 Pidurdusamortisaator

Pidurdussüsteemi simuleeriti ka Matlab mudelis ning selle põhjal jõuti järeldusele, et sellise piduri / amortisaatori projekteerimiseks ning ehitamise jaoks ei ole piisavalt aega ning kuna puudus varasem kogemus sellise süsteemi projekteerimisel, tundus mõislikum otsida valmistoode, mis vastaks spetsifikatsioonile.

Selleks sai loodud spetsifikatsioon, millele pidurdusamortisaator vastama peab. Põhiline probleem oli löögikiirus, mis tööstuse standardtoodetel ulatus maksimaalselt kuni 5 m/s.



Joonis 2-8. Pidurdussüsteemi tööõhimitte skeem

Vajalikust pidurdusjõust ülevaate saamiseks tuleb vaadelda kahte eraldi objekti – esimeseks on pneumosilinder koos keskmise plokisüsteemiga ning teiseks on stardiadapter. Pidurdamisel pole lennuvahendi massi vaja arvestada, sest lennuvahend on pidurdamise hetkeks adapterilt eraldunud.

Pneumosilinder koos keskmise plokisüsteemiga

- Mass: 100 kg
- Kiirus: 4.3 m/s kuni 6.5 m/s
- Pneumosilindri poolt tekitatud survejõud – 84 000 kN

Stardiadapter koos lennuvahendi adapteriga

- Mass: 45 kg
- Kiirus: 35 m/s kuni 52 m/s
- Vajalik kinemaatiline energia, et pidurdada stardiadapteri kiirus 52 m/s kuni 0 m/s: 60840 J

Kuna kogu pidurdussüsteemi kiirused on läbi plokisüsteemi viidud madalamale kiirusele, kuni 6.5 m/s, tuleb stardiadapteri poolt tekkivad jõud teisendada 45 kg 52 m/s pealt kolvi liikumiskiiruse peale – 6.5 m/s X kg. Teisisõnu vähendada kiirust, suurendada vastavalt massi, et kinemaatiline energia jääks samaks.

$$\frac{m_{\text{carriage}} \cdot v_{\text{carriage}}^2}{2} = \frac{m_{\text{piston}} \cdot v_{\text{piston}}^2}{2} \quad (16)$$

$$\frac{45\text{kg} \cdot 52\text{m/s}^2_{\text{carriage}}}{2} = \frac{m_{\text{piston}} \cdot 6.5\text{m/s}^2_{\text{piston}}}{2} \quad (17)$$

$$80480 = 21.125 \cdot m_{\text{piston}} \quad (18)$$

$$m_{\text{piston}} = 2880 \text{ kg} \quad (19)$$

Kus

m_{carriage} – stardiadapteri mass, kg;

v_{carriage} – stardiadapteri kiirus, m/s;

m_{piston} – pneumosilindri kolvi mass, kg;

v_{piston} – pneumosilindri liikumiskiirus, m/s;

M_Piston_max = 2880 kg. See on maksimaalne mass, mida tuleb pidurdada, kui stardiadapter liigub 52 m/s.

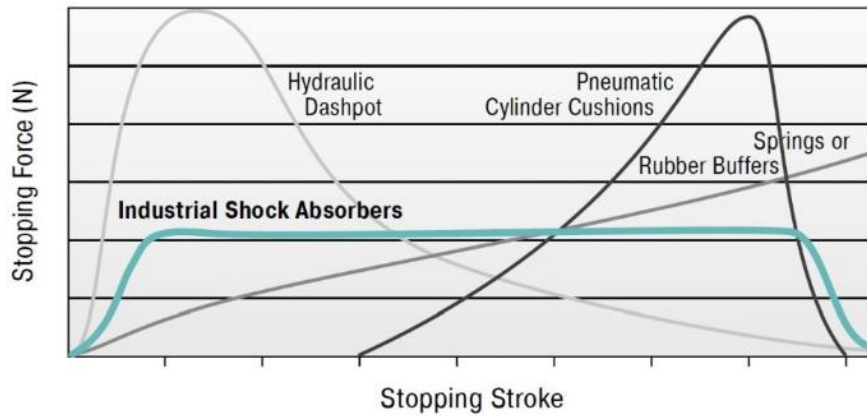
M_Piston_min = 1304 kg. Minimaalne mass, kui stardiadapter liigub 35 m/s.

Seega parameetrid sobiva amortisaatori jaoks on järgnevad:

- Pidurdatav mass
 - Min – 1304 + 100 = 1404 kg
 - Max – 2880 + 100 = 2980 kg
- Kiirus kokkupõrke hetkel
 - 4.3 m/s minimaalse kiiruse ja massiga
 - 6.5 m/s maksimaalse kiiruse ja massiga
- Nõutud tsüklite arv tunnis: 4
- Amortisaatori kaldenurk: 0 ° kuni 15 °
- Pneumosilindri poolt tekitatav survejõud: kuni 84000 N
- Amortisaatori töökäik: 200 mm

Katapult kasutab tööstuslikku amortisaatorit, mille kokkupõrkekiirus on kohandatud antud otstarbeks. Amortisaator kasutab kogu tööala ulatuses olevaid mõõteavasid, mis tagavad pideva lineaarse aeglustuse võimalikult väikese reageerimisjõuga võimalikult lühikese peatumisajaga.

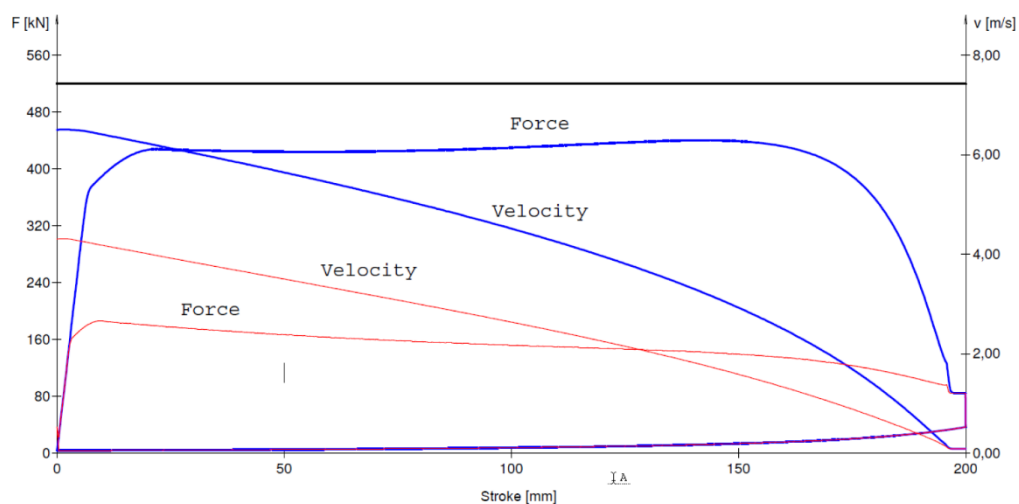
Kasutataval tööstuslikul amortisaatoritel on pidurdatav vastu jõud sujuv kogu amortisaatori töökäigu ulatuses. Seetõttu aeglustatakse koormust minimaalse jõuga võimalikult väikese aja jooksul, kõrvaldades suured jõutipud ja seadmete löögihajustused. Lisaks on tööstuslik amortisaator märkimisväärselt väiksema müratasemega. [14]



Joonis 2-9. Erinevate amortisaatorite reaktsioonijõud [14]

Alumiselt graafikult on näha, et kasutatav amortisaator on võimeline töötama kogu katapultide kiirusevahemikus, ilma et amortisaatorit oleks vaja reguleerida.

- **Blue** - Force and Velocity cure for impact velocity 6,5m/s
- **Red** - Force and Velocity cure for impact velocity 4,3m/s
- **Purple** - Return Force of the shock absorber



Joonis 2-10. Tööstusliku amortisaatori simulatsioonigraafik

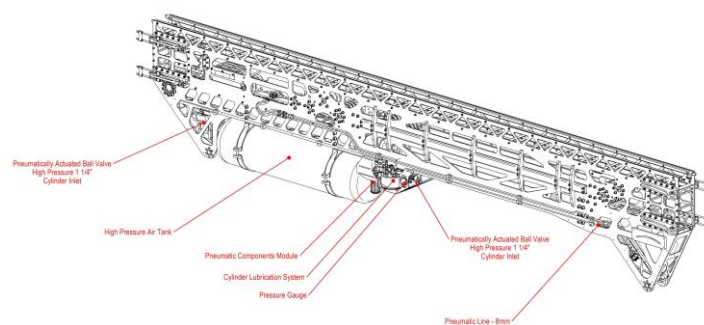
Tabel 2-2. Tööstusliku amortisaatori spetsifikatsioon

| | |
|----------------------|------------------------|
| Töökäik | 200 mm |
| Maksimaalne pikkus | 750 mm |
| Mass | 53 kg |
| Energiamah | 95 000 Nm/tsükkel |
| Reaktsioonijõud | 520 000 N |
| Tagastusjõud | 38 000 N |
| Löögikiiruse vahemik | 1 m/s to 6.5 m/s |
| Töötemperatuur | -20 °C to +60 °C |
| Kolvivarre pinnakate | Merekaitse – kroomitud |

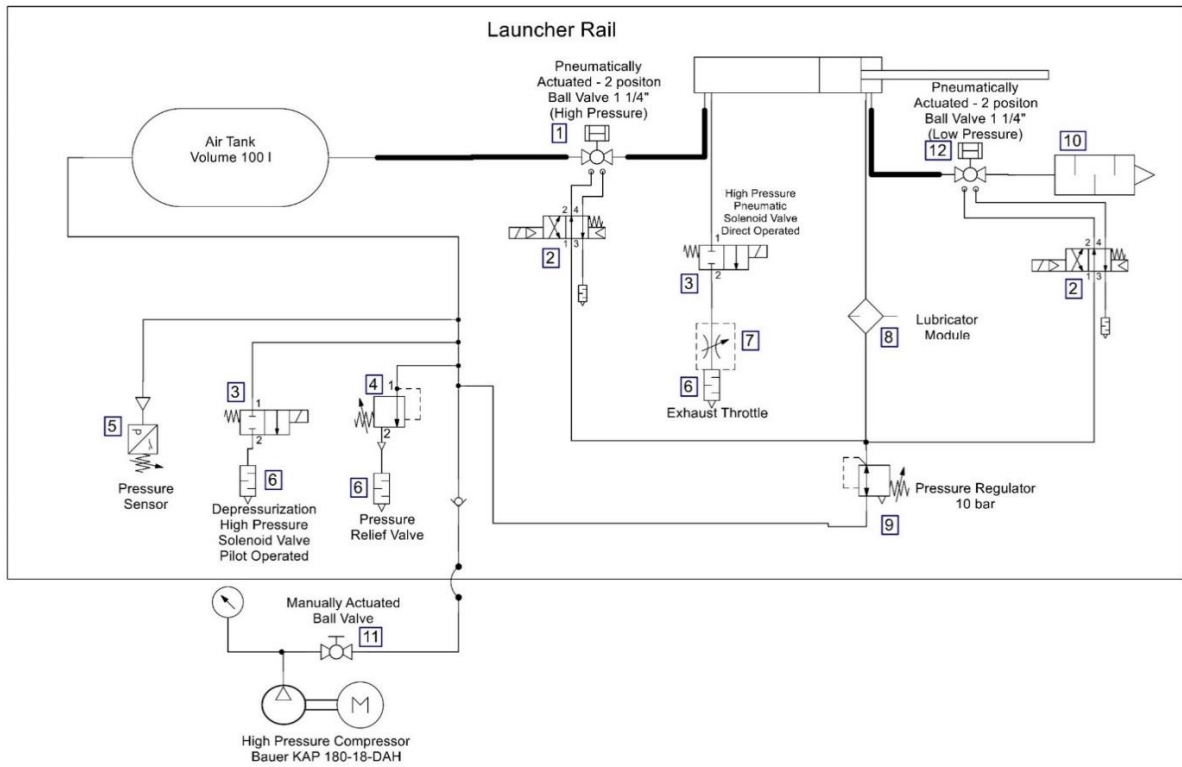
2.2 Kõrgsurve pneumaatikasüsteem

Kõrgsurve pneumaatikasüsteemi kasutatakse stardiõhupaagi survestamiseks. Süsteem kasutab kõrgsurve ja suure võimsusega õhukompressorit, mis võimaldab süsteemi survestada maksimaalsurvele vähem kui 16 minutiga. Süsteem kasutab kõrgsurve kompressorit, mis on veorihma abil ühendatud diiselmootori veorattaga. Kogu kõrgsurve kompressor koos diiselmootoriga on ostutoode, mida ettevõttes kohapeal kohandame, et säästa massi ja süsteemi tööpõhimõtet muuta, et saaksime diiselmootorit kasutada ka generaatorina. Originaalis on kompressor veorihmaga otseühenduses diiselmootori hoorattaga ja kui diiselmootor käivitatakse, hakkab kompressor koheselt tööle. Et diiselmootor kompressorist lahti ühendada, paigaldatakse hoorattale elektromagnet sidur ning lisaks elektrooniline gaasiaktuaator, mis võimaldab katapuldi juhtsüsteemil mootorit täielikult juhtida ning kasutada generaatorit ilma kompressorita.

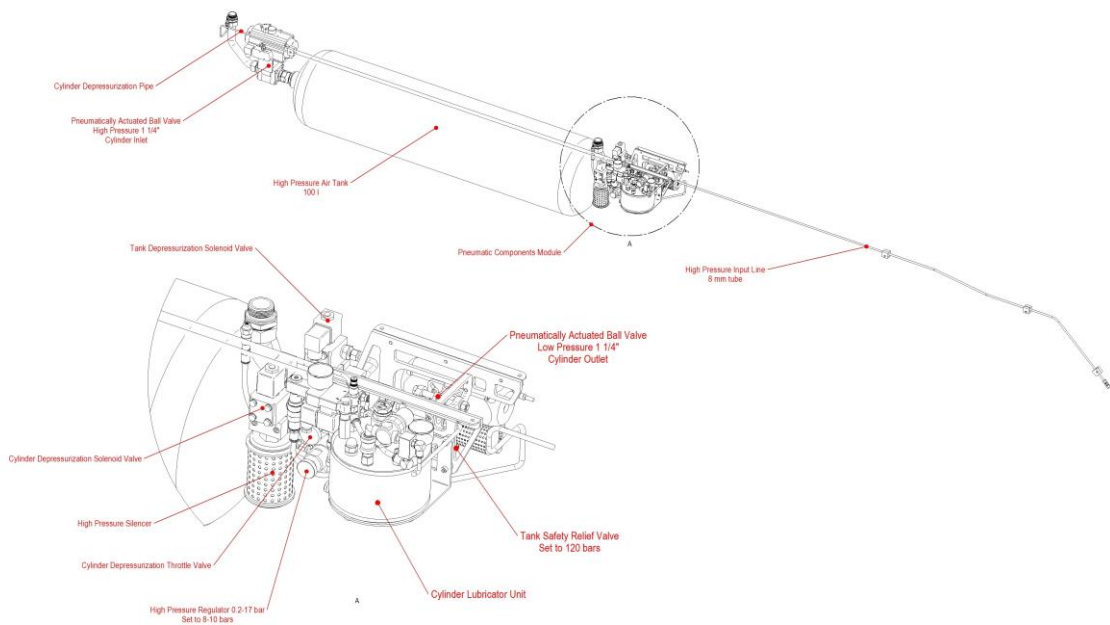
Enamus kõrgsurve õhusüsteemi komponente on paigaldatud keskmisele reelingule, sealhulgas 100 liitrine õhupaak. Õhumahutil on kaks sisendit/väljundit ning õhu juhtimine pneumosilindrisse toimub läbi pneumaatilist käitatava kõrgsurvekuulkraani. Õhupaagi sisendisse on ühendatud erinevad andurid ja turvaelemendid – rõhuandur, ülerrõhuklapp, rõhu alandamise solenoidklapp ja rõhuregulaator, mille kaudu toidetakse madala rõhu komponente. Madalrõhku ~8-10 bar kasutatakse pneumaatilist juhitavate kuulkraanide solenoidide pilootõhuks ning silindri algasendisse viimiseks. Silindri algasendisse viimiseks läheb kogu õhk läbi õlitussüsteemi, mis pihustab silindrisse sisenevasse õhku õli. Kiirendussilindri sisse- ja väljalaskeava juhitakse pneumaatilist juhitavate kuulventiilidega, mis võimaldavad silindri transpordiks täielikult sulgeda. Komponentide ühendamiseks kasutatakse vastavalt 6 või 8mm roostevaba terastorusid ning elastne voolik on kasutusel ainult reelingu ühenduskohas treileriga. Õhupaagi ohutuse tagamiseks on sinna ette paigaldatud ühesuuna ventiil. Kuna kõik ventiilid, solenoidid ja kuulkraanid on normaalselt suletud, on võimalik õhutank hoida eelsurvestatud, mis märkimisväärselt aitab lühendada. Samuti puudub selline võimekus konkurentide toodetel.



Joonis 2-11. Kõrgsurve komponentide ülevaade keskmisel reelingul



Joonis 2-12. Kõrgsurve pneumaatikaskem



Joonis 2-13. Kõrgsurve pneumaatikasüsteemi komponendid

Kõrgsurve süsteem on projekteeritud moodulina, mis võimaldab mooduli koostamist, enne kui see paigaldatakse keskmisele reelingule. Lisaks lihtsustab see hooldust ja komponentide vahetamist.

2.2.1 Kõrgsurve paak

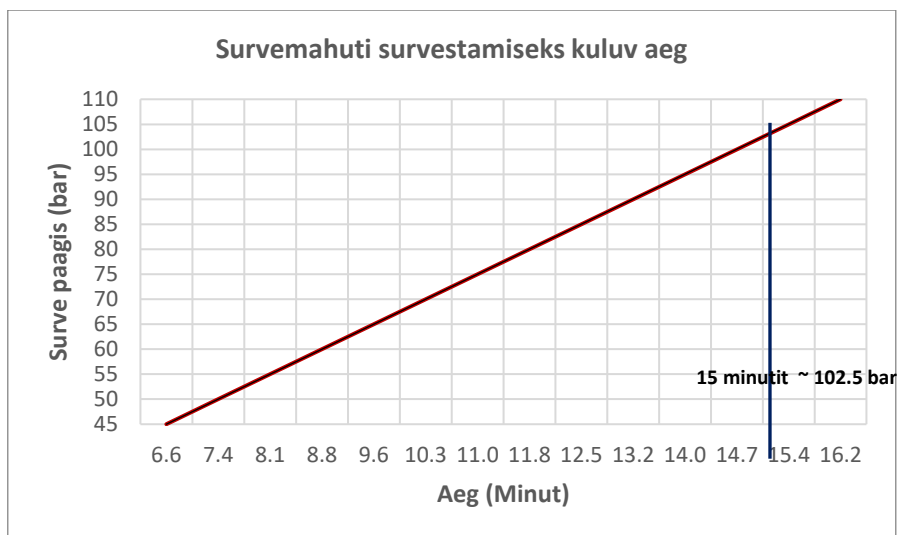
Katapuldil on kasutusel tüüp III CNG survemahuti, mis on keevitusteta metallsisemusega ning välimine osa on komposiitarmatuuriga, et tagada äärmiselt hea vastupidavus. Tüüp III CNG mahutid on kergeimad saadaolevad mahutid ning on parima rõhu / massi suhtega. Õhupaakidel on õmblusteta alumiiniumvooder, paakidel on suurepärane löögitaluvus, suurem soojataluvus kui terasel ning puudub täitepiirang kuuma või külma ilmaga. See võimaldab kiiret survestamist ja rõhu alandamist, mida terasest paagid ei võimalda, sest võib tekkida väsimus. Paakidel on ohutustegur vähemalt 3. Lisaks hakkavad komposiitpaagid enne väsimuskatkemist lekkima ning seetõttu on võimalik varakult avastada. Teraspaake uurides selgus, et need ei ole mõeldud kiiresti tühjendamiseks, sest ajapikku tekib väsimus ning paak võib seetõttu puruneda.

Tabel 2-3. Kõrgsurve paagi spetsifikatsioon [17]

| | |
|---------------------------------|----------------------|
| Paagi tüüp | Tüüp III |
| Sisu | Aluminium, composite |
| Töösurve | 35 Mpa |
| Lõhkemisrõhk | >78.75 Mpa |
| Mahutavus | 100 l |
| Tühikaal | 68.6 kg |
| Standard | ISO19881 |
| Tank Manufacturer Certification | Certified in EU |

Katapuldi töösurve sõltub otseselt lennuvahendi stardimassist ja soovitud stardikiirusest ning süsteem arvutab vajaliku töösurve automaatselt, kui operaator sisestab lennuvahendi massi ja soovitud stardikiiruse. Vajalikud tööõhud erinevate parameetrite korral on läbisimuleeritud ja katsetatakse täpsemalt hilisemas faasis. Näiteks 35 kg lennuvahendi korral, mille stardikiiruseks on 35 m/s on katapuldi tööõhk 45 bari ja 60 kg lennuvahendi korral, mille stardikiiruseks on 52 m/s on katapuldi tööõhk 110 bari.

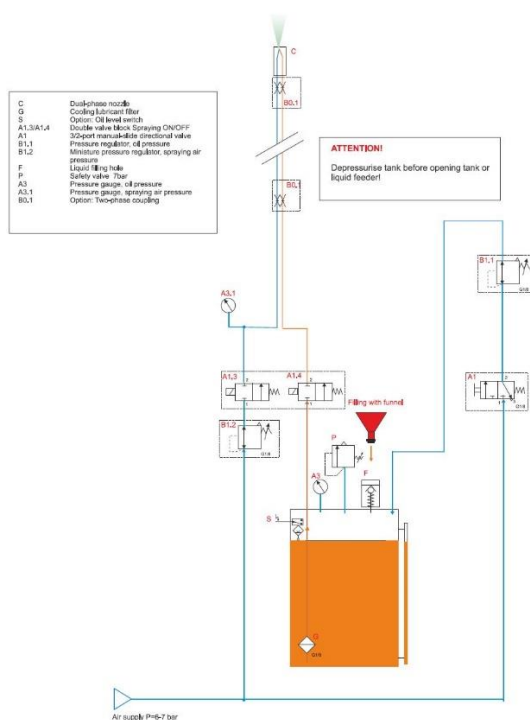
Kõrgsurvepaagi survestamiseks kasutatakse kõrgsurvekompressorit. Survestamise aeg sõltub soovitud stardikiirusest ja lennuvahendi massist. Keskmine kompressori tootlikkus on 680 l/min. Oluline kliendipoolne nõue oli ülesse seadmise aeg 15 minutit ning selle hulka kuulub ka paagi survestamiseks kuluv aeg. Seetõttu projekteeriti pneumaatikasüsteem selliselt, et oleks võimalik paaki hoida ohutult eelsurvestatud 45 bar-ise rõhu juures, et paagi täitmise aega vähendada.



Joonis 2-14. Survemahuti survestamiseks kuluv aeg. Esialgne rõhk paagis 0 bari

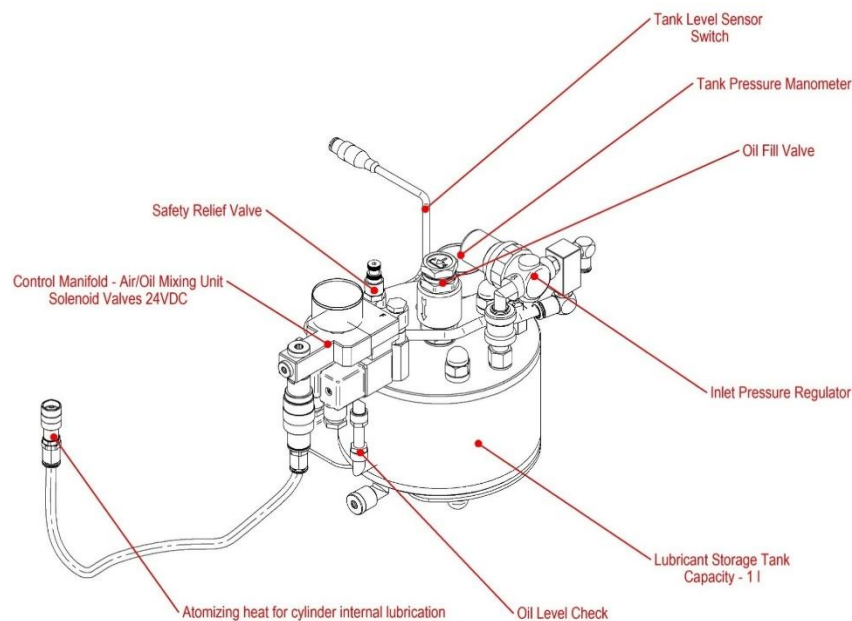
2.2.2 Pneumosilindri õlitussüsteem

Pneumosilindri määrimissüsteem on vajalik, kuna kasutatakse tavalist hüdroasilindrit spetsiaalsete tihenditega. Pneumosilindri õlitamiseks kasutatakse ostutoodet. Tänu õlitussüsteemile pikendatakse tihendite eluiga ja välditakse korrosiooni tekkimist silindris sees. Silindri õlitamine toimub selle tagasilükkamisel algasendisse ning sellisel juhul õlitatakse nii kolvitihendeid kui ka silindri sääre tihendeid. Õlitamiseks kasutatakse spetsiaalset õlitussüsteemi, mis pihustab õli silindrisse.



Joonis 2-15. Pneumosilindri õlitussüsteemi tööpõhimõtte skeem [16]

Survestatud mahutis sisalduv vedelik survestatakse suruõhuga surveregulaatori abil ja vedelik surutakse kapillaartorusse, kust see juhitakse kahefaasilise jaoturini. Nõutavat minimaalset vedelikukogust, mida pihustatakse, reguleeritakse mahuti rõhu abil ja seetõttu on paigaldatud mahutile manomeeter. Rõhu muutmine muudab voolukiirust kapillaaris. See võimaldab vedeliku kogust usaldusväärselt ja sujuvalt reguleerida kuni nulli lähedase tarbimiseni. Kahefaasilise jaoturi teine pool on otse ühendatud suruõhuga ning suruõhu kogust on võimalik reguleerida drosselklapi abil, sõltumata vedeliku voolukiirusest. [16]

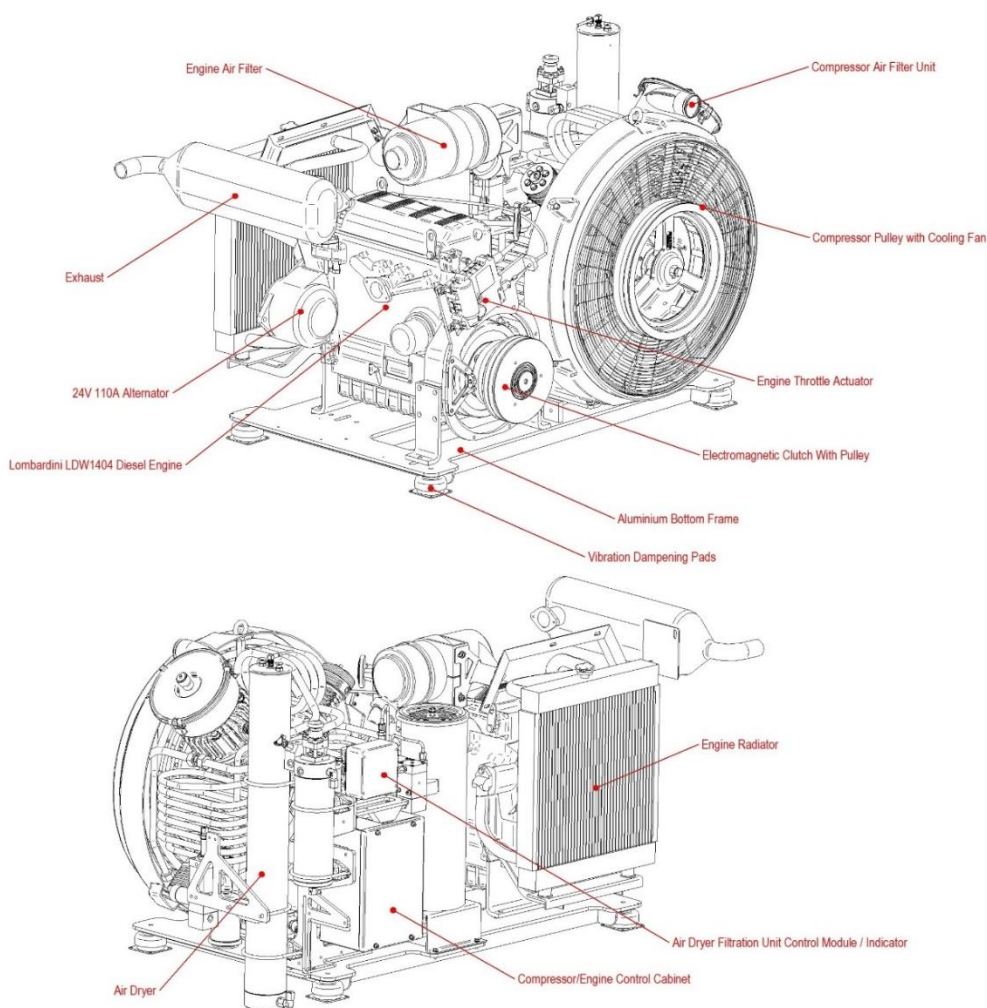


Joonis 2-16. Pneumosilindri õlitussüsteem

Õlitussüsteemi kasutatakse automaatselt iga kord, kui silindrit liigutatakse tagasi algasendisse. Kogu õhk, mida kasutatakse silindri tagasiliigutamiseks, läheb läbi õlitussüsteemi. Süsteemi tööõhk on 6 – 7 bari.

2.2.3 Kõrgsurve kompressor

Katapult kasutab Bauer KAP 180-18-DAH kõrgsurve kompressorit, mis töötab Lombardini LDW 1404 diiselmootoriga. Antud kompressor on ainuke turul olev, mis on suure tootlikkusega >500 l/min ning mida on võimalik tootena osta. Enamus kõrgsurve kompressoreid töötavad elektrimootoriga ja on väga rasked. Kogu moodul tuleb valmistootena, mis koosneb diiselmootorist, kompressorist ja filtritest, kuid on suhteliselt primitiivne ja väga raske. Ka antud juhul on seadme originaalraam valmistatud terasest ja ainuüksi raami kaal on 260 kg, seetõttu projekteeriti uus raam alumiiniumist, mis võimaldab mooduli kaalust kokku hoida ligikaudu 200 kg, sest vana raam koosnes sisemisest ja välimisest raamist. Antud otstarbes oli võimalik välimine raam projekteerida osaks treilerist ning kogu uus raam projekteerida kui ühtse moodulina koos kompressori ja filtritega. See võimaldab mooduli enne katapultdile paigaldamist koostada ja testida. Moodul paigaldatakse treilerile vibratsioonisummutuspadjade abil ning kogu moodul kaetakse hiljem paneelidega, mis võimaldavad õhu liikumist, kuid pakuvad keskkonna eest kaitset.



Joonis 2-17. Kompressorimoodul

Diiselmootor Lombardini LDW 1404

Diiselmootoriks kasutatakse Lombardini LDW 1404 4-silindrilist diiselmootorit, mille maksimumvõimsus on 17.5 kW ning maksimaalne väändemoment 84 Nm 2000 RPM juures. [18] Mootori hoorattale paigaldatakse lisaks elektromagnetiline sidur, mis võimaldab kompressori lahtiühendamist ning mootori kasutamist ainult generaatorina. Lisaks paigaldatakse mootorile elektrooniline gaasiakuaator, mis võimaldab mootori pöörideid reguleerida vastavalt töö režiimile ning seeläbi vältida ülekuumenemist ja vähendada kütusekulu.

Tabel 2-4. Lombardini LW1404 diiselmootori üldandmed [18]

| Lombardini LW1404 diiselmootori üldandmed | |
|--------------------------------------------------|----------------------|
| Mudel | LDW 1404 |
| Maksimaalne võimsus | 24.5 kW |
| Maksimaalne väändemoment | 84 Nm 2000 RPM |
| Silindrite arv | 4 |
| Töömaht | 1372 cm ³ |
| Töötemperatuur | -30° ... +60° |
| Kütusepaagi maht | 30 l |
| Päritolu | Italy |

Kompressor Bauer KAP180-18-DAH

Bauer KAP180-18-DAH on kõrgsurve ja suure tootlikkusega sukeldumiskompressor, mille on tootnud Bauer Kompressoren GmbH. KAP-DAH seeria kompressorid on projekteeritud vastama kõige rangematele nõudmistele usaldusväärse ja autonoomse pideva töö tagamiseks eraldatud kohtades. Kõik jahutid, filtrid, ventiilid ja kaablid on valmistatud korrosioonikindlatest materjalidest ja on mõeldud kõige karmimale väli kliimale ning töötavad usaldusväärselt ka kõrgetel väli temperatuuridel. Seade on projekteeritud moodulina, võimaldades hoolduseks hõlpsat juurdepääsu. KAP180-18-DAH on praegu turul ainuke kõrge tootlikkusega kõrgsurvekompressor, mis kasutab jõuülekandena diiselmootorit. [19]

Kõrgsurvekompressor on varustatud erinevate filtrite ja õhukuivatitega. Õhukuivatamine toimub absorpentfiltriga, mis võtab suruõhust 99% õhuniiskuse. Kuivatamine on eriti oluline, kui kompressorit kasutatakse külmas kliimas, kus on oht kondensvee jäätumisele, mis võib lõhkuda kompressorit. Seetõttu on kompressorile külmas kliimas opereerimiseks paigaldatud õlisoojendi. Kuna õhk sisaldab alati niiskust, on kõrgrõhu kompressori kasutamisel teatud kompromissid ja külmas kliimas (-20 °C - +5 °) opereerimisel tuleb kogu kompressorit eelsoojendada, et veenduda

kondensaatvee sulamises. Seetõttu pole külmas kliimas opereerimisel võimalik täita 15 minuti ülesse seadmise võimekust, kui survepaaki pole eelsurvestatud.

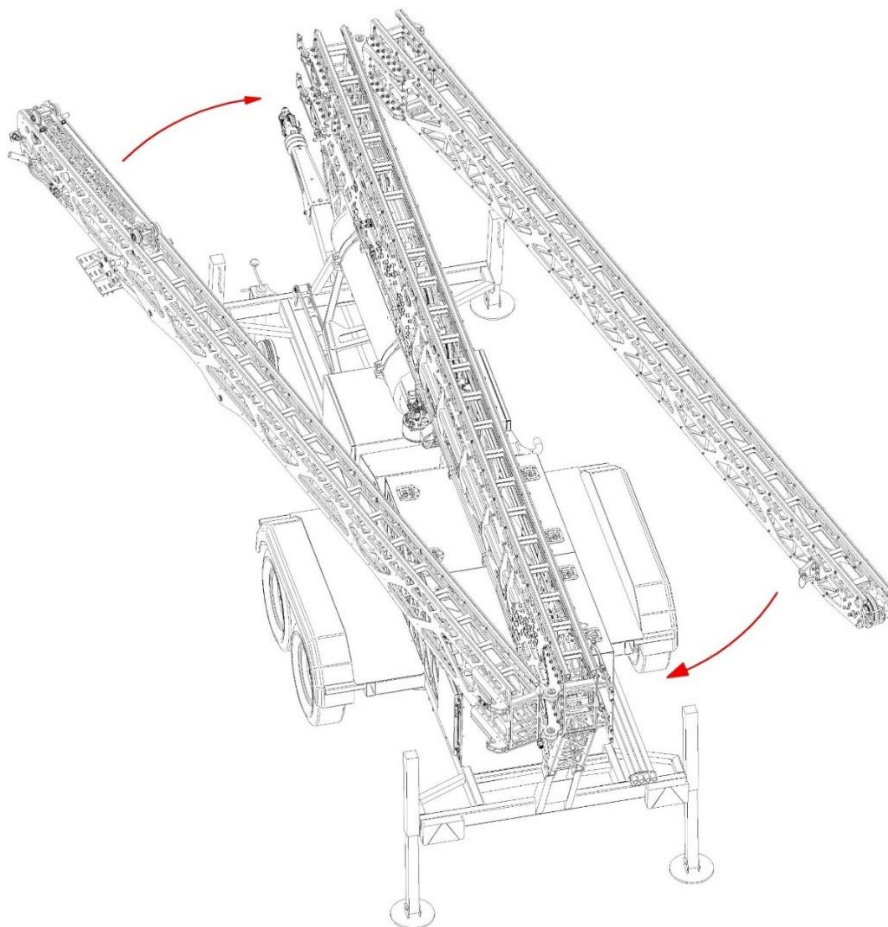
Tabel 2-5. Bauer KAP180-18-DAH üldandmed [19]

| Bauer KAP180-18-DAH Kompressori üldandmed | |
|--------------------------------------------------|------------------------------------|
| Sisselaskerõhk | Atmosfäär |
| Maksimaalne rõhk | 350 bars |
| Töötemperatuur | -20 kuni +55°C |
| Lubatud maapinna kõrgus (töötamisel) | 0...1500 m AMSL |
| Maksimaalne lubatud kalle | 10° |
| Süsteemi tüüp | Avatud |
| Õlivahetuse intervall | Süntetiiline: Iga 2 aastat / 2000h |
| Tootlikkus | 680 l/min |
| Õhu puhastussüsteem | P81 |
| Jahutuventilaatori tootlikkus, min | 6480 m ³ /h |
| Kiirus | 1400 Rpm |
| Etappide arv | 4 |
| Ülekanne | V-Belt |
| Päritolu | Saksamaa |

2.3 Reeling

Katapuldi reelingu kogupikkus on 16.8 m ning see on kombineeritud kolmest erinevast sektsioonist. Reelingu pikkus on optimeeritud vastavalt etteantud maksimaalsele kiirendusele ning ei ületa maksimaalne jõu korral 10.2 g. Reelingul on kiirenduseks ettenähtud pikkus 13200 mm, seepärast kiirendussilinder puudub amortisaatorit, mis tasapisi hakkab aeglustama kiirendussilindrit ja kelku.

Keskmine reeling on nii-öelda põhireeling, mis on kinnitatud haagisele tagumise pöördepunkti ja esimese kallutusmehhanismiga, mis võimaldab kogu reelingu nurga reguleerida horisontaaltasapinnast 15 ° nurga alla. Kõik reelingu sektsioonid on võrdse pikkusega 5.6 m ja on mõeldud käsitsi lahti voltimiseks, kui haagis on maapinnal tasandatud ja tugijalgade abil stabiliseeritud. Esimene reeling volditakse haagise paremalt küljelt ja tagumine reeling haagise vasakult küljelt. Lahtivoltimisel lukustatakse reeling keskmise reelinguga lukustusklambrite abil. Selline lahti voltimine võimaldab katapuldi mahutada ISO20 merekonteinerisse. Voltimise hingedeks on terasvõllid, mis libisevad pronkspuksidel ning transpordi ajaks lukustatakse esimene ja tagumine reeling kinnitusklambritega keskmise rööpa külge.



Joonis 2-18. Reelingu ülevaade

Kogu reelingu projekteerimisel oli põhiprintsiipideks kergus, lihtsus ja toodetavus. Kuna reelingu sektsioonid on suhteliselt pikad, siis tuli võimalusel keevitamist vältida, sest keevitamisel tekivad materjali sisepinged ja reeling võib lihtsasti kõveraks minna. Materjalivaliku poolest oli esialgu plaanis kasutada terast, kuid pärast esialgset modelleerimist selgus, et terasest reeling üksi kaaluks ligikaudu 1500 kg ning see nõudis disaini ümbermõtlemist alumiiniumi peale.

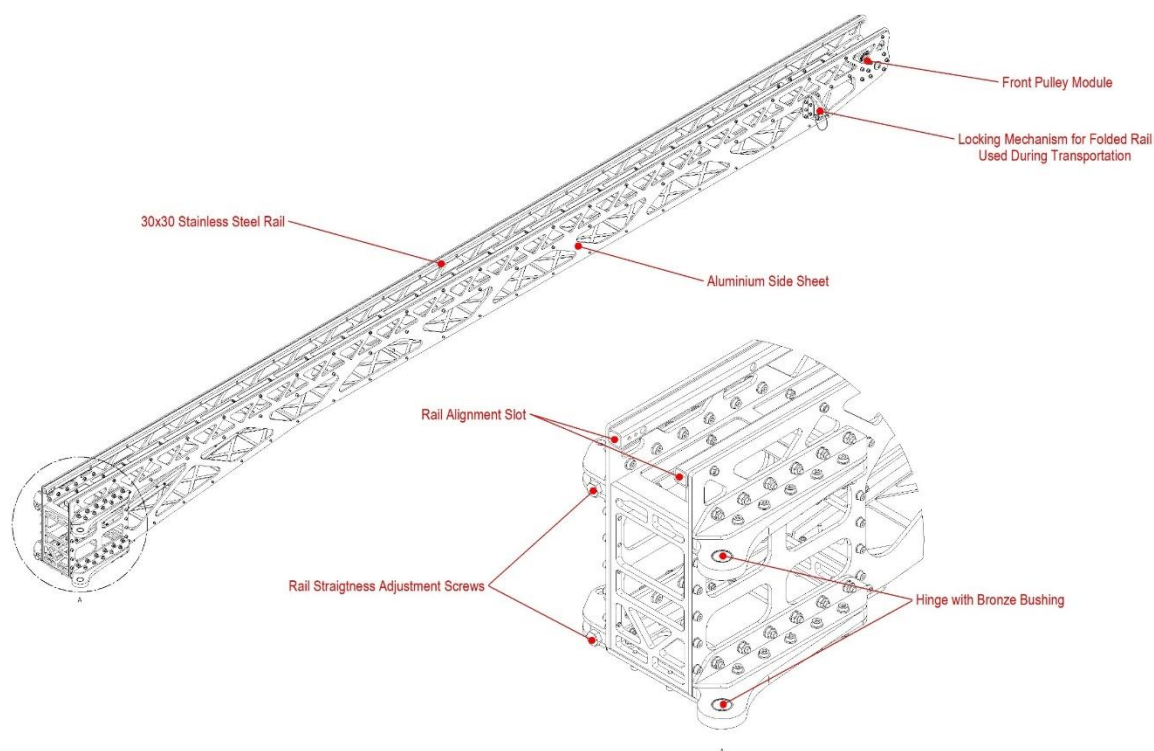
Kõik kolm sektsiooni on projekteeritud samal põhimõttel. Reelingu küljed koosnevad laserlõigatud alumiiniumlehtedest, mis on keskelt ühendatud laserlõigatud alumiiniumprofiilidega. Kogu külgleht on valmistatud ühest 6m pikkusest alumiiniumlehest ning on keskmiste profiilidega ühendatud poltidega. Reelingu rööbasteks kasutatakse roostevaba terasprofiili. Selline disain väldib pikkade reelingute keevitamist ja hoiab ära sisepingete tekkimise ja reelingu kõverdumise. Reelingu valmistamine on seetõttu tunduvalt kiirem ja täpsem ning puudub vajadus spetsiaalseteks rakisteks. Lisaks on võimalik üksikuid detaile asendada. Selline disainilahendus võimaldab ehitada kerge konstruktsiooni, mis on tugev ja jäik toetama laskmise ajal tekkinud jõudusid. Kuna konstruktsioonil on väga suur temperatuurivahemik, milles ta töötama peab, pöörati materjalide valikul sellele tähelepanu ning valitud alumiiniumi ja roostevaba soojuspaisumine on üsna lähedane.

2.3.1 Esimene reeling

Esimene reeling on kõige lihtsam sektsioon, millel puudub juhtmestik, pneumaatika ja hüdraulika. Reelingu eesotsas on kiirendusnööri plokiratas koos nööri juhikutega, mis takistavad nööri maha jooksmist. Lisaks on reelingu eesotsas transpordiasendi lukustusmehhanism, mis võimaldab reelingut lihtsat kokku pakkimist ja lukustamist. Esimene reeling volditakse katapuldi paremale küljele ja voltimiseks on kaks hinge. Hingedes on pronkspuksid, mis võimaldavad pikaajalist tööd. Lisaks on reelingu hingekohast joondamiseks paigaldatud reguleeripoldid. Need võimaldavad reelingu joondust küljelt küljele reguleerida. Reelingu siinidel on lisaks oma tsentreerimistihvtid, mis tsentreerivad keskmise ja esimese reelingu siinid.

Tabel 2-6. Esimese reelingu üldandmed

| | |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pikkus | 5680 mm |
| Laius | 410 mm |
| Kõrgus | 455 mm |
| Mass | 115 kg |
| Kasutatud materjalid | <ul style="list-style-type: none"> • Küljed – 6082-T6 Aluminium • Profiil – AW-6060-T6 Aluminium • Poldid – Steel Bolts - ZN coated • Võllid – Chrome Coated Steel • Siinid – Stainless E1.4571 - Calibrated |



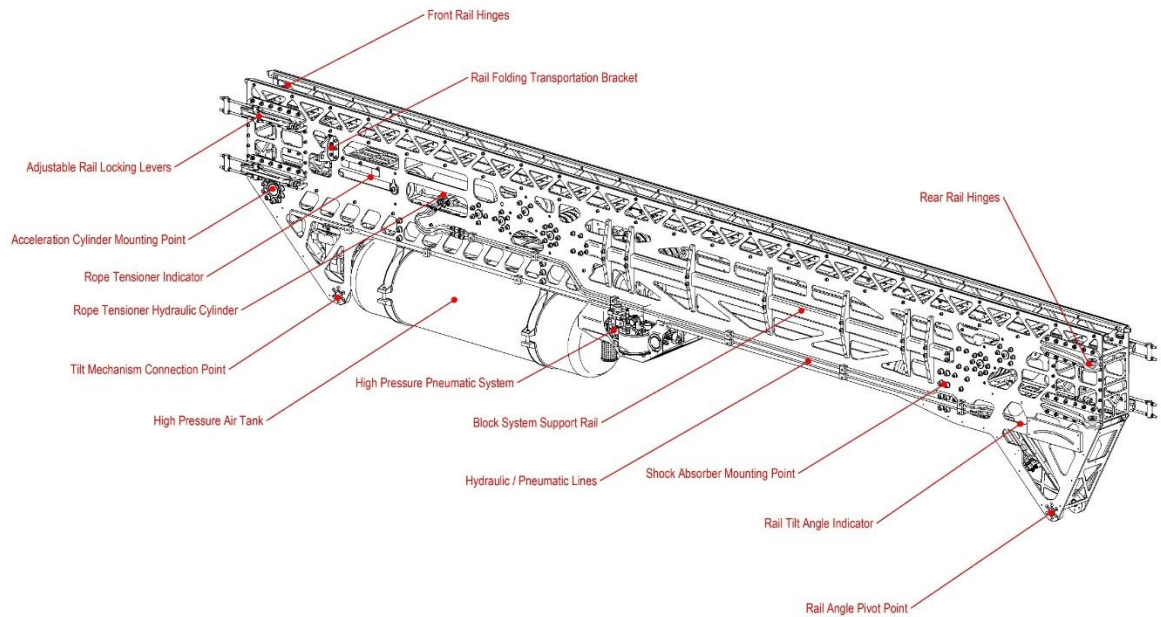
Joonis 2-19. Esimese reelingu ülevaade

2.3.2 Keskmine reeling

Keskmine reeling on kõige keerulisem reelinguseksioon, kuhu kinnituvad pneumosüsteemi osad, hüdraulikaosad ja juhtmestik. See on reelingu põhiosa, kuna plokimehhanism koos pneumaatilise kiirendussüsteem ja pidurdussüsteem on kinnitatud otse keskmisele reelingule. Lisaks kinnituvad esimene ja tagumine reeling keskmisele reelingule, mis on omakorda kinnitatud treilerile. Disainil on järgitud sama lähenemist nagu ka esimesel ja tagumisel reelingul, ehk koosneb kahest külgsplaadist, mille vahel on alumiiniumprofiil ning kõik on omavahel ühendatud poltliitega. Monteerimisel on võimalik kogu konstruktsioon koostada enne kui alamsüsteeme kinnitama hakatakse. See lihtsustab ka hilisemat hooldust ning remonti, kus komponentidele on võimalik otse ligi pääseda. Lisaks on keskmisel reelingu paremal küljel remondi / hoolduse ajaks eemaldatav tugiplaat, mis võimaldab paremat ligipääsu plokimehhanismile.

Esimene ja tagumine reeling on ühendatud keskmise reelinguga liigendmehhanismi abil, mis võimaldab esimest / tagumist reelingut pöörata 180 ° ning lukustada transpordi ajaks keskmise reelingu külge. Kasutamiseks volditakse reelingud välja ning lukustatakse reguleeritava lukustusmehhanismiga. Keskmine reeling on kinnitatud otse haagisele ning esiosa on ühendatud reelingu kallutusmehhanismiga, mis võimaldab reelingut kallutada kuni 15 ° nurga alla. Kuna katapultide juhtsüsteemi pult paigutatakse

alati katapuldi vasakule küljele, on kõik olulised komponendid ja indikaatorid paigutatud reelingu vasakule küljele, mis võimaldab operaatoril koheselt näha, kui midagi on valesti.

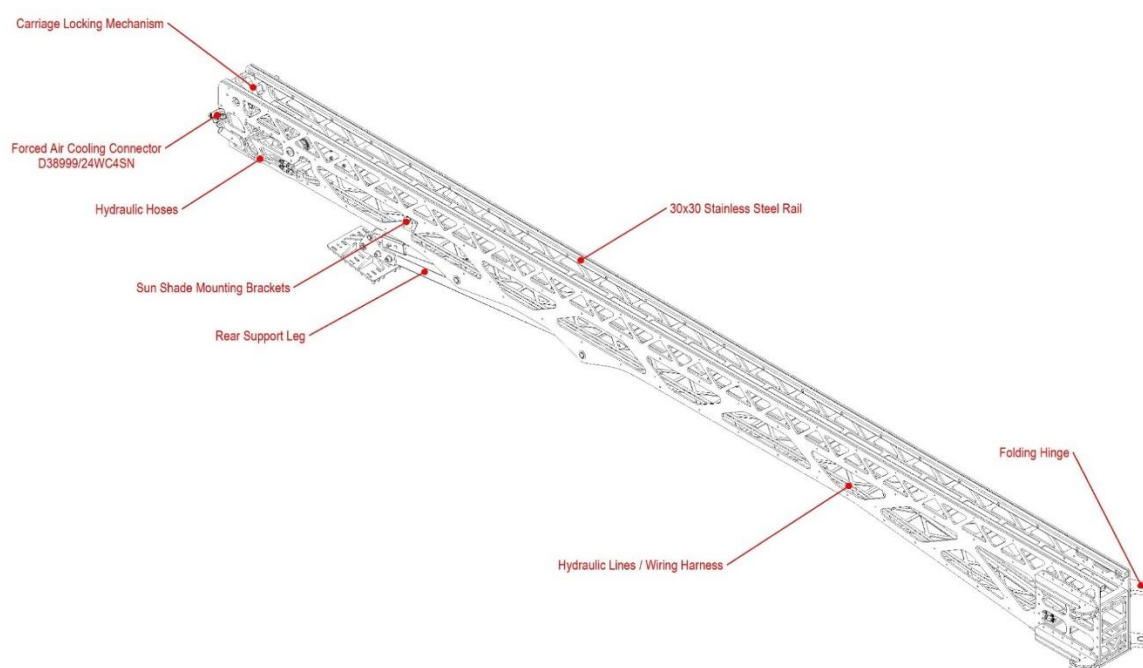


Joonis 2-20. Keskmise reelingu ülevaade

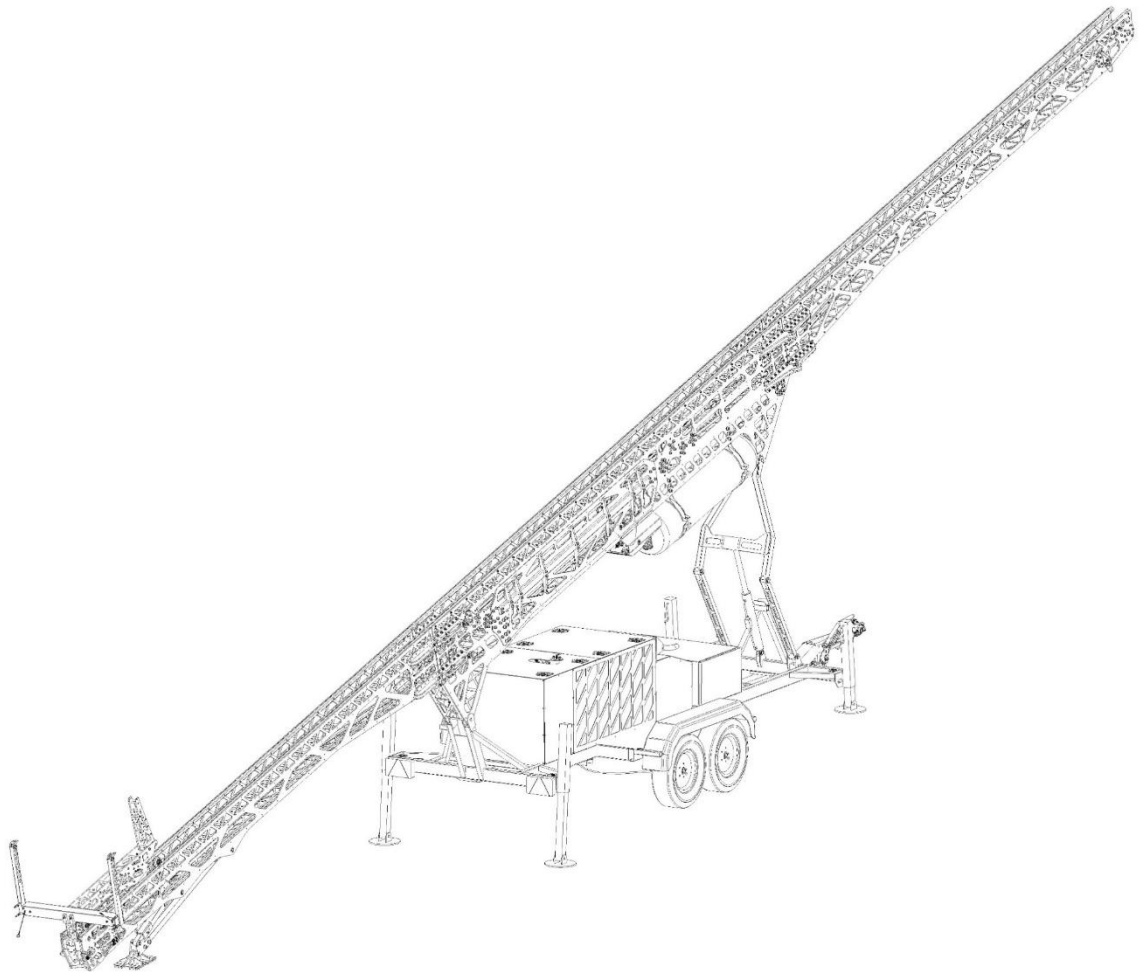
| | |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pikkus | 5680 mm |
| Laius | 450 mm |
| Kõrgus | 1035 mm |
| Mass | 675 kg (<i>sealhulgas kõik komponendid ja nõör</i>) |
| Kasutatud materjalid | <ul style="list-style-type: none"> • Küljed – 6082-T6 Aluminium • Profiil – AW-6060-T6 Aluminium • Poldid – Steel Bolts - ZN coated • Võllid – Chrome Coated Steel • Siinid – Stainless E1.4571 - Calibrated |

2.3.3 Tagumine reeling

Tagumine reeling kinnitub liigendmehhansimi abil keskmisele reelingule ning tagumine reelingu osa toetub tugijala abil maapinnale. Tugijalg on projekteeritud seadistatavaks reelingu nurga töövahemikuks 10° - 15° . Tagumise tugijala toetusplaat on projekteeritud pehmele pinnasele, ning on toetuspinnaga 300 mm x 220 mm. Tugijalg on projekteeritud koormusele 10 kN. Reelingu tagaosasse kinnitub stardiadapteri lukustusmehhanismi moodul, mille abil lukustatakse stardiadapter. Hüdroliidid ja elektrijuhtmestik on paigaldatud reelingu sisse, et kaitsta neid mehaanilise vigastuste eest, mis võivad tekkida kuna reeling läheb maapinna lähedale.



Joonis 2-21. Tagumise reelingu ülevaade

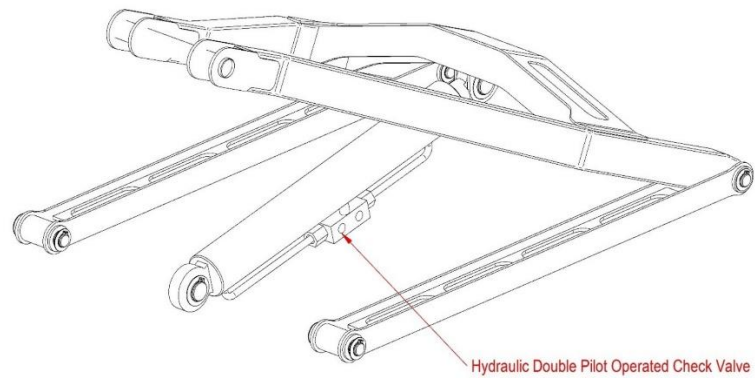


Joonis 2-22. Reeling kallutatud 15° nurga alla

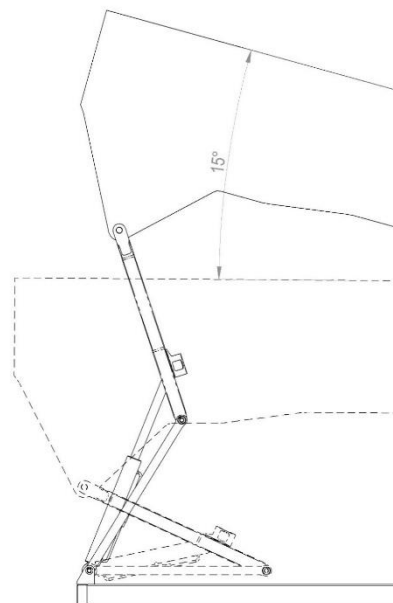
2.3.4 Reelingu kallutusmehhanism

Reelingu kallutusmehhanism on konstrueeritud tugiraamina, mis võimaldab reelingut kallutada 0 ° kuni 15 °. Mehhanismis kasutatakse lühikest hüdrosilindrit, töökäiguga 400 mm ja tugiraami, mis toetab reelingut küljelt küljele liikumisele ning annab täiendava stabiilsuse. Stabiilsuse lisamiseks oli projekteerimise alguses kaks varianti – kasutada kahte pikka hüdrosilindrit – töökäiguga 800 mm või luua mehhanism. Variante kaaludes otsustati tugiraami kasuks, kuna seeläbi oli võimalik massivõit kuni 10 kg. Turvalisuse lisamiseks on hüdrosilindrile paigaldatud kahepoolne lukuventiil, mis väldib reelingu alla kukkumist, kui hüdrovoolik peaks purunema.

Kogu mehhanism on projekteeritud viisil, et maksimaalsed koormused avalduksid mehhanismi liikuma hakkamisel ning kui mehhanism on jõudnud tööasendisse, reelingu nurk 10 ° kuni 15 °, on koormused mehhanismile kõige väiksemad. Kogu mehhanismi väljatöötamiseks kasutati Matlab Simulink mudelit.



Joonis 2-23. Reelingu kallutusmehhanismi ülevaade



Joonis 2-24. Reelingu kallutusmehhanismi liikumismudel

Tabel 2-7. Reelingu kallutusmehhanismi üldandmed

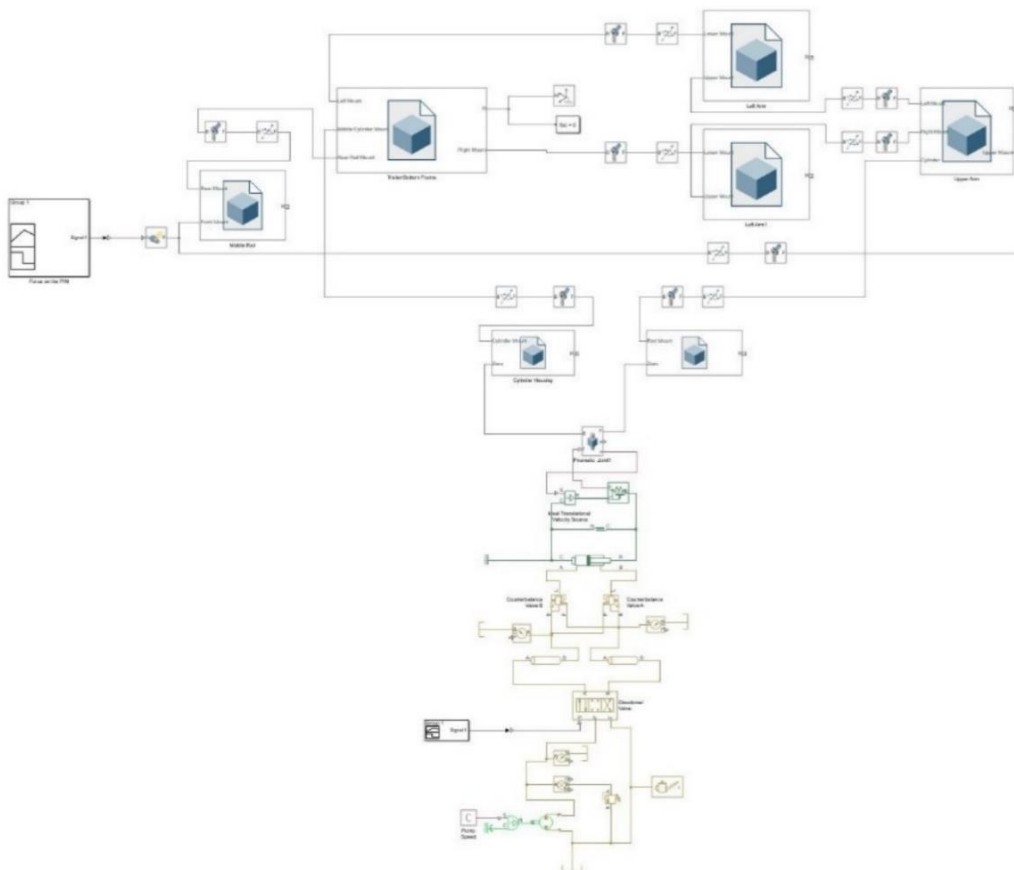
| | |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Mass | 44.1 kg |
| Hüdrosilindri kolvi diameeter | 60 mm |
| Hüdrosilindri sääre diameeter | 40 mm |
| Hüdrosilindri töökäik | 400 mm |
| Hüdrosilindri jõud | 50.8 kN (180bar) |
| Maksimaalne reelingu nurk | 15° |
| Minimaalne reelingu nurk | 10° - tööasend (0° transpordiasend) |

Disaini analüüs

Disaini väljatöötamiseks ja täpsete jõudude teadasaamiseks loodi Matlab Simulink hüdraulika ja Multibody mudelid, kuna mehhanism oli piisavalt keerukas ning seeläbi oli võimalik disain täielikult läbi analüüsida. Lisaks oli võimalik väljavalitud hüdrojaama parameetrid sisestada mudelisse ning realselt näha mehhanismi liikumiskiiruseid ning võimalikke kitsaskohti. Kuna Simulinkist on võimalik väljastada liigenditesse mõjuvad jõud, oli võimalik neid jõude kasutada hiljem FEM analüüsil.

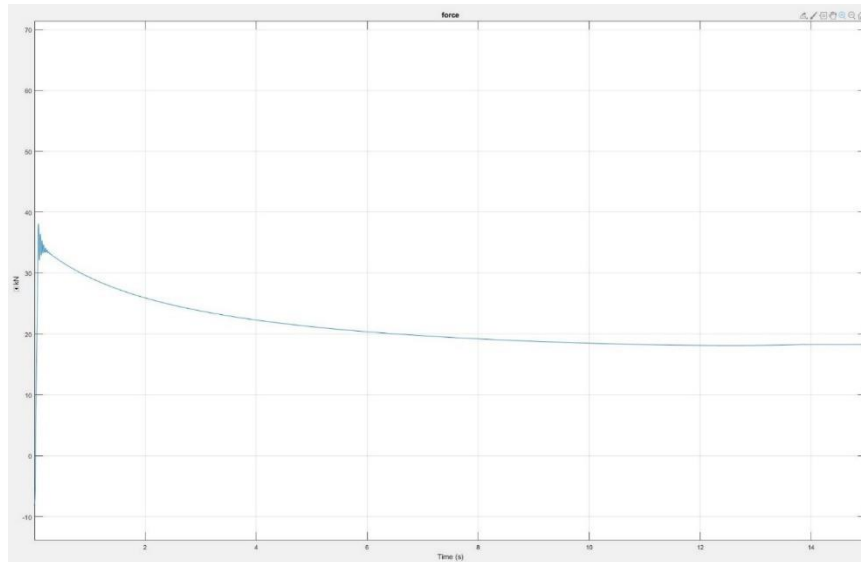
Saavutatavad eesmärgid olid järgmised:

- Hüdrosilindri dimensioneerimine
- Hüdroüsteemi dimensioneerimine (mehhanismi liikumise aeg)
- Mehhanismi / süsteemi kitsaskohtade leidmine
- Igale liigendile avaldatavad maksimaalsed jõud
- FEM analüüsi sisendjõud mehhanismis

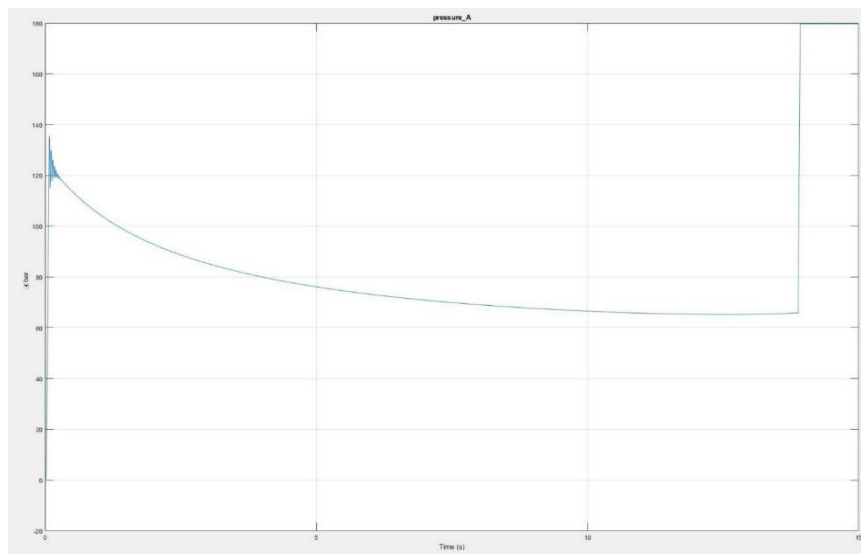


Joonis 2-25. Matlab Simulink reelingu kallutusmehhanismi mudel

Mudelis avaldati mehhanismile koormust 6000 kN ning seeläbi kinnitati, et väljavalitud hüdrosilinder töötab ilma probleemideta. Nagu soovitud, rakenduvad suurimad jõud nii mehhanismis kui hüdrosilindris liigendi liikuma hakkamisel ning reelingu nurga kallutamisel 10° kuni 15° on jõud märkimisväärselt väiksemad.



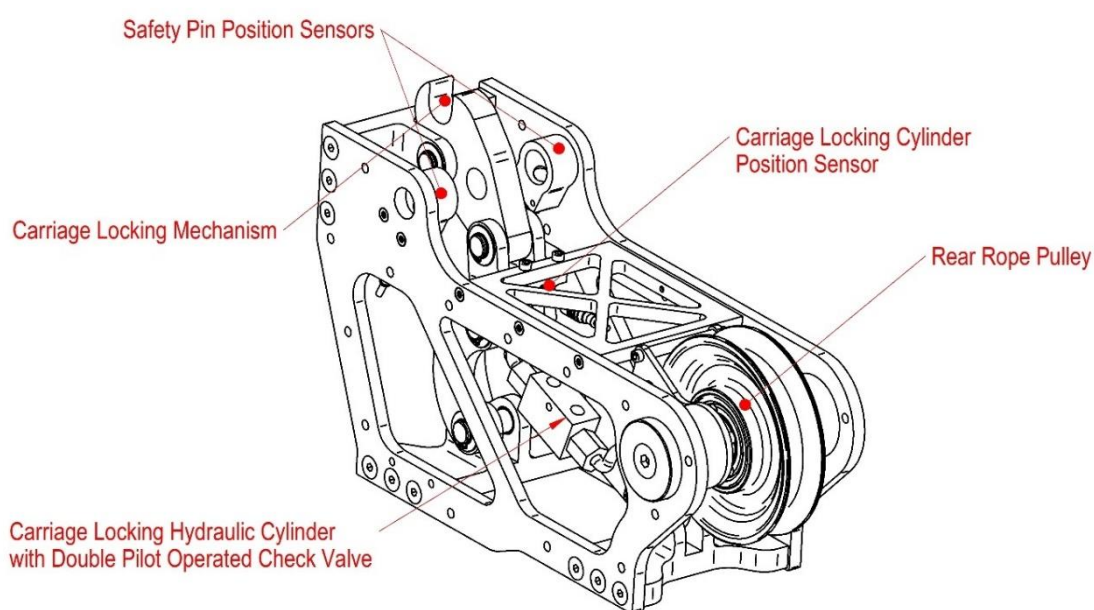
Joonis 2-26. Reelingu kallutusmehhanismi silindri poolt tekitatud jõud



Joonis 2-27. Reelingu kallutusmehhanismi silindri tööõhk

2.3.5 Stardiadapteri lukustusmehhanism

Stardiadapteri lukustusmehhanism on mõeldud stardiadapteri paigal hoidmiseks, kui kogu süsteem on survestatud ja stardiiks valmis. Lukustusmehhanism on nii-öelda viimane lüli, mis stardiadapteri ja lennuvahendi vabastab ning seetõttu on süsteemi töökindlus ja turvalisus väga oluline. Kogu mehhanism on projekteeritud moodulina ja on seetõttu täielikult eelkoostatav ja testitav, enne tagumise reelingu külge paigaldamist. Mehhanism koosneb tagumisest pidurdusnööri plokirattast, lukustusmehhanismist endast, hüdrosilindrist, asendianduritest, turvatihvtist.

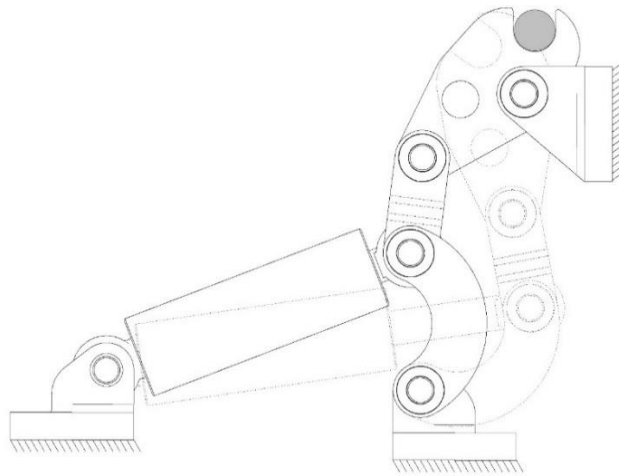


Joonis 2-28. Lukustusmehhanismi ülevaade

Lukustusmehhanism ise koosneb kolmest lülist ja hüdrosilindrist. Mehhanism on projekteeritud nii, et kui lukusti oleks isesulguv ja et lukustusasendis surutaks silindrit algasendisse. See tähendab, et kui lukustit koormatakse, ei ole võimalik lukusti iseavanemine, näiteks kui hüdraulikavooli puruneb, silindri tihendid lekivad või hüdro süsteemis esineb tõrkeid. Lukusti avamiseks peab hüdro silinder lükkama lüli üle surnud asendi, seejärel avab lukusti ennast ise ja silinder ei pea jõudu avaldama.

Stardiadapter kinnitatakse ülemise lukustushoova väljalõike vahele. Vabastamiseks peab lukustushoob pöörama 55 kraadi, misjärel stardiadapter vabastatakse. Kogu lukustusmehhanismil on lisaks mehaaniline turvatihvt. Lukustustihvti turvalisus tuleb asjaolust, et samaaegselt lukustatakse nii lukustusmehhanismi liikumine kui ka stardiadapter ise. See tähendab et lukustustihvt läbib nii lukustusmehhanismi kui ka stardiadapterit, seeläbi suurendades märkimisväärselt turvalisust. Lukustustihvt on projekteeritud samaaegselt vastu pidama kiirendusnööri jõudu ja hüdro silindri avamisjõudu, mis teoreetiliselt on juhtloogikas välistatud, kuna hüdro silindri avamist ei

lubata enne, kui lukustustihvt on eemaldatud. Lisaks on silindrile paigaldatud kahepoolne lukuventiil.



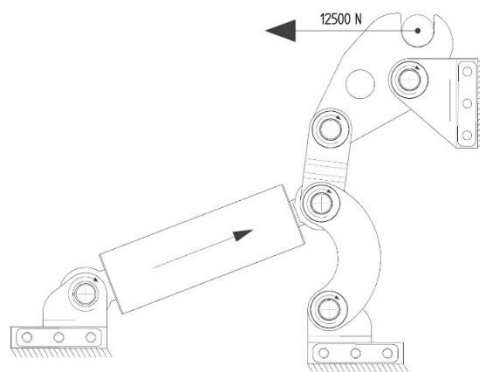
Joonis 2-29. Lukustusmehhanismi külgvaade - suletud ja avatud asend

Disaini analüüs

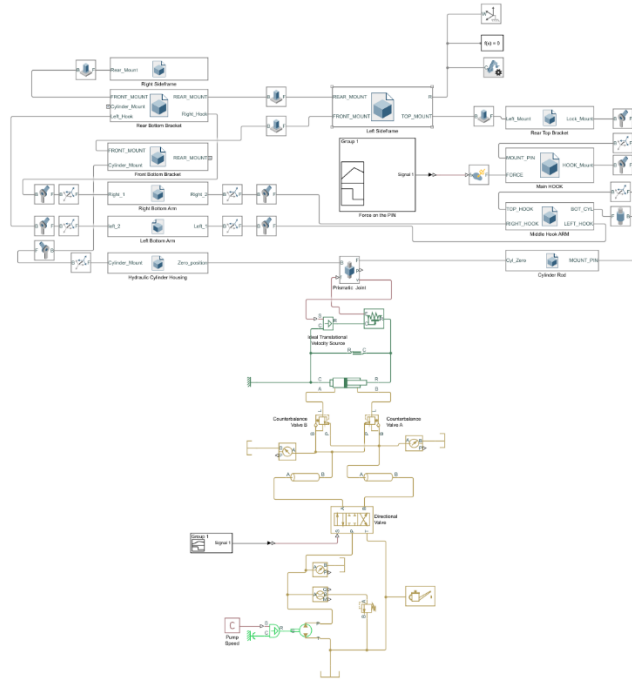
Kuna lukustusmehhanismi puhul on tegemist võtmetähtsusega komponendiga, oli oluline kogu mehhanism läbi simuleerida, et vältida võimalikke disainivigasid ning saada kogu ülevaade mehhanismis tekkivate jõudude kohta. Kuna Simulinkist on võimalik väljastada liigenditesse mõjuvad jõud, oli võimalik neid jõude kasutada hiljem FEM analüüsil.

Saavutatavad eesmärgid Matlab Simulink mudelile olid järgmised:

- Hüdrosilindri dimensioneerimine
- Hüdroüsteemi dimensioneerimine (mehhanismi liikumise aeg)
- Mehhanismi / süsteemi kitsaskohtade leidmine
- Igale liigendile avaldatavad maksimaalsed jõud
- FEM analüüsi sisendjõud mehhanismis

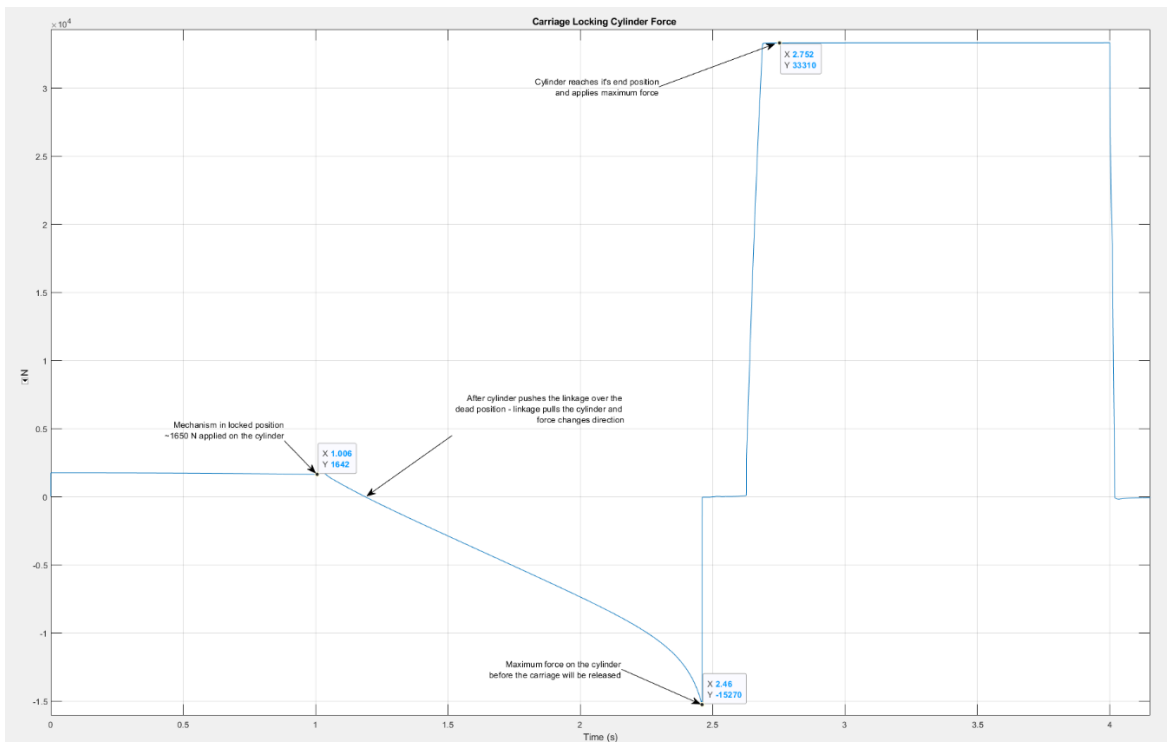


Joonis 2-30. Simulatsioonis lukustusmehhanismile avaldatud jõud



Joonis 2-31. Matlab Simulink hüdraulika ja Multibody simulatsioonimudel

Mudeliga kinnitati, et mehhanism töötab täpselt nii nagu oli ette nähtud ning etteantud hüdrosilindri parameetrid töötavad probleemideta. Alumiselt graafikult on näha, et kui lukustile on avaldatud koormus 12.5 N, siis silindrit surutakse sisse 1.65 kN suuruse jõuga ning lukusti avamiseks peab silinder tekitama maksimaalse jõu 15.3 kN, misjärel lukustihoob liigub üle 0 asendi, ning lukusti avaneb iseenesest.

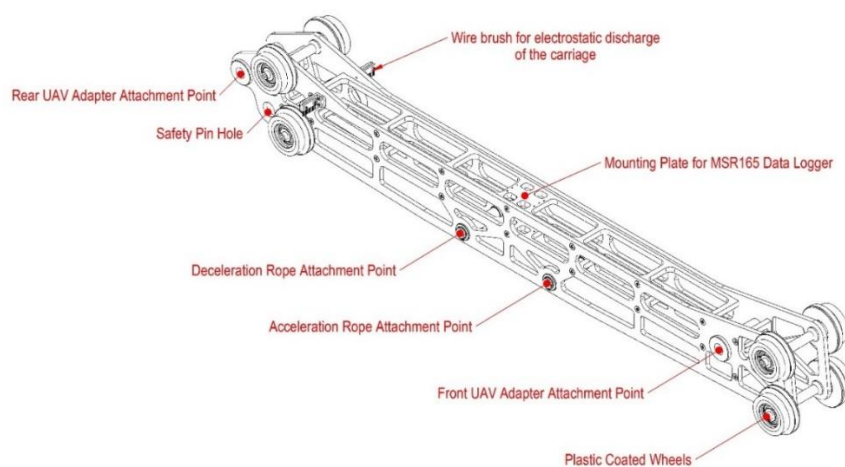


Joonis 2-32. Lukustismehhanismi hüdrosilindri jõud

2.4 Stardiadapter

Stardiadapter liigub suurel kiirusel mõõda reelingut. Stardiadapter koos UAV adapteriga on põhiline pidurdusjõu tekitaja, sest stardiadapteri lõppkiirus võib ulatuda 52 m/s. stardiadapteri külge kinnitatakse vastava UAV adapter, mida tahetakse startida. Disain on võimalikult lihtne ja universaalne, mis võimaldab paigaldada erinevate UAV aluseid.

Põhikonstruktsiooni moodustavad kaks küljeplaati, mis ühendab omavahel rataste telgi ja horisontaalseid tugiplaate. Kõik plaadid on valmistatud 6-seeria alumiiniumist ning rataste teljed on valmistatud roostevabast terasest. Adapteril on kokku kaheksa ratast – 4 ees ja 4 taga, mis on reelingu terasprofiili ümber. Rattad on valmistatud samuti alumiiniumist, kuid kaetud MILPUR 1495A plastikuga, et vähendada rataste müra ja kulumist. Plastik on vulkaniseeritud alumiiniumile ning maha tuleku vältimiseks on välipinnale treitud sooned. Rataste disain ei luba neil reelingu terrassiini vahelt eemalduda, isegi kui plastik peaks kõikidelt ratastelt eemalduma. Kuna lennubahendi raskuskese asub adapterist ligikaudu 750 mm kaugusel, mõjuvad kiirendades reaktsioonijõudude tõttu koormused ainult esimestele alumistele ja tagumistele ülemistele ratastele. Nööri kinnituspunktid asuvad adapteri all keskel ning kinnituspunktid kiirendus ja pidurdusnööriks on eraldi. Lennubahendi adapter kinnitatakse eest ja tagant alumiiniumvõlli abil, tagumisest võllist hoiab adapterilukusti adapterit paigal. Adapteri tagaosas asub veel turvatihvti ava, mille abil lukustatakse mehaaniliselt stardiadapter reelingu külge. Kuna kasutatakse plastikkattega rattaid, pöörati tähelepanu ka elektrostaatikalale, mis tekib kui plastik liigub suurel kiirusel mõõda roostevaba terasprofiili. Seetõttu paigaldati staatilise elektri mahalaadimiseks traatharjad, mis hõõruvad mõõda terasprofiili ja ühendavad seeläbi stardiadapterit katapuldiga.



Joonis 2-33. Reelingu stardiadapter

Tabel 2-8. Stardiadapteri üldandmed

| | |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mõõtmed (Pikkus x laius x kõrgus) | 1315mm x 166mm x 187mm |
| MASS | 10.1 kg |
| Kasutatud materjalid | Põhiraam – Alumiinium 6080-T6 Võllid – 316 Roostevaba Tihvtid – 316 Roostevaba Rattad – Alumiinium 6082-T6 Rataste kate – MILPUR 1495A |

Maksimaalne koormus igale laagrile

$$F = \frac{4243 \text{ N}}{2 (\text{Number of bearing in parallel})} = 2121.5 \text{ N} \quad (20)$$

Kuna rataste väli diameeter on 70 mm, lähevad ratta pöörded väga kõrgeks, mida tuleb laagri valikul jälgida.

Maksimaalne ratta pöörded:

Maksimaalne stardiadapteri kiirus: 52 m/s – 3120 m/min

Ratta väli diameeter: 70 mm – 0.07 m

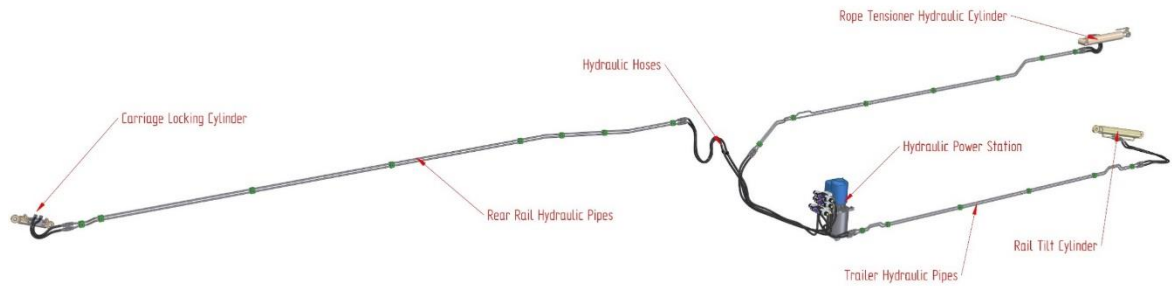
Arvutus:

$$RPM = \frac{\text{Kiirus } (\frac{m}{min})}{\text{Ratta ümbermõõt } (m)} = \frac{3120 \text{ m/min}}{0.2199115 \text{ m}} = 14187 \text{ RPM} \quad (21)$$

Valitud laagriks osutus 6302-2RSH, mille kiiruse piirang on 12000 RPM. Tegemist on kummitihendiga laagriga ning sama mõõtu laager metallkaitsetega lubab kuni 18000 RPM. Kuna kummitihendid pakuvad märkimisväärselt paremat kaitset tolmu eest ning maksimaalne kiirus on väga lühikeseks perioodiks, siis otsustati et kummitihendiga laagrite kasuks

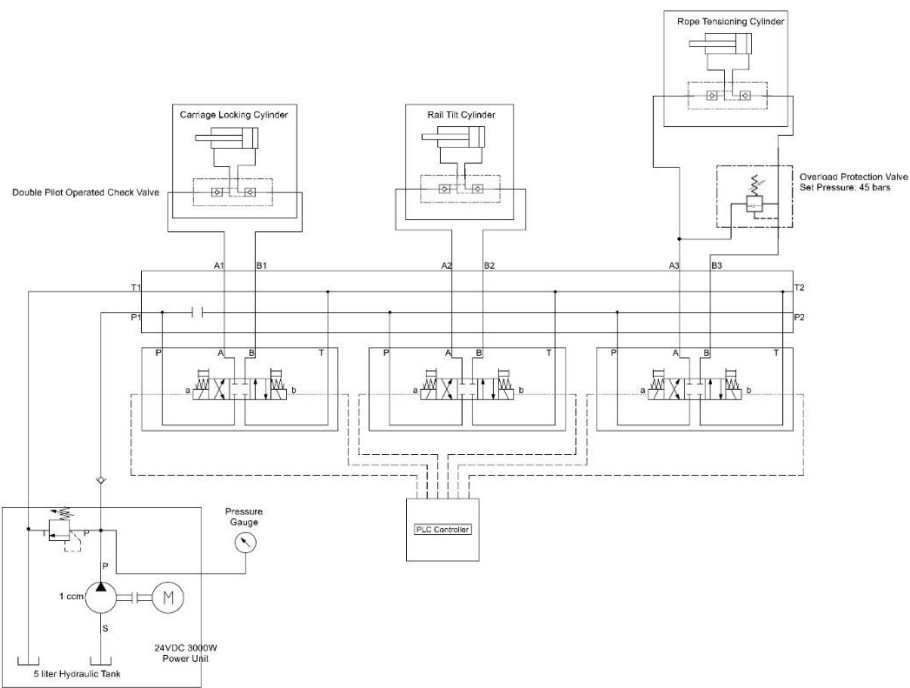
2.5 Hüdrosüsteem

Hüdraulikasüsteem koosneb 5 liitrisest hüdropaagist, elektrimootorist koos pumbaga, solenoidklappidest, hüdrovoolikutest, hüdrotorustikust ning hüdrosilindritest. Kogu hüdrojaam on koostatud moodulitest ning töötab 24 VDC pealt, mis võimaldab seda käitada otse elektrisüsteemist, kasutades kontakteid. Hüdromoodul asub treileri taguosas. Turvalisuse lisamiseks on kõikidele hüdrosilindritele paigaldatud kahepooldes lukuventiilid, millega välistatakse silindrite liikumine kui hüdraulikavoolik peaks purunema.



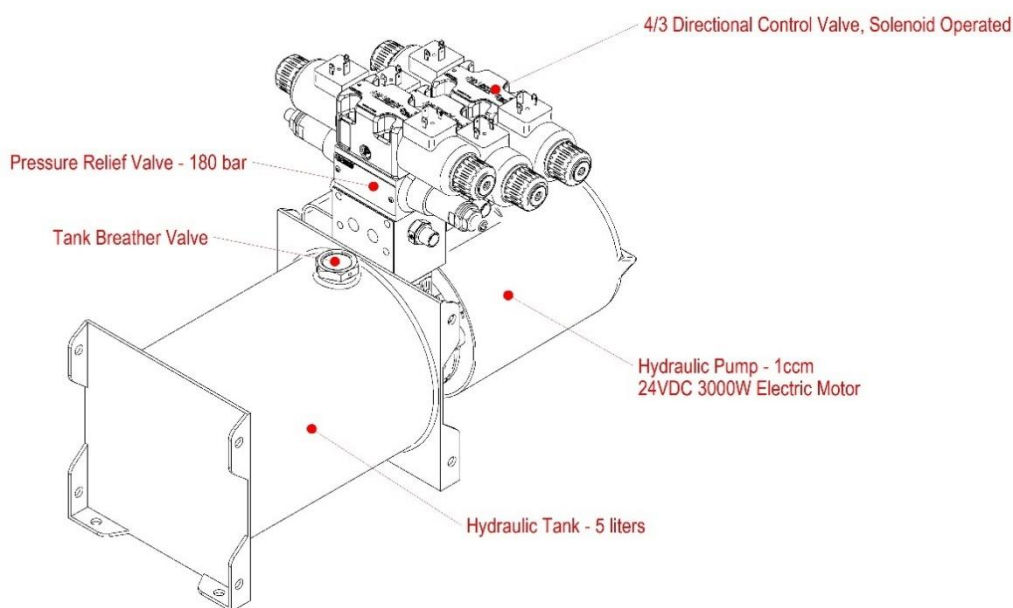
Joonis 2-34. Hüdrosüsteemi ülevaade

Hüdrosüsteemi skeem on suhteliselt lihtne, sest enamus komponente on paigaldatud hüdrojaama moodulile. Kokku on katapuldid 3 hüdrosilindrit. Nööri pingutus silindrile on lisaks paigaldatud eraldi rõhuventiil, mis võimaldab nööri pingutada alati samale pingsusele, olenemata nööri venimisest.



Joonis 2-35. Hüdraulikasüsteemi skeem

2.5.1 Hüdromaam



Joonis 2-36. Hüdromaama ülevaade

Hüdromaama puhul on tegemist täielikult ostutootega. Hüdromaam on paigaldatud treileri tahaossa vertikaalselt. Jaam koosneb 5-liitrisest õlimahutist, hüdropumbast koos 24 VDC elektrimootoriga, 4/3 solenoid suunaventilidest ja nõõripingutusilindri rõhuventiilist. Suunaventilide ja hüdromaama sisselülitamine toimub läbi juhtkontrolleri, mis muuhulgas piirab ka süsteemi üldist voolutarbed hüdromaama kasutamise ajal. Kuna hüdromaama maksimaalne vool läheb suurel tööõhul väga suureks – kuni 80A, tuli juhtloogikas piirata ülejäänud süsteemide tarbimist ning väline kompressor, kompressori soojendi ja lennuvahendi jahuti hüdromaama kasutamise ajal välja lülitada. Lisaks on juhtloogikas võimalik ainult ühte solenoidi korraga juhtida, mis lülitab selleks ajaks sisse ka hüdromaama. Seetõttu pole võimalik kahte silindrit korraga liigutada.

Tabel 2-9. Hüdromaama üldandmed [20]

| | |
|-------------------------|--------------------------|
| Mootori sisendpinge | 24 VDC |
| Mootori nominaalvõimsus | 3000 W |
| Töötingimused | Pidev töötükkel |
| Hüdropumba töömaht | 1 cc/rev |
| Maksimaalne vool | 80A – 200 bar |
| Q (l/min) | keskmine – 4.5 l/min |
| Töötemperatuur | -20°C - +80°C – |
| Õlimahuti suurus | 5 liitrit |
| Maksimaalne tööõhk | 200 bar |
| Mooduli mass | 25 kg |
| Mooduli mõõtmed | 490 mm x 220 mm x 360 mm |

2.5.2 Hüdrosilindrid

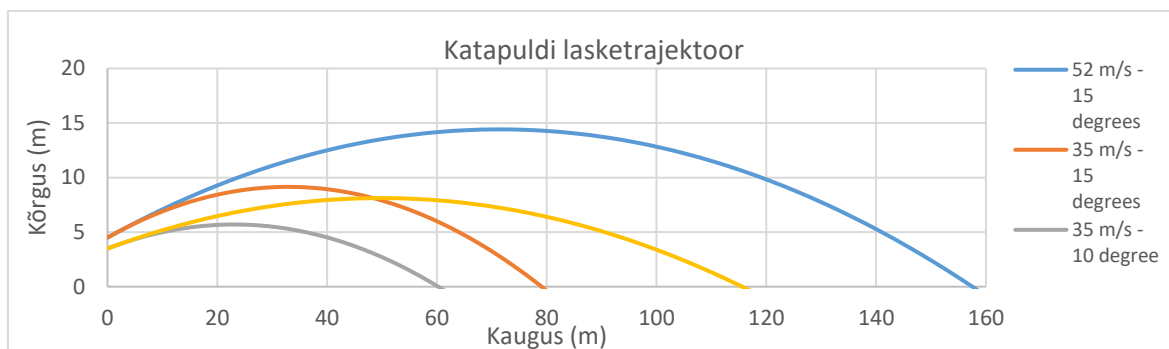
Hüdrosilindrite parameetrid selgusid põhjaliku analüüsi tulemusel. Kuna hüdrosilindrite andmetest sõltus omakorda hüdrojaama parameetrid, loodi tabel, kus on välja toodud kõikide hüdrosilindrite parameetrid, sisemine ruumala, maksimaalsed jõud, liikumiskiirused. Kõik hüdrosilindrid on valmistatud tellimisel, kuna igale silindrile on paigaldatud kahepoole lukuventiil.

Tabel 2-10. Hüdrosilindrite parameetrid

| Silinder | Reelingu kallutusmehhanism | Stardiadapteri lukustusmehhanism | Nööripingutusmehhanism |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|
| Silindri kolvi diameeter | 60 mm | 40 mm | 60 mm |
| Silindri varre diameeter | 40 mm | 20 mm | 40 mm |
| Silindri töökäik | 400 mm | 75 mm | 350 mm |
| Silindri mass | 14.7 kg | 2.4 kg | 12.4 kg |
| Õlimaht – kolvi pool | 1.13 liters | 0.10 liters | 1.00 liters |
| Õli kogumaht – kolvi pool | 2.23 liters | | |
| Õlimaht – varda pool | 0.63 liters | 0.07 liters | 0.55 liters |
| Õli kogumaht – varda pool | 1.25 liters | | |
| Maksimaalne jõud – kolvi pool | 50.8 kN | 22.6 kN | 50.8 kN |
| Maksimaalne jõud – varda pool | 28.2 kN | 16.9 kN | 28.2 kN |
| Liikumisaeg – kolvi pool | 15.0 s | 1.2 s | 13.1 s |
| Liikumisaeg – varda pool | 8.3 s | 0.9 s | 7.3 s |

2.6 Juhtpaneel

Kogu katapuldi süsteemi juhtimine toimub läbi eraldiseisva juhtpaneeli, mis ühendatakse 20 m pikkuse juhtmega süsteemiga. Opereerimise ajal viiakse juhtpult katapuldist ohutuse tagamiseks eemale ning kogu juhtimise toimub läbi elektroonilise juhtpuldi. Ohutus on vaja tagada, kuna katapult suudab 65 kg massi visata ~160 m kaugusele. Seetõttu on protseduuriliselt ette nähtud, et operaatorid viibiksid katapuldi taga ning oleks märgistatud ohu ala katapuldi ees.



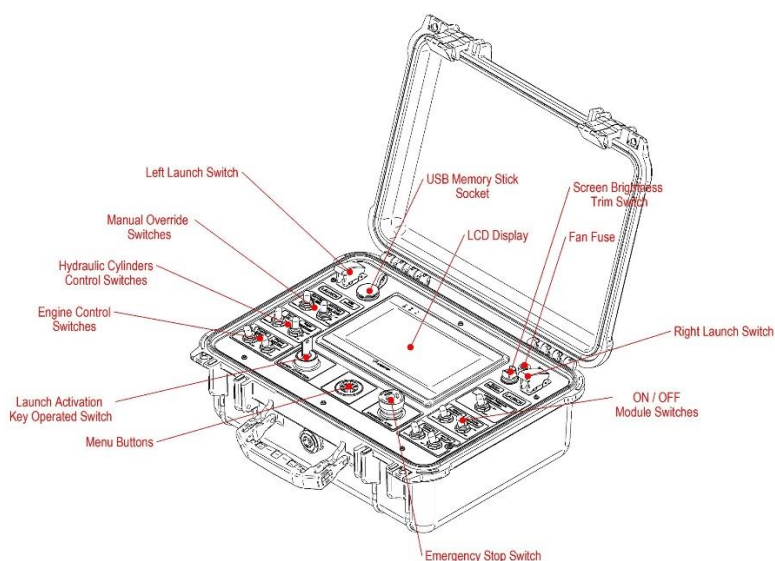
Joonis 2-37. Katapuldi lasketrajektorid erinevate laskekiiruste ja laskenurgaga.

Operaatoril on juhtpaneeli abil võimalik liigutada hüdrotsilindreid, käivitada katapuldi mootor, sisse- ja välja lülitada lisamooduleid. Kaugjuhtpult on projekteeritud veekindlasse kohvrisse ning on mõeldud koos kasutamiseks tööstusliku statiiviga. Juhtpaneel kasutab 7-tollist LCD ekraani, mis kuvab kogu teabe katapuldi kohta ning sealäbi tagatakse operaatori täielik kontroll katapuldi üle. Puuetundlikku ekraani sooviti küll vältida, kuid kõik mitte-puuetundlikud ekraani ei vastanud keskkonnanõuetele, seoses töötemperatuuriga ning veekindlusega. Seetõttu võeti projekteerimisel arvesse, et kõik ohutusega seotud toimingud peavad olema teostatavad füüsiliste nuppudega. Operaatoril on võimalik stardimassi ja kiirust reguleerida füüsilistest nuppudest, vajaliku tööõhu arvutab süsteem ise. Lisaks on võimalik ekraani heledust 10% kaupa muuta, et ekraani oleks mugav kasutada nii päeval kui öösel. Logiandmete salvestamiseks on paneelile paigaldatud veekindel USB pesa, kuhu mäluvälisele salvestatakse logiandmed.

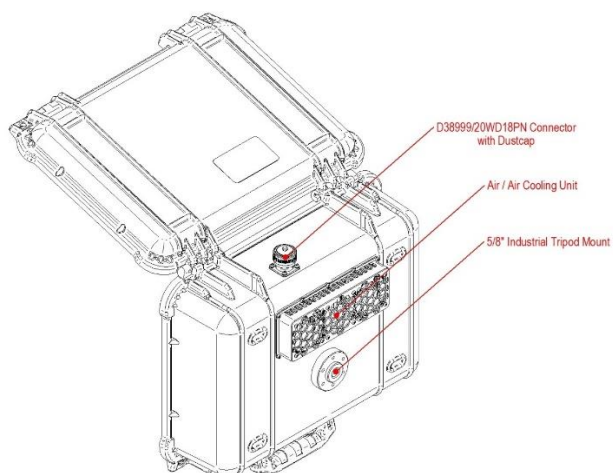


Joonis 2-38. Juhtpult ülevaade koos juhtmega

Juhtpaneeli disain on suhteliselt lihtne, sest Peli kastil on lisapaneelina võimalik osta veekindlat kinnitusserva, kuhu saab otse kinnitada alumiiniumist paneeli. Alumiinium paneel on värvitud ning paneelile kinnitub ekraan ja kõik lülitid. Kuna katapult on mõeldud töötama +55 ° kuumuses, projekteeriti juhtpulti alla õhk-õhk jahutusseade, mis on mõeldud sisemise elektroonika jahutamiseks. Jahutusseade on kinnine, ehk reaalset õhuvahetust sise- ja väliskeskkonna vahel ei toimu, vaid jahutus toimub läbi radiaatorite ja ventilaatorid aitavad hoida konstantset õhuvoolu. Seadme sisemine elektroonika koosneb ekraanist ja sisendmoodulist, mis on läbi PROFINET võrgu ühendatud pea elektrikilbiga, mis asub katapultil. Lisaks on juhtpuldil avariilüliti, mis on läbi ühenduskaabli otseühenduses peakilbis asuva turvarelee. Kolmjalale kinnitamiseks kasutatakse lihtsat 5/8" keermelahendust.



Joonis 2-39. Juhtpaneeli ülevaade - eest

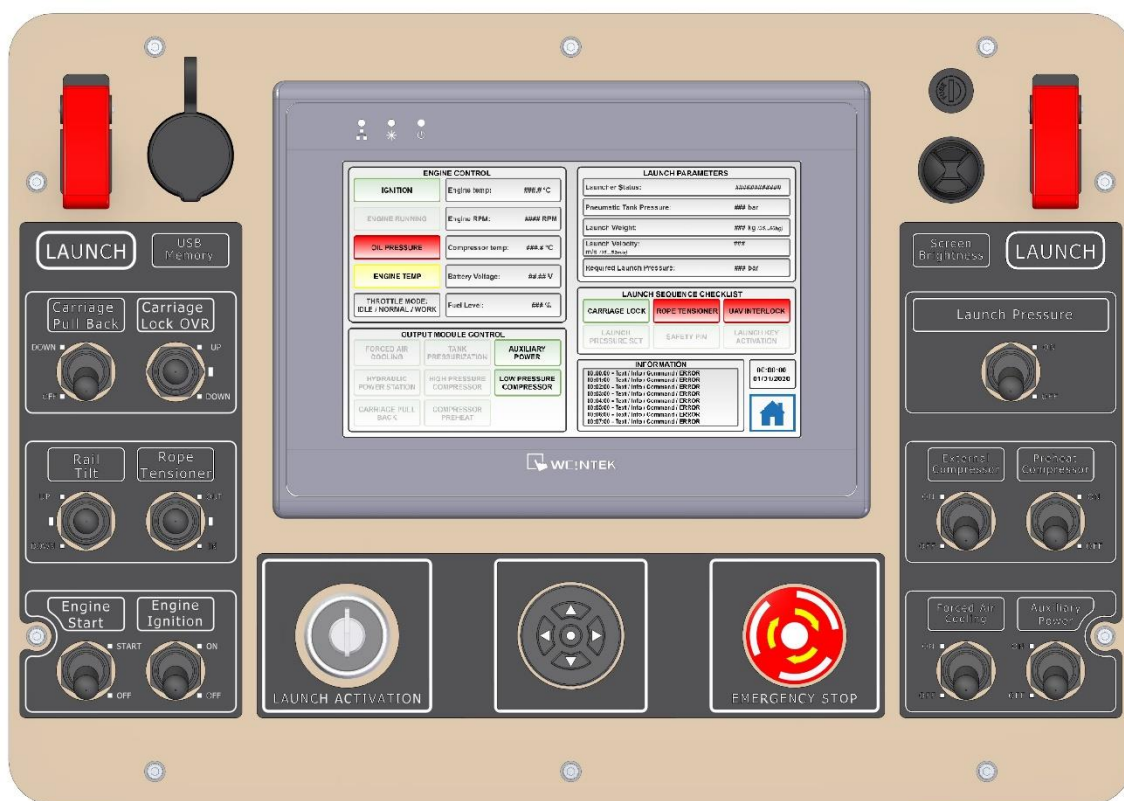


Joonis 2-40. Juhtpaneeli ülevaade - tagant

2.6.1 Kasutajaliidese disain

Kogu katapuldi juhtimine toimub läbi PLC ning erinevad seadmed asuvad samas PROFINET võrgus. Kuna ettevõttes puudus antud hetkel kogemus PLC programmeerimisel, otsustati kogu juhtloogika osa allhankena sisse osta. Tellimuse vormistamiseks tuli kirjeldada kasutajaliidese toimimist ning koostada spetsifikatsioon süsteemile kohalduvatest nõuetest, mis edastati allhankesse.

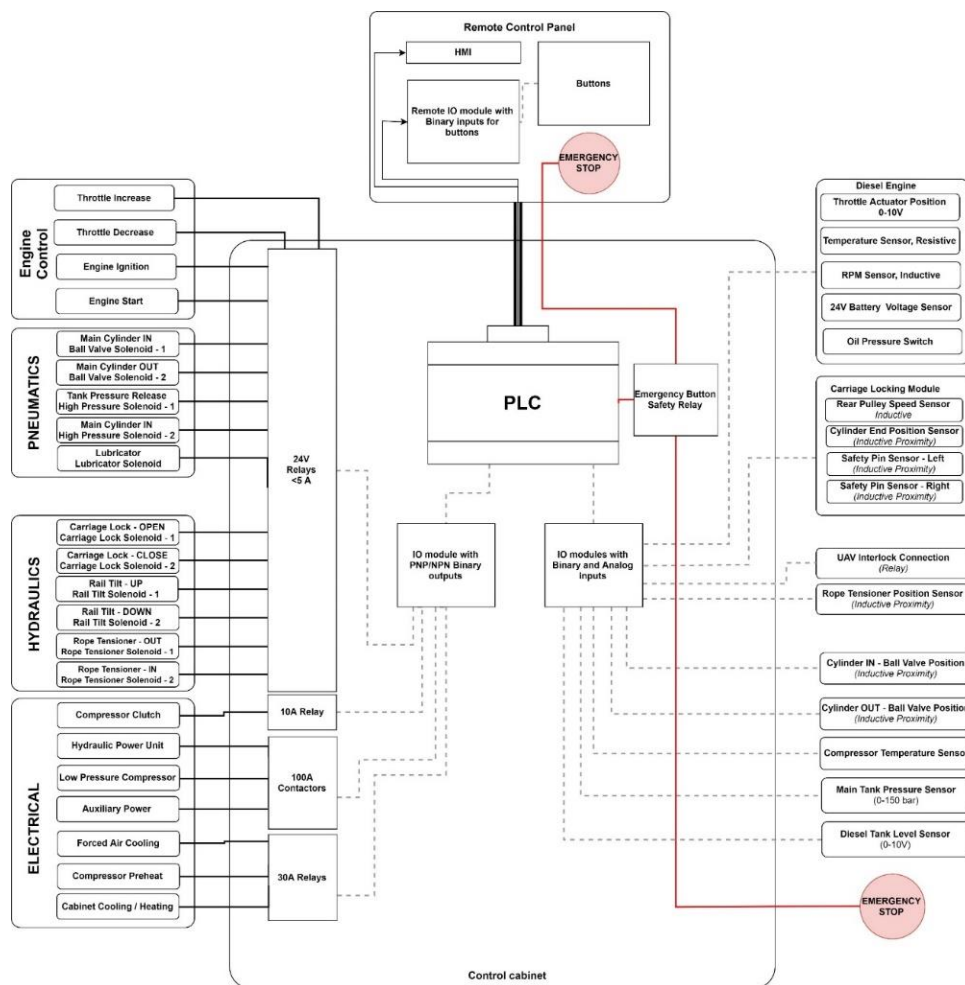
Kasutajaliidese seisukohalt oli oluline, et kogu informatsioon operaatorile oleks kuvatud ühel ekraanipildil. Ekraan on jaotatud 5-ks alaks – mootori juhtimine, väljundmoodulite juhtimine, katapuldi parameetrid, laskmise kontrollnimekiri ja informatsioon. Erinevad alad annavad operaatorile kõige olulisemat teave katapuldi oleku ja funktsioonide kohta. Kasutajaliidese disain on lihtne ja arusaadav ning kõik funktsioonid annavad kohest tagasisidet. Kogu mitteoluline info on peidetud ning ligipääs on läbi menüü.



Joonis 2-41. Esialgne kasutajaliidese ülevaade

2.7 Juhtsüsteem

Kogu katapuldi juhtimine toimub läbi PLC kontrolleri. Kogu põhielektronika, sealhulgas PLC-kontroller, releed, kontaktorid ja turvarelee on kõik paigaldatud põhikontrollkilpi, mis asub treileri tagaosas. Elektrikilp on paigaldatud vibratsioonisummutus trossidele. Kogu kilp on keskkonna eest suletud ning lisaks on elektrikilp peidetud paneelide taha, et vältida päikesekiirguse poolt kilbi soojendamist. Elektrikilbi jahutus on passiivne, kuna elektrikilbis sees puuduvad otseselt jahutust vajavad komponendid. Elektrikilbile on paigaldatud pealüliti, kaugjuhtpuldil pistik, ühenduspistik välisesse süsteemi, toite LED ja hädaseiskamisnupp. Katapuldi funktsioonide juhtimine toimub täielikult läbi kaugjuhtpuldil. Elektrikilbi sisu on koostatud modulaarsetest moodulitest, mis võimaldavad tulevikus lisada erinevaid sisendeid ja väljundeid. Moodulid on omavahel ühenduses PROFINET võrguga. Katapuldil on kokku 2 hädaseiskamisnuppu, üks elektrikilbil ja teine kaugjuhtpaneelil. Hädaseiskamisnupu aktiveerimisel keelatakse kõik katapuldi funktsioonid ning lisaks lülitatakse välja toitesiin väljundreleedele, saavutades sellega füüsilise lahti ühendamise teel ohutuse.



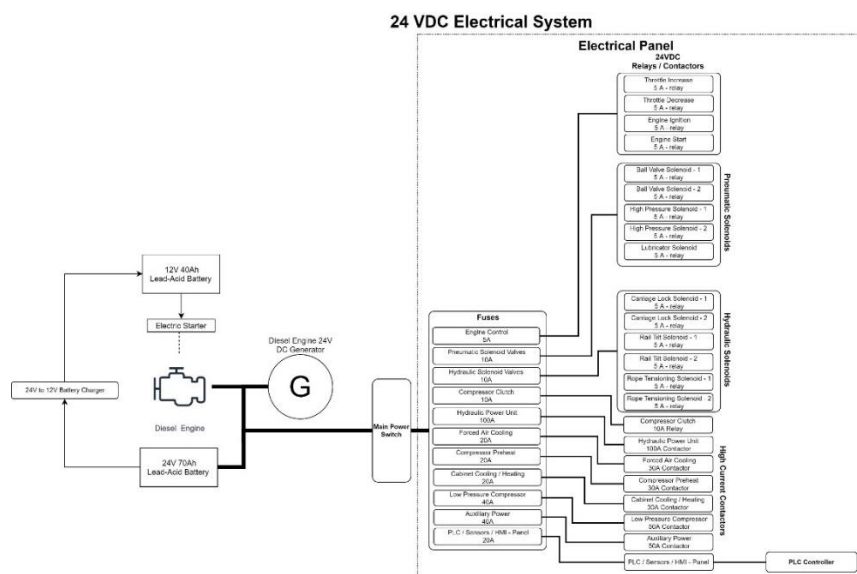
Joonis 2-42. Katapuldi juhtsüsteemi ülevaade

2.7.1 24 VDC Elektrisüsteem

Üks kliendipoolsetest nõuetest oli 24VDC voolu olemasolu, mida on võimalik kasutada välise süsteemi toimiseks. Sellest nõudest tuginedes oli otstarbekas kogu katapuldi elektrisüsteem 24 VDC peale projekteerida. Kuna aga mootori ja kompressori originaal juhtsüsteem toimib 12 VDC pealt, otsustati 12VDC generaator eemaldada ning paigaldada 24 VDC generaator koos 24 VDC akudega, mille pealt toidetakse kogu süsteemi. Kuna mootori ja generaatori originaalsüsteemi ümberehitamine oleks täiendav kulu nii rahaliselt kui ka ajaliselt, siis otsustati 12 VDC süsteem alles jätta, paigaldades 12 VDC akulaadija, mis laeb 24 VDC akude pealt. Süsteemi alles jätmine on võimalik ainult tänu asjaolule, et mootori ja kompressori tarbimine on ainult 1.5 A. Uus paigaldatud 24 VDC generaator on maksimaalse väljundvooluga kuni 110 A.

Akudest lähevad toitejuhtmed elektrikilpi, kus toimub jaotus. Kõik 24 VDC väljundid on kaitstud vahetatava keraamilise sulavkaitsega. PLC ja andurid on kaitstud elektroonilise kaitsmetega, mis on lähtestatavad. Elektroonilised koormusmonitorid kaitsevad üksikuid ahelaid ülekoormuse ja lühiste eest.

Suure koormusega (>20A) väljundite juhtimiseks kasutatakse kontaktoreid, nagu näiteks lennuki jahutussüsteem, kompressori eelsojendi, hüdrojaam, madalarõhu kompressor, väljundtoide. Lisaks on paigaldatud kontaktor ka elektrikapi soojendamiseks ja jahutamiseks. See on elektrisüsteemi disaini sisse projekteeritud, ning kui tulevikus peaks osutama vajalikuks elektrikilbi soojendamine/jahutamine, on võimalik see lihtsasti paigaldada. Solenoidide ja mootori juhtimiseks kasutatakse 5A releesid. Pealülitist süsteemi sisse lülitades, lülitatakse automaatselt sisse PLC juhtelektroonika ning releede ja kontaktorite juhtimine toimub läbi PLC.



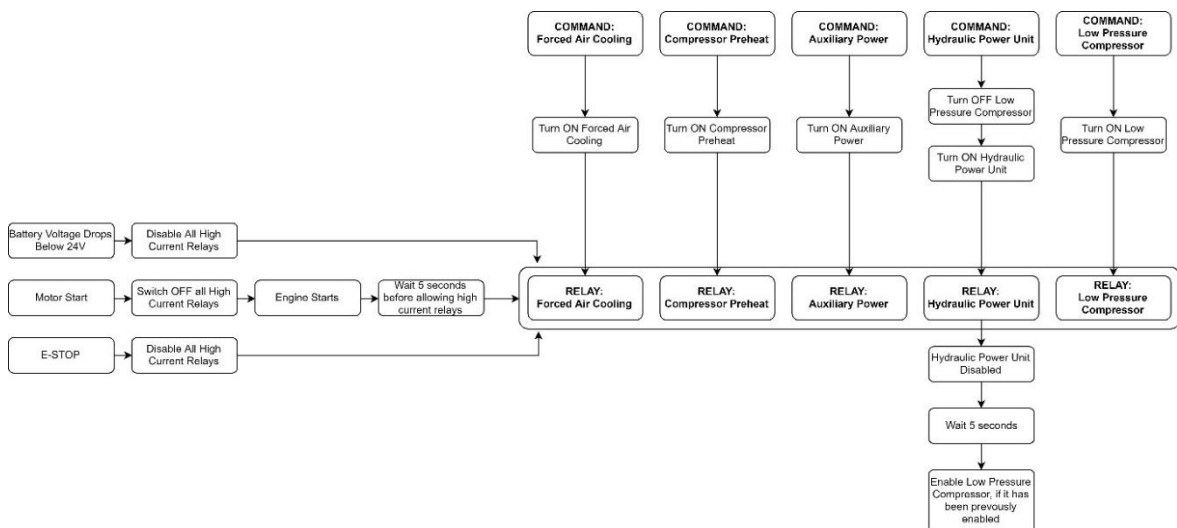
Joonis 2-43. Elektrisüsteemi ülevaade

Elektrisüsteemi projekteerimisel oli oluliseks teabeks kogu süsteemi maksimaalne voolutarve. Seetõttu koostati tabel, mille abil koondati erinevate osade maksimaalne voolutarve.

Tabel 2-11. Süsteemi voolutarve

| Süsteemi osa | Energiatarve |
|--------------------------------|------------------------------------|
| PLC koos kaugjuhtpuldiga | Kuni 300 W – 12.5 A - Hinnanguline |
| Hüdro solenoidklapid | 180 W – maksimaalne 7.5 A |
| Pneumaatika solenoidklapid | 150 W – maksimaalne 6.25 A |
| Lennuvahendi jahutussüsteem | 250 W – 10.4 A |
| Hüdrojaam | 2000 W – 80 A |
| Kompressori eelsoojendi | 200 W – 8.4A |
| Väljundvool | 20 A |
| Madala rõhu kompressor | 500 W – 21 A |
| Elektromagnetiline sidur | 40 W – 3 A |
| Elektrikilbi soojendi / jahuti | 300 W – 12.5 A |
| Kokku: | 181.55 A ≈ 4.36 kW |

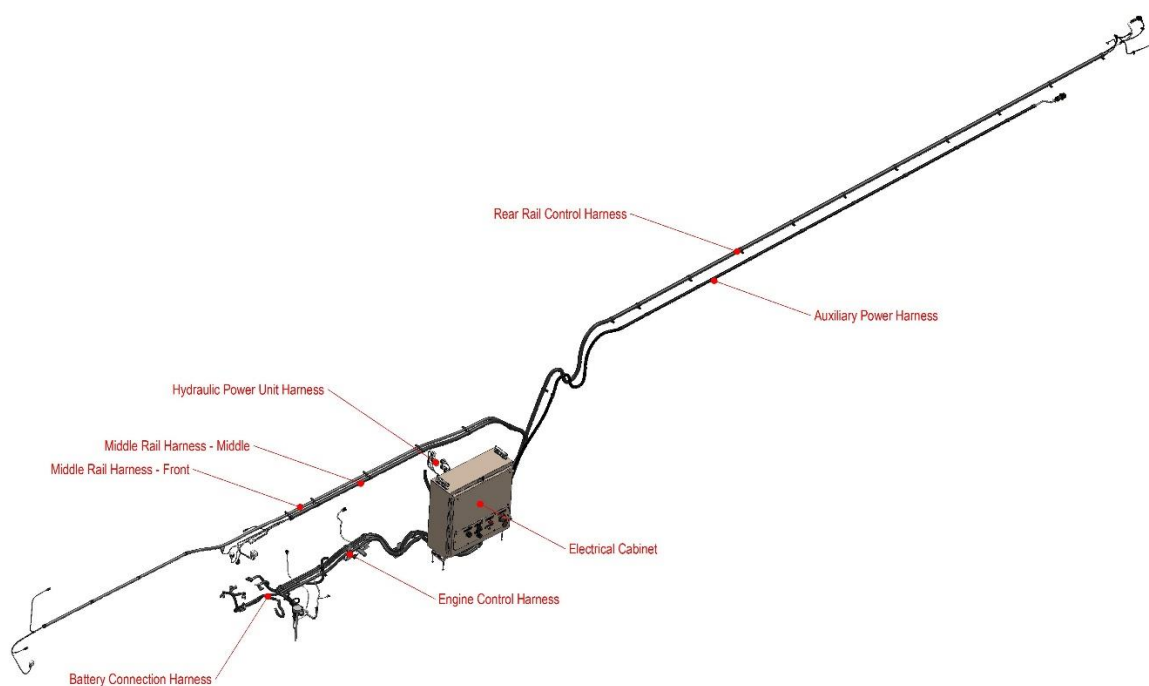
Antud tabelis arvestati, kui kõik asjad on korruga sisse lülitatud, mida realselt süsteemis pole võimalik teha, sest hüdro solenoidklappe juhitakse ükshaaval ning antud juhul toodi välja maksimaalsed tarbimised, mida tootjad enda komponentidele annavad. Reaalsed tarbimised on tunduvalt väiksemad. Ometi otsustati süsteemi maksimaalset tarbimist piirata ning süsteemi loogikaga keelata ülejäänud väljundmodulite tarbimine, kui hüdrojaama käitatakse. Selle selgitamiseks on lisatud Joonis 2-44. Kontaktorite juhtloogiga.



Joonis 2-44. Kontaktorite juhtloogiga

2.7.2 Juhtmestik

Antud projekti raames otsustati kogu süsteemi kaabeldus projekteerida CAD tarkvaras, et lihtsustada hiljem juhtmestiku tootmist ja paigaldamist ning vältida kaablikinnitusavade käsitsi puurimist ning juhtmepikkuste mõõtmist. Lisaks oli võimalik luua kaablikimbud, mis märkimisväärselt kiirendavad kogu katapuldi juhtmestiku koostamist. CAD tarkvara võimaldab määrata kaablite täpse paiknemise, lisada kinnitusklambreid, luua kaablikimpusid ning süsteem arvestab ise välja vajaliku kaabli lõikepikkuse. Seeläbi saavutatakse ka rahaline võit, sest kaablit läheb vähem raisku. Katapuldi kogu juhtmestik on varjestatud, ning korrektselt maandatud, et kaitsta juhtsüsteemi väliste segajate eest ja samuti et süsteem ei segaks väliseid seadmeid. Põhiline keerukus juhtmestiku projekteerimisel oli sobivate kaablite valimine, mis vastaksid karmidele keskkonnanõuetele ning taluksid temperatuuri -20 °C kuni $+80\text{ °C}$, UV kiirgust ning õli. Andurite ühendamiseks kasutatakse valmiskaableid ning kaabeldus paigaldatakse plastikust kõri sisse, mis kaitseb kaabeldust väliste vigastuste eest.



Joonis 2-45. Ülevaade kaabeldusest.

Katapuldi juhtmestik koosneb 6 juhtmekimbust: tagumise reelingu juhtkimp, väljundvoolu kaabel, hüdrojaama juhtkimp, mootori juhtkimp, keskmise reelingu juhtkimp ja akuühendus. CAD tarkvara võimaldas projekteerida optimaalse juhtmete asukoha ning paigaldada vastavatesse kohtadesse kinnitusklambreid.

2.7.3 Juhtsüsteem

Katapuldi juhtsüsteem on teostatud PLC kontrolleriaga. Juhtsüsteemi puhul oli kõige olulisemaks tingimuseks ohtuse tagamine ning süsteem peab olema võimeline tuvastama kõrvalekaldeid normaalsest süsteemi tööst. Loogika ülesehitamisel tugineti osaliselt vana katapuldi kasutajakogemusele kuid põhiliselt kliendi nägemusele, kuidas nad süsteemi kasutaksid koos oma lennuvahendiga. Katapuldi juhtsüsteem kogub automaatselt süsteemi kohta andmeid ning salvestab need mälupulgale, mis asub kaugjuhtpuldil ning lisaks salvestatakse andmed juhtpuldi ekraani sees asuvale mälukaardile. Sellega välditakse võimalust, kus klient eemaldab süsteemist mälupulga ning manipuleerib andmetega, sest sisemine mälukaart on kliendile kättesaamatu.

Süsteemil on kokku neli olekut:

- **Ready State**

- Olek on mõeldud süsteemi ülesseadmiseks ja kui valmisolek on lõpuni viidud, on katapult valmis lennuvahendi paigaldamiseks katapuldile.
- Süsteem on valmisoleku lõpuks ohutus olekus, stardiadapter on lukustatud, turvatihvt on sisestatud ning katapuldiga ei ole seetõttu võimalik startida, isegi kui selline sisend peaks kaugjuhtpuldist tulema.
- Selles olekus toetatakse haagis nelja tugijalaga, reeling volditakse lahti ja lukustatakse, stardiadapter lukustatakse, nõör pingutatakse, reeling kallutakse stardiasendisse ning õhupaak survestatakse vajaliku töö rõhuni.

- **Primed State**

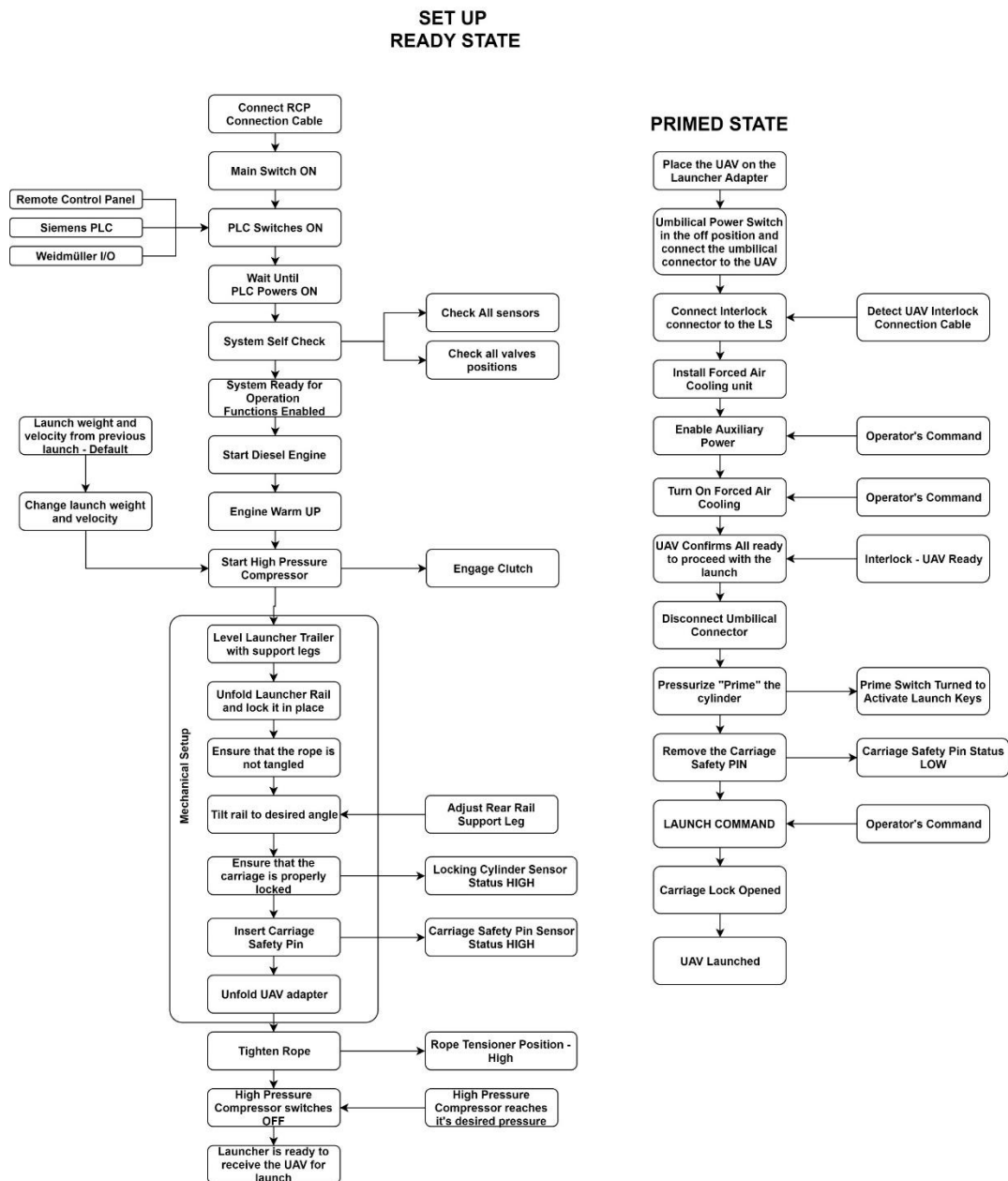
- Olek on mõeldud lennuvahendi ülesseadmiseks ja kui survestusoleks on lõpuni viidud, stardib katapult lennuvahendi.
- Selles olekus paigaldatakse lennuvahend katapuldile, käivitatakse lennuvahend ning seejärel kui lennuvahend on stardiks valmis, survestatakse peasilinder, eemaldatakse turvatihvt, vabastatakse kelgulukusti ning lennuvahend starditakse.

- **Launched State**

- Lennuvahend kiirendati edukalt soovitud kiiruseni ning süsteem kuvab operaatorile saavutatud lõppkiiruse.
- Selles olekus on pneumosilindri kolb lõppasendis ning kolvi tagasitoomiseks suletakse kuulkraanid ning rõhk lastakse pneumosilindrist maha. Samal ajal survestakse õhuga pneumosilindri kolvivarre poolne kamber ning kolb liigutatakse pneumaatiliselt tagasi algasendisse.
- Olek loetakse lõppenuks ning katapult läheb tagasi valmisolekusse, kui kelgulukusti suletakse.

- **Launch Failure**

- Stardi ebaõnnestunud olek näitab, et start tühistati või katkestati operaatori poolt.
- Olek aktiveeritakse ka tehnilise vea tõttu, mis on süsteemi poolt tuvastatud ning esinenud tõrge on märkimisväärne ja nõuab stardi poolelijätmist.
- Olekust on võimalik väljuda ainult juhul, kui järgitakse ebaõnnestunud stardi protseduuri, mis teeb esmalt süsteemi ohutuks ning seejärel läheb süsteem valmisolekusse.



Joonis 2-46. Katapultdi käitamispetseduur

2.8 Projekteerimise tulemus

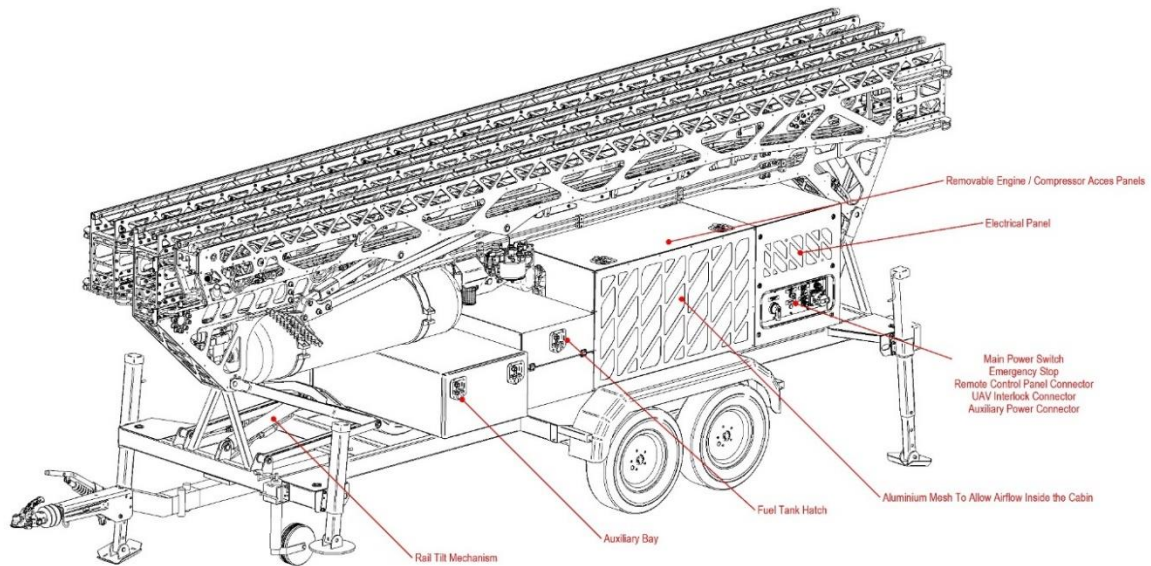
Antud peatükis esitletakse projekteeritud katapulti erinevate piltide näol ning kirjeldatakse üldiselt kogu süsteemi osasid. Lisaks hinnatakse lühidalt vastavust ülesandepüstituses toodud nõuetega.



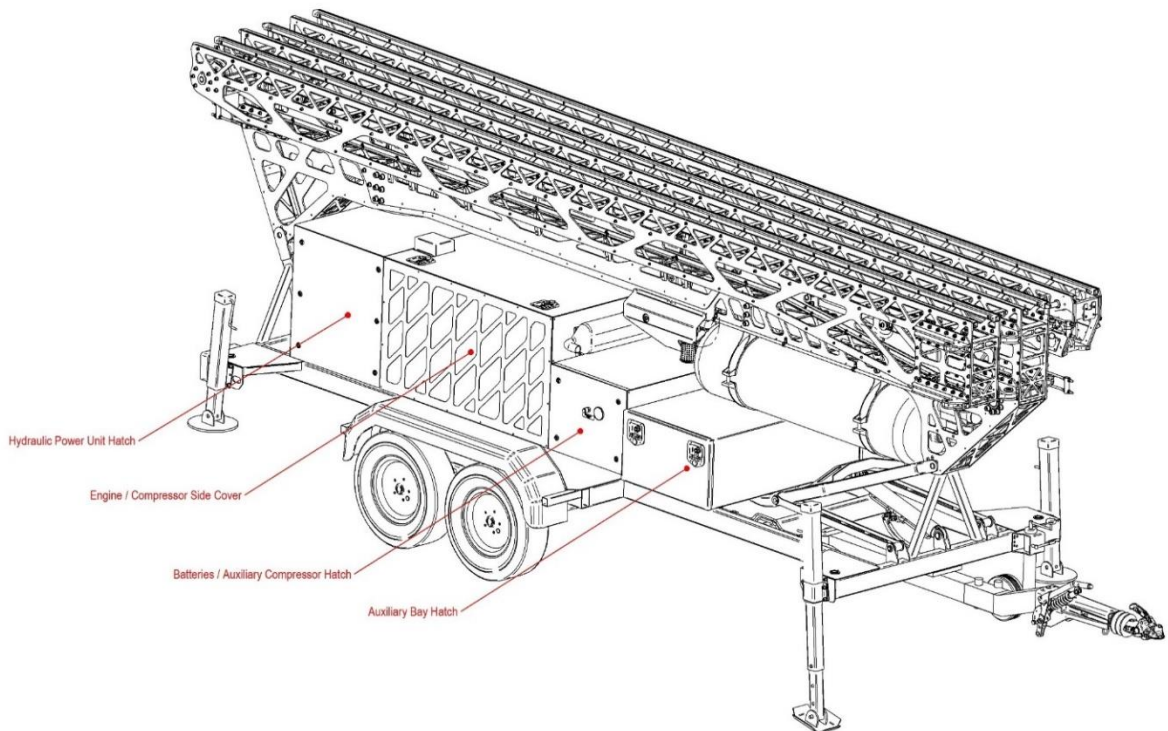
Joonis 2-47. Katapultide isomeetiline vaade

Projekteeriti 100 kJ võimsusega pneumaatiline katapult, mis on võimeline kiirendama 60 kg lennubahendi lõppkiiruseni 52 m/s. Katapultide reeling kogupikkus on 16.8 m ning reeling koosneb kolmes seksioonist, mis volditakse transpordi ajaks. Reelingu voltimine võimaldab katapultide mahutada ISO20 merekonteinerisse. Pneumosüsteem koos plokisüsteemiga on optimeeritud, et maksimaalne kiirendus ei ületaks 10 g. Kogu katapult on projekteeritud kahe teljelisele trailerile, kasutades torsioontelgi, mis annab väga hea kliirensi ja võrreldes konkurentidega vähendab survet maapinnale. Katapult kasutab väikest diiselmootorit, mis on siduri abil ühendatud kõrgsurve kompressoriga. Lisaks annab diiselmootori generaator kogu ülejäänud süsteemile voolu. Kogu katapultide projekteerimise juures jälgiti kliendi poolt esitatud nõudeid, ning seetõttu on süsteem mõeldud opereerimiseks väga karmides kliimatingimustes – tugev vihm ja tolm.

Katapuldi vasakpoolne külg on juhtimiskül, kus asub elektrikilp koos pealüti ja erinevate väljundpistikutega ning kuhu ühendub ka kaugjuhtpult. Kõik komponendid on paigaldatud katete alla, et kaitsta neid ilmastiku eest ning otsese päikesevalguse eest. Varustuse hoiustamiseks asub katapuldi eesotsas, mille luugid avanevad mõlemale katapuldi küljele. Kütusepaak asub eraldi luugi taga, ning seal asub lisaks kiirliides madala rõhu kompressorile, millega on võimalik komponente puhastada ning vajadusel rehve pumbata.

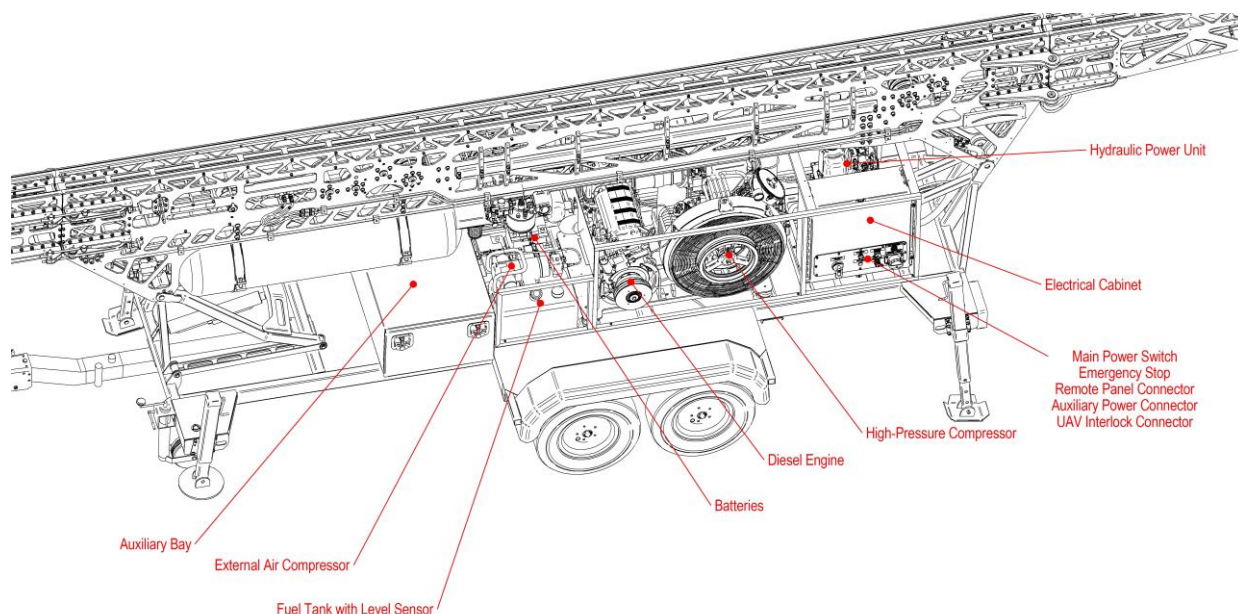


Joonis 2-48. Katapuldi vasakultvaade - ülevaatic



Joonis 2-49. Katapuldi paremaltvaade - ülevaatic

Enamus luuke on kinnitatud veerandpöörde klambritega, mis teeb luukide eemaldamise lihtsaks ning võimaldab kiiret ligipääsu erinevatele komponentidele. Mootoriruumi pealmine kate on kinnitatud kiirkinnitusklambritega ning on täielikult eemaldatav. See lihtsustab märkimisväärselt süsteemi hooldatavust, võimaldades hõlpsat juurdepääsu mootorile, kompressorile, filtritele, akudele ja hüdraulilisele jõuseadmele.



Joonis 2-50. Katapuldi sisemuse ülevaade

Katapuldil on kokku 3 akut, üks 12 VDC aku, mis on mõeldud mootori käivitamiseks ning 24 VDC aku, mis toidab kogu ülejäänud süsteemi. Kõik akud on paigaldatud mootori ette. Lisaks asub seal madala rõhu kompressor, mis töötab 24 VDC pealt. Kompressor on niiõelda lisamoodul, mida ei pea paigaldama ning kompressorit kasutatakse puhastamiseks ja rehvide pumpamiseks. Kompressori kõrval asub kütusepaak koos anduriga. Diiselmootori ja kompressori paigutamisel tuli lähtuda käru raskuskeskmest, sest see peab olema sildadest eespool. Kuna keskmisele reelingu etteotsa on paigaldatud pneumosilinder koos pneumopaagiga, tõi see raskuskeskme märkimisväärselt ettepoole. Treileri taga asub elektrikilp ning hüdro jõujaam, mis töötab samuti 24VDC pealt.

Süsteemi projekteerimisel lähtuti modulaarsusest. See võimaldab süsteemi alamosasid eraldi koostada ja testida ning seeläbi väheneb kogu katapuldi koostamise aeg. Kõikide detailide projekteerimisel lähtuti lihtsusest ning koostatavusest, seepärast kasutatakse enamasti laserlõigatud lehest ja profiilist detaile.



Joonis 2-51. Katapult koos juhtpaneeliga

Katapultil on kokku ligikaudu 950 unikaalset detaili, millest ligikaudu 1/3 on isevalmistatud detailid ning 2/3 on ostutooted. Kokku on katapultil ligikaudu 7000 detaili. Katapultide kogu koost on jaotatud 185 alamkoostu.

Katapultide projekteerimisfaasis suudeti täita kõik olulised kliendipoolsed nõuded. Ainuke nõue, mida ei suudetud täita oli kogu süsteemi mass, mida klient soovis saada alla 2000 kg. Seda nõuet ei olnud võimalik täita, sest kõikidele süsteemi tähtsamatele osadele tehti tugevusanalüüs ning konstruktsioon optimeeriti. Lõplik mass tuli 2200 kg. Ülejäänud nõuded suudeti täita, kuid esines teatud kõrvalekaldumisi, näiteks -20 °C väli temperatuuriga ei ole võimalik süsteemi ülesse seadmine 15 minutiga kuna kompressor on vaja kõigepealt ülesse soojendada.

Kõige keerulisem oli hinnata süsteemi töökindlust ning vastupidavust, sest puudus varasem kogemus sellise süsteemi projekteerimisel ja kasutamisel. Kõikides tugevusanalüüsides oli minimaalne nõutud varutegur vähemalt 2, ning kriitilistes kohtades 3. Kuna süsteemi hakatakse kasutama ka väga äärmuslikes ilmastikutingimustes, sealhulgas tugev vihm ja tolmu, pole võimalik garanteerida et kõikide laagrite eluiga vastaks kogu süsteemi elueale. See võeti disainil arvesse ning kõikide nõõrirataste laagrite vahetamine võtab hinnanguliselt 1 tööpäev.

Tabel 2-12. Katapuldi üldandmed

Threed CATA katapuldi üldandmed

| | |
|------------------------------|--------------------------|
| Mass | <2200 kg |
| Ülesse seadmise aeg | ~ 15 minutit |
| Töötemperatuur | -20°C to +55°C |
| Laskmise taasteaeg | ~ 5 minutit |
| Maksimaalne transpordikiirus | 90 km/h (tänavalegaalne) |
| Reelingu kaldenurk | 10° to 15° |

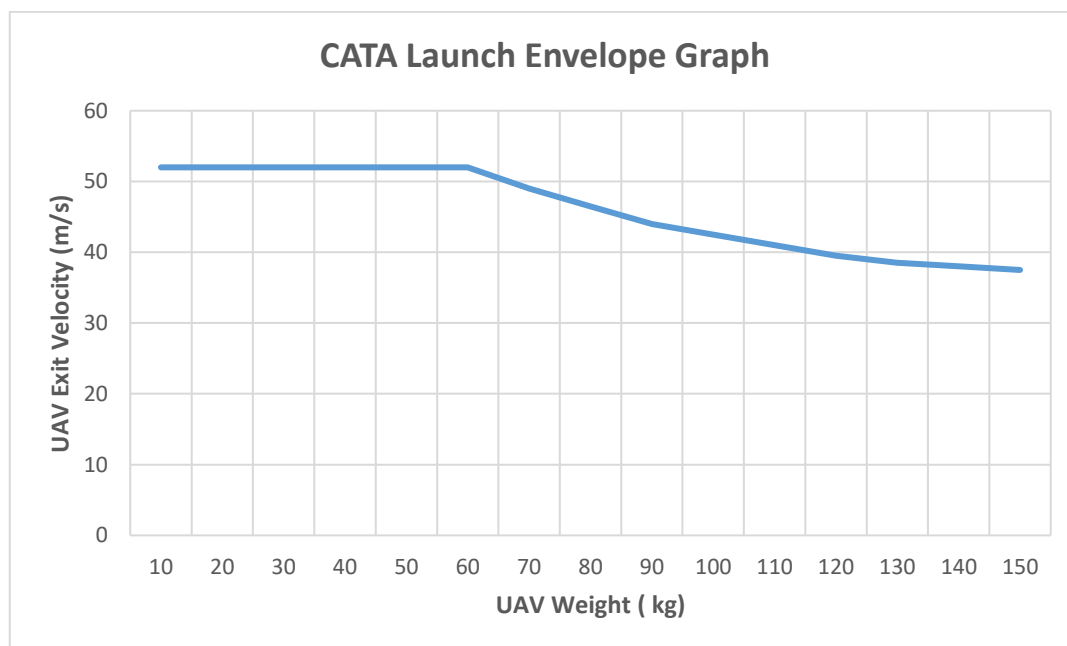
Pakitud ja ladustatud mõõtmed

| | |
|--------|---------|
| Pikkus | 5800 mm |
| Laius | 2100 mm |
| Kõrgus | 2030 mm |

Ülesse seatud mõõtmed

| | |
|--------|-----------------------|
| Pikkus | 16800 mm |
| Laius | 2100 mm |
| Kõrgus | 2030 mm (Kuni 5000mm) |

Katapuldi konstruktsioon on võimeline startima kuni 150 kg lennuvahendit.



Joonis 2-52. Katapuldi laskegraafik erineva lennuvahendi massiga

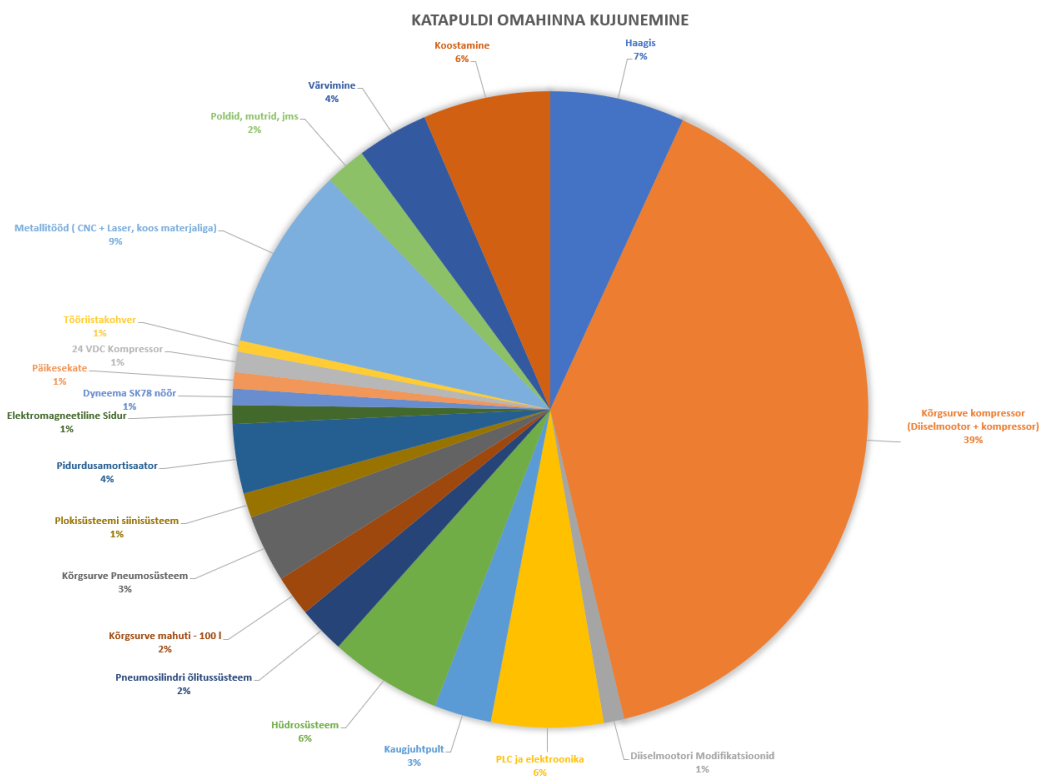
3. MAJANDUSLIK OSA

Antud peatükis antakse ülevaade tootmiskulude analüüsist projekteeritud katapuldile CATA, et anda ülevaade katapuldi omahinna kujunemisest. Kuna omahind on ettevõtte ärisaladus, pole võimalik täpset suurust avaldada ning seetõttu näidatakse lõputöös omahinna kalkulatsioon protsentuaalselt detailide ja töö omavaheliste protsentuaalsete väärtustega.

Katapuldi omahinna arvutamisel arvestatakse nii detailide kui ka materjali töötlemise kulusid, mis sisaldab töötajate palkasid, ostukomponentide maksumust, koostamise maksumust ning muid tootmise seotud kulusid nagu värvimine.

3.1 Kulud ostukomponentidele ja detailidele

Antud töös otsustati kõiki kulusid erinevatele ostukomponentidele ja valmisatud detailidele näidata ühtse graafikuna, kus on protsentuaalselt välja toodud maksumused. Osad jaotused on võetud laiemalt ning ei hõlma igat väiksemat detaili või polti. Kõikide komponentide transpordikulu on arvestatud nende hindade sisse.



Joonis 3-1. Katapuldi CATA omahinna kujunemine

Nagu näha Joonis 3-1. Katapuldi CATA omahinna kujunemine, on suurim kulu kõrgsurve kompressor, mis moodustab koguni 39% katapuldi koguhinnast. Antud juhul otsiti ka erinevaid alternatiive kompressorile, kuid sobilikku varianti ei suudetud leida. Kuna esimese katapuldi puhul on tegemist prototüübiga, siis peale koostamist ja katsetusi võib disain vajada korrekture ning see võib vähesel määral mõjutada ka omahinda. Üldjuhul võib omahinna kujunemisega rahul olla ning enamus komponentide puhul on tegemist tööstuskomponentidega, mida on võimalik odavama komponendiga asendada.

KOKKUVÕTE

Antud magistritöö raames projekteeriti ettevõttele Threod Systems OÜ traileril katapult, mis on mõeldud kuni 150 kg mehitamata lennuvahendite startimiseks ning maksimaalne stardikiirus on kuni 52 m/s.

Sellise võimsusega katapultdi projekteerimine on nii ettevõtte OÜ Threod Systems kui ka lõputöö autori jaoks esmakordne, siis alustati tööd konkurentide toodete uurimisega, otsides võimalikult palju informatsiooni süsteemide tehniliste lahenduste kohta. Sellele järgnes ülesandepüstitus, kus sõnastati täpsed nõuded, millele lõpptoode vastama peab. Jätkati kontseptsiooni loomisega, kus otsustati koheselt pneumaatilise katapultdi kasuks ning põhjalikumalt kaaluti kahte lahendusvarianti – madala rõhuga pika silindriga katapult ja plokisüsteemiga ning lühikese kõrgrõhuga katapult. Selgus, et süsteemi nõuete täitmiseks on kindlam kasutada plokisüsteemi, mis on tundvalt keerulisem, kui teoreetiliselt on võimalik täita kõik nõuded. Peale kontseptsiooni loomist jätkati füüsikaliste arvutustega, mille abil saadi teada katapultdi põhiparameetrid. Neid põhiparameetreid kasutati algandmeteks Matlab Simulink keskkonnas loodud katapultdi simulatsioonis, mis võimaldas üheaegselt simuleerida kogu katapultdi kiirendus- ja pidurdusprotsessi. Matlab Simulink keskkonnas loodi kõigepalt pneumaatiline mudel, mis vastas parameetrite poolest reaalse pneumosüsteemi parameetritega ning see ühendati Simulink Multibody mudeliga, ehk CAD mudeliga, mis koosneb lihtsustatud katapultdi mudelist koos plokirataste, pneumosilindri ja nõoriga. Simulatsioon võimaldas kiiresti ja täpselt läbi simuleerida katapult erinevatel töörihkudel ja erineva lennuvahendi massiga ning optimeerida katapultdi kiirendusgraafikut muutes näiteks pneumosilindri sisselaskeava diameetrit. Loodud simulatsioon võimaldab tulevikus lihtsasti skaleerida erineva suurusega katapulte.

Peale simulatsiooni alustati katapultdi kontstruktsioonide projekteerimist. Lõputöö sisaldab kirjeldusi, mille alusel projekteeriti erinevate osade konstruktsioon, toimus mõõtmestamine ning projekteeriti erinevad tehnilised lahendused. Põhiosa lõputöö projekteerimisosast moodustab katapultdi kõige tähtsam süsteem, milleks on kiirendus- ja pidurdussüsteem. Antud süsteem projekteeriti ning optimeeriti vastavalt etteantud nõuetele ning kiirendus- ja pidurdussüsteemi ühtseks integreerimine andis märkimisväärse massivõidu ning lahendas keerulise mehaanilise ülesande stardiadapteri pidurdusjõu vastuvõtmisel. Kogu plokisüsteemi mõõtmestamisel lähtuti simulatsioonist saadud tulemustest ning sellest tulenevalt oli teada kiirendus pneumosilindri mõõtmed ja pidurdusamortisaatori töökaik. Plokisüsteem võimaldas pidurdusamortisaatori löökkiiruse vähendada kuni 6.5 m/s ning seeläbi oli võimalik kasutada tööstuslikku amortisaatorit. Tööstusliku amortisaatori kasutamisega tõuseb

märkimisväärselt süsteemi töökindlus ja kasutusmugavus ning amortisaator on projekteeritud töötama kogu katapuldi töövõimsuse ulatuses, ilma et see vajaks reguleerimist.

Lõputöös antakse ka üldine ülevaade teistest projekteeritud süsteemi osadest. Põhiosa katapuldi konstruktsioonist moodustab reeling. Katapuldi reeling koosneb kolmest sektsioonist ning on mõeldud transpordiks kokku voltima. Reelingu projekteerimisel oli põhiliseks probleemiks kogu konstruktsiooni mass ning seeläbi välistati terase kasutamine ning valituks osutuse kerge aga tugeva alumiiniumsulami kasutamine. Kogu reelingu projekteerimisel lähtuti toodetavusest ja koostamisest, mistõttu koosnevad reelingu küljed vesilõigatud alumiiniumlehest, mis on keskelt poltidega ühendatud laserlõigatud alumiiniumprofiiliga, mis võimaldab saavutada väga hea koostamistäpsuse ja vältida täielikult keevitamist. Lisaks reelingule antakse ülevaade ka stardiadapteri konstruktsioonist, hüdrostsüsteemi tööpõhimõttest, katapuldi juhtpaneelist, üleüldisest juhtsüsteemist koos elektrisüsteemiga ja juhtmestiku projekteerimisest CAD-is. Peatüki lõpus antakse ülevaade kogu projekteerimise tulemusest ning võrreldakse projekteeritud katapuldi vastavust ülesandepüstituses koostatud nõuetega. Kõik esialgsed nõuded suudeti täita, ainult süsteemi kogumass läks esialgselt 200 kg suuremaks.

Lõputöö lõpeb katapuldi omahinna kujunemise ülevaatega ja lõputöö lisa sisaldab graafilist osa, mis kujutab katapuldi ja reelingu konstruktsioonide koostu- ja dimensioonijoonist.

Mina, lõputöö autor arvan et antud lõputöö on õnnestunud, sest projekti raames projekteeriti ettevõttele Threod Systems OÜ täiesti uut laadi toode, mis võimaldab ettevõttes siseneda täiesti uuele turule. Usun, et projekteeritud katapult on väga tugev konkurent turule, lisaks asjaolu et projekteeritud katapult on üle 1000 kg kergem kui lähim konkurent. Olen rahul lõputöö teemavalikuga, sest magistritöös käigus sain luua süsteemidisaini ning projekteerida nullist täiesti uue toote, mis pakkus piisavalt pinget ning nõudis väga põhjalikku süsteemi osade tööpõhimõtete uurimist ning tehnilised probleemid vajasisid täiesti uut lähenemist. Magistritöö käigus õppisin kasutama Matlab Simulink tarkvara, mida olen tihti kasutanud ka uutes tööalastes ülesannetes.

SUMMARY

Within the framework of this Master's thesis, a trailer mounted launcher was designed for Threod Systems OÜ, which is intended for launching up to 150 kg unmanned aerial vehicles and the maximum take-off speed is up to 52 m/s.

As design of this size launcher is the first for both the company Threod Systems OÜ as well as the author of this Master's thesis, the work began on competitors's products research, investigating for as much information as possible about the technical solutions of the systems. This was followed by setting the initial requirements for the system and compiling product design specification. The work proceeded with creating a concept of the whole system, and therefore it was immediately decided to continue with a pneumatic launcher and two different solutions were considered in more detail – a launcher with long pneumatic cylinder with low pressure and a launcher with block system, using short cylinder in high pressure. After examining the specificities of both systems it came clear that using a block system is much safer and it is easier to meet the system requirements. Block system makes launcher more complicated, but theoretically it is possible to meet all the requirements. After creating the concept, the work continued with physical calculations, which were used to find out the basic parameters of the launcher. Results from calculations were used as a raw data in the launcher simulation model created in the Matlab Simulink environment, which allowed to simulate the launcher acceleration and deceleration process simultaneously. In the Matlab Simulink environment, a physical pneumatic model was created which corresponds to the real pneumatic system parameters and the physical simulation model was connected with Simulink Multibody 3D model which consists of a simplified launcher model with block wheels, pneumatic cylinder and acceleration / deceleration rope. The simulation made it possible to quickly and accurately simulate the launcher at different operating pressures and with different aircraft weights. Simulation model allowed to optimize the acceleration system by changing system parameters. The created simulation allows to easily scale different size launchers in the future.

After the simulation, the structural design process was started on the launcher. The thesis contains description of the design principles of the construction of different subsystems and overview of all the technical solutions developed during design. The major part of the design is the acceleration and braking system of the launcher, which is the most complicated part of the launcher. The system was designed and optimized to meet the requirements and integrating the system as single unit, provided significant weight gain and solved a complex mechanical task in absorbing the braking force of the rail carriage. The dimensioning of the whole block system was based on the results obtained from the

simulation. Using the pulley system allowed to reduce the impact velocity on the shock absorber to maximum of 6.5 m/s, and making it possible to use industrial shock absorber. The use of industrial shock absorber significantly increases the reliability and ease of use of the system, as the shock absorber is designed to operate throughout the full velocity range of the launcher, without the need for adjustment.

The thesis also gives a general overview of the other subsystems of the designed launcher. The main structural element of the launcher construction is the railing. The launcher rail consists of three sections and two sections are designed to be folded for transport. The main problem that came up during the design was the weight of the whole rail, therefore eliminating the use of steel and the only option was to use light and strong aluminium alloy. The main design principles of the rail are productivity and easy assembly, meaning that the whole rail is assembled with bolts and welding is completely avoided. Rail consists of water-cut aluminium sheets on the sides and connected with middle aluminium profile by bolts, which allows to achieve very good assembly accuracy and avoiding tensions. In addition to the railing, the thesis also contains design overview of the launch adapter, launch adapter locking mechanism design, the working principle of the hydraulic system, the launcher control panel, the general control system with the electrical system and the CAD wiring design overview. At the end of the chapter, the result of the whole design is given and the initial requirement compliance is given. All the initial requirements were fulfilled, only weight was exceeded by 200 kg.

The thesis ends with a calculation of the launcher net costs and the appendix with the overall drawings of the system, which shows the full assembly and dimensional drawings of the launcher and rail structures.

I, the author of the thesis, believe that this graduation thesis can be considered successful, as a completely new type of product has been developed for Threed Systems OÜ, which allows to enter a completely new market. I believe that the designed system is a very strong competitor in the market, in addition to the fact that the designed launcher is more than 1000 kg that the competitors. I am satisfied with the choice of the topic of the graduation thesis as I was able to create a system design and design a completely new product from scratch, which provided enough excitement and required a very thorough study of different system's operating principles and solving complex technical challenges. During my master's thesis, I learned to use Matlab Simulink software, which I often use now in new tasks.

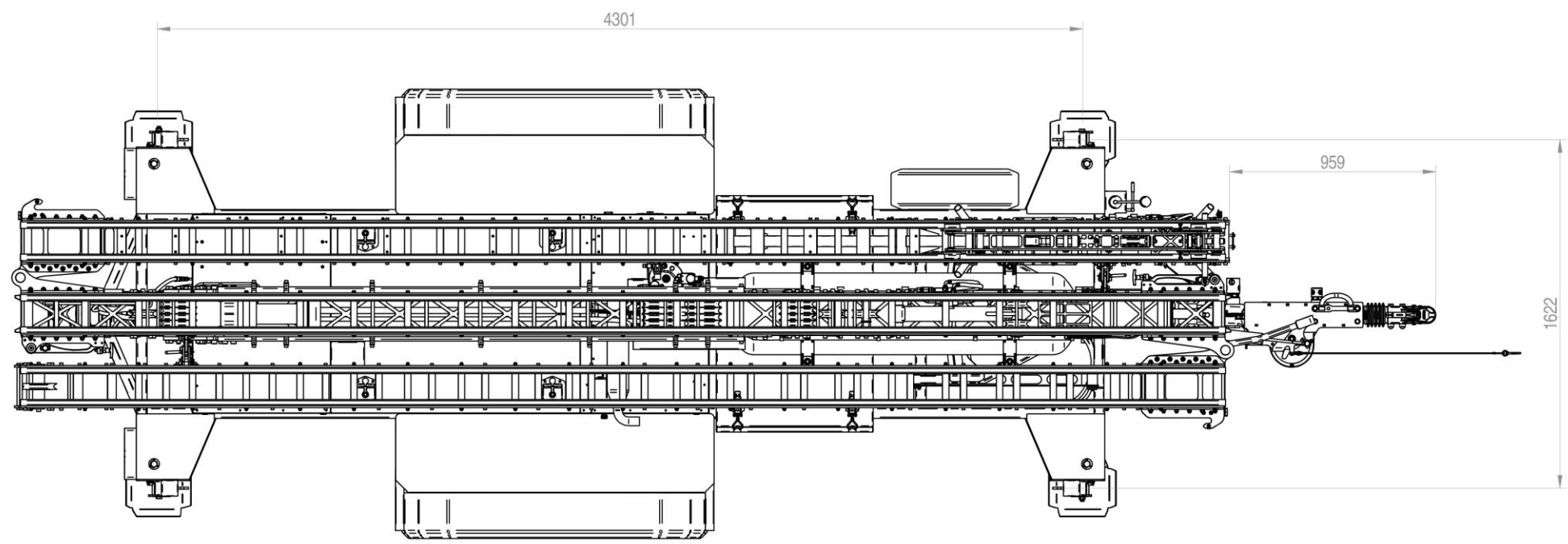
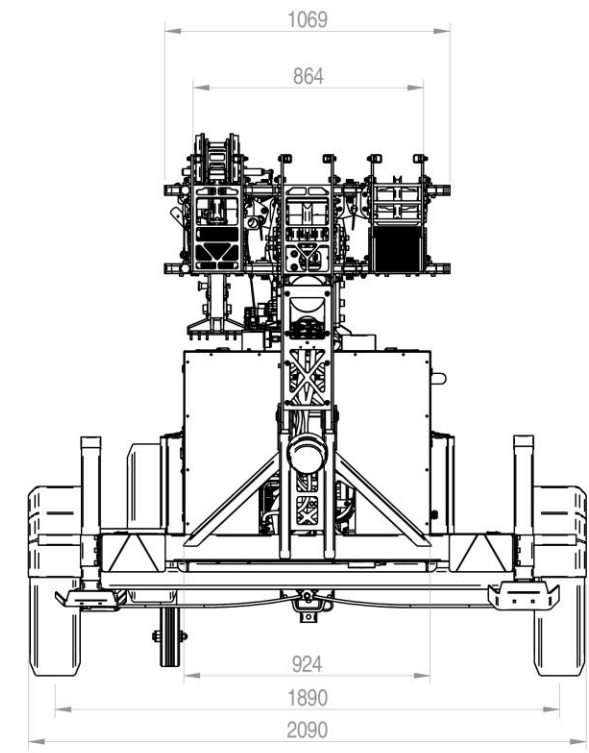
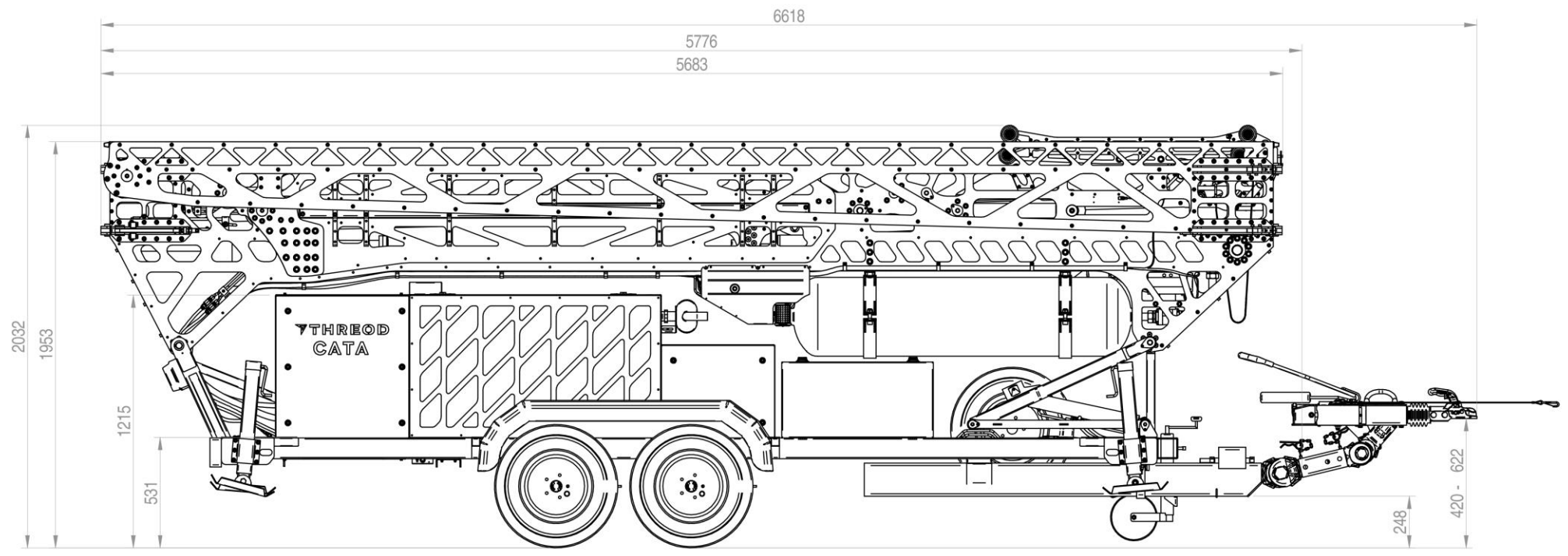
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. United States Navy, Aviation Boatswain's Mate E – NAVEDTRA 14310, NAVAL EDUCATION AND TRAINING PROFESSIONAL DEVELOPMENT AND TECHNOLOGY CENTER, 2001 [WWW] <https://archive.hnsa.org/doc/pdf/aviationboatswainsmateE.pdf> (28.03.2020)
2. United States Secretary of the Air Force and the Chief of the Bureau of Aeronautics – CATAPULT TYPE H, MARK 8 – Operation and Maintenance Instructions, 1956 [WWW] <https://maritime.org/doc/catapult/index.htm> (28.03.2020)
3. Meggitt Defence Systems [WWW] - <https://meggittdefense.com/> (29.03.2020)
4. Meggitt Defence Systems – MDS Hercules Datasheet [WWW] https://www.militarysystems-tech.com/sites/militarysystems/files/supplier_docs//MDSL%20HERCULES%20PNEUMATIC%20LAUNCHER.pdf (29.03.2020)
5. Aries Ingeniería y Sistemas S.A [WWW] <http://www.aries.com.es/?lang=en> (29.03.2020)
6. ARIES INGENIERÍA Y SISTEMAS - UAV/ UAT LAUNCHERS [WWW] http://www.aries.com.es/recursos/agent.php?resource_id=1250 (29.03.2020)
7. RUAG Holding Ltd [WWW] <https://www.ruag.com/en/about-ruag/ruag-brief/facts-figures> (29.03.2020)
8. RUAG Aviation – DC4 UAV Launcher [WWW] <https://ruag.picturepark.com/Go/RJdLv1oV/V/11868/1> (29.03.2020)
9. Robonic Ltd Oy – 4th Generation Technology [WWW] <https://www.robonic.fi/> (29.03.2020)
10. European Patent Office, Robonic Ltd Oy - Arrangement in Catapult, 2005 [WWW] https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/008564591/publication/US2005230533A1?q=robonic&called_by=epo.org (29.03.2020)
11. European Patent Office, Robonic Ltd Oy - Method of Launching a Catapult, Catapult, and Locking Device, 2009 [WWW] https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/029558617/publication/US2009250550A1?q=robonic&called_by=epo.org (29.03.2020)
12. Military Standard: Specification Practices – MIL-STD-490A [WWW] - http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-490A_NOTICE-1_25509/ (29.03.2020)
13. Military Standard: Technical reviews and audits for systems, equipment and computer software - MIL-STD-1521B [WWW] http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1500-1599/MIL_STD_1521B_1503/ (29.03.2020)

14. ACE Stoßdämpfer GmbH – Industrial Shock Absorbers [WWW] <https://www.ace-ace.com/com/sales-contact/knowledge/industrial-shock-absorbers.html> (29.03.2020)
15. DSM Dyneema – Technical Brochure: Dyneema in marine and industrial applications. [WWW] http://www.pelicanrope.com/pdfs/DyneemaSK75_Tech_Sheet.pdf (29.03.2020)
16. Microjet GmbH – MKS-G 100 User Manual [WWW] <https://microjet.de/en/microjet-tank.html> (29.03.2020)
17. Liaoning Metal Technology – Type III CNG Cylinders [WWW] <http://en.symtcl.com/product/275994231> (29.03.2020)
18. Lombardini Srl – KDW 1404 Diesel Engine [WWW] <http://www.kohlerpower.it/product/kdw-1404/> (29.03.2020)
19. BAUER COMP Holding GmbH – KAP Line Compressor [WWW] <https://www.bauer-kompressoren.de/products/breathing-air-sports/kap-line-370-680-lmin/kap-dah-450-680-lmin/> (29.03.2020)
20. O.M.F.B. S.p.A. Hydraulic Components – Power-Pack STD Type User Manual [WWW] <https://www.omfb.com/en/> (29.03.2020)
21. DHA Suffa University - COMPUTER AIDED MODELING AND SIMULATION OF PNEUMATIC U.A.V. CATAPULT MECHANISM [WWW] https://www.researchgate.net/publication/315000832_Computer_Aided_Modeling_and_Simulation_of_Pneumatic_UAV_Catapult_Mechanism (29.03.2020)

LISA 1. GRAAFILINE OSA

| Rev. | Rev. note |
|------|-----------------|
| 10 | Initial Release |
| | |

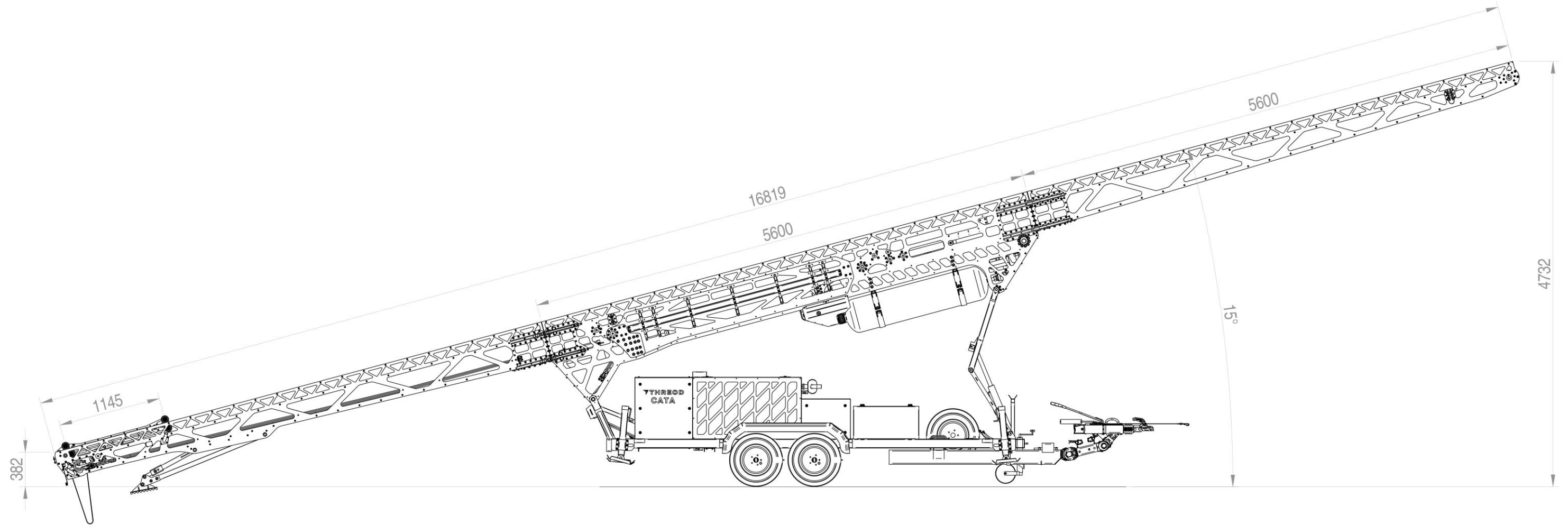


This document is confidential and property of Threod Systems and may not be reproduced, used or disclosed to others without written approval

| | | | | |
|------------------------|------------|---------------------------------|------------------------|--------------|
| | | | Surface finish, notes: | Scale: 1:20 |
| | | | Name: CATA Launcher | A2 sheet 1/1 |
| Author: LauriValdmann | 08.05.2020 | ID: 102240 Description: CATA | Weight: 2126 kg | Rev no: 10 |
| Drafted: LauriValdmann | 15.05.2020 | | | |
| Checked: | | | | |
| Approved: | | | | |

Launch position - rail tilted to 15°

| Rev. | Rev. note |
|------|-----------------|
| 10 | Initial Release |



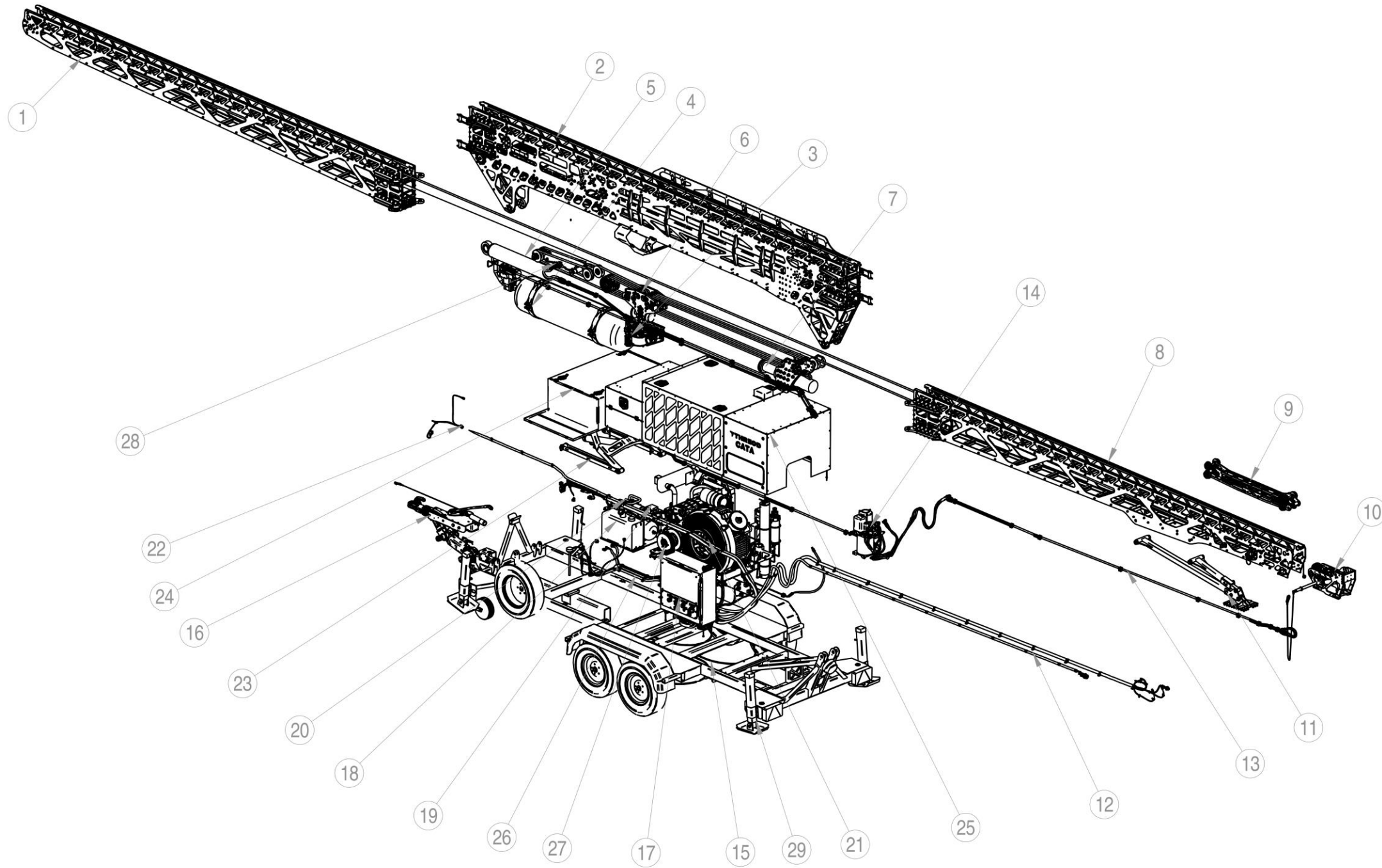
Scale 1:50

| | | | |
|-----------------------|--------------|-----------------------|---------------------|
| THREED SYSTEMS | | Surface finish notes: | Scale: 1:20 |
| Author | LaurValdmann | 06.05.2020 | Name: CATA Launcher |
| Drafted | LaurValdmann | 15.05.2020 | A1 sheet 2/2 |
| Checked | | | Weight: 2126 kg |
| Approved | | | ID: 102240 |
| | | | Description: CATA |
| | | | Rev no: 10 |

This document is confidential and property of Threed Systems and may not be reproduced, used or disclosed to others without written approval.

This document is confidential and property of Thread Systems and may not be reproduced, used or disclosed to others without written approval

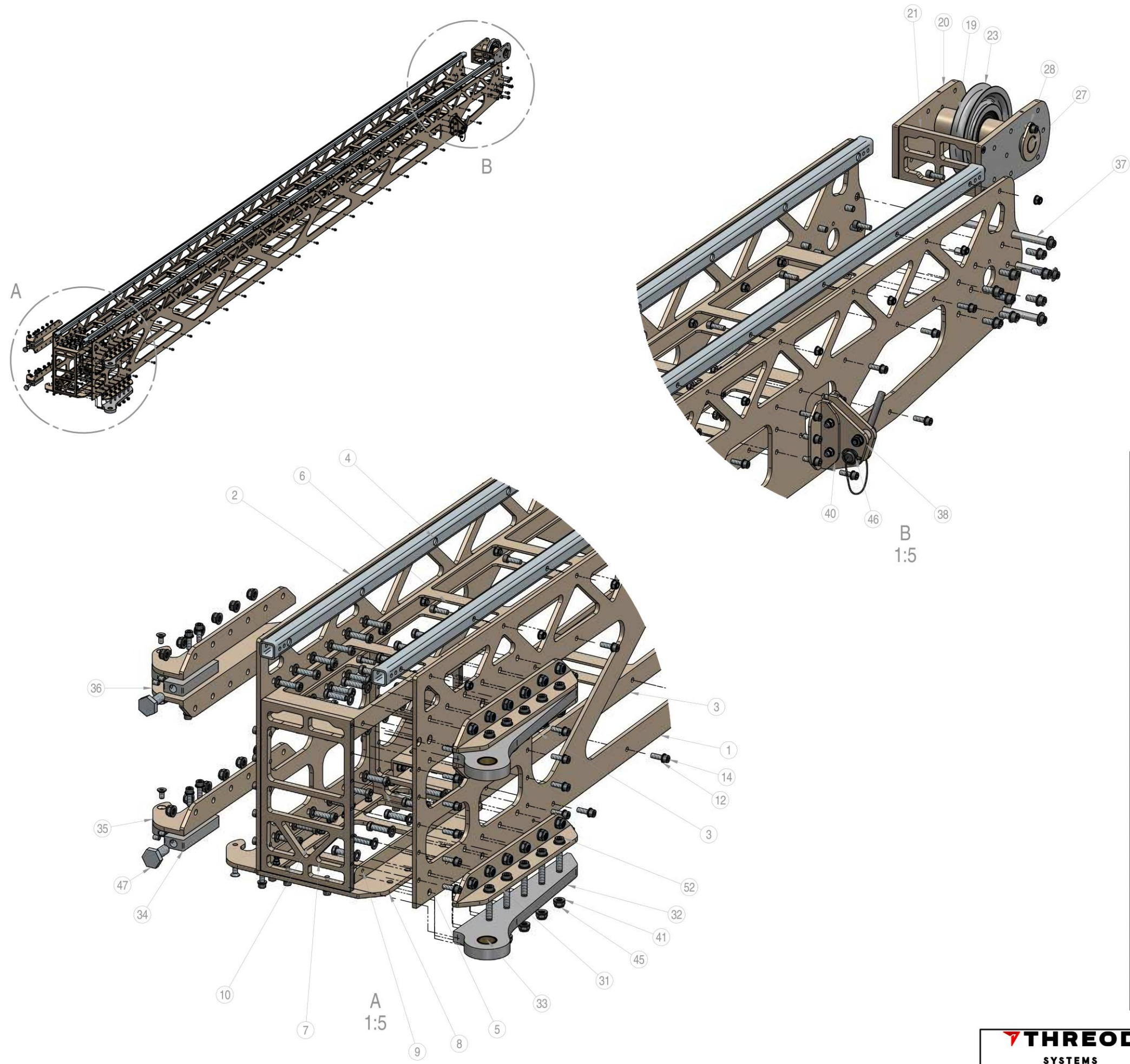
| Rev. | Rev. note |
|------|------------------|
| 10 | Initial Revision |
| | |
| | |



| # | Description |
|----|--------------------------------------|
| 1 | Front Rail |
| 2 | Middle Rail |
| 3 | Middle Rail High-Pressure Pneumatics |
| 4 | High Pressure Air Tank |
| 5 | Acceleration Cylinder |
| 6 | Rope Block Mechanism |
| 7 | Braking Shock Absorber |
| 8 | Rear Rail |
| 9 | Carriage |
| 10 | Carriage Locking Mechanism |
| 11 | Rear Support Leg |
| 12 | Rear Rail Wiring |
| 13 | Rear Rail Hydraulics |
| 14 | Hydraulic Power Station |
| 15 | Trailer |
| 16 | Height Adjustable Tow Hook |
| 17 | Electrical Cabinet |
| 18 | Fuel Tank |
| 19 | Batteries |
| 20 | Auxiliary Compressor |
| 21 | Compressor / Engine Module |
| 22 | Middle Rail Wiring |
| 23 | Rail Tilt Mechanism |
| 24 | Equipment Bay |
| 25 | Compressor / Engine Cover |
| 26 | Engine Control Harness |
| 27 | Electromagnetic Clutch |
| 28 | Rope Tensioner Hydraulics |
| 29 | Adjustable Support Leg |

| | | | | | |
|-----------------|---------------|------------|------------------------|-------------------|--------------|
| | | | Surface finish, notes: | | Scale: 1:50 |
| | | | Name: CATA Launcher | | A3 sheet 1/1 |
| Author | LauriValdmann | 20.05.2020 | ID: 102240 | Description: CATA | Rev no: 10 |
| Drafted | LauriValdmann | 20.05.2020 | | | |
| Checked | | | | | |
| Approved | | | | | |
| Weight: 2126 kg | | | | | |

| Rev. | Rev. note |
|------|-----------|
| 10 | Initial |
| | |
| | |



| Nr | ID | Quantity | Title | Category |
|----|--------|----------|------------------------------------|-----------|
| 1 | 103097 | 1 | Right Side, Front Rail | Aluminium |
| 2 | 105397 | 1 | Left Side, Front Rail | Aluminium |
| 3 | 105487 | 1 | Lower Tube, Front Rail | Aluminium |
| 4 | 104963 | 2 | Rail 30x30x3 | Steel |
| 5 | 104948 | 1 | Pivot Inner Support | Aluminium |
| 6 | 105399 | 1 | Upper Tube, Front Rail | Aluminium |
| 7 | 104962 | 1 | End Support Plate, Front/Rear Rail | Aluminium |
| 8 | 104953 | 1 | Bottom Plate, Front/Rear Rail | Aluminium |
| 9 | 105506 | 1 | Bottom Right, Front/Rear Rail | Aluminium |
| 12 | 105408 | 273 | DIN125 8.8 M8 ZN | Fasteners |
| 14 | 105403 | 167 | DIN912 8.8 M8x25 ZN | Fasteners |
| 19 | 105886 | 2 | Pulley Spacer, Front | Aluminium |
| 20 | 105413 | 2 | Pulley Support Sideplate, Front | Aluminium |
| 21 | 105414 | 1 | Pulley Support Plate, Front | Aluminium |
| 23 | 105453 | 1 | Launcher Middle Pulley - Single | Aluminium |
| 27 | 105492 | 1 | Middle Pulley Shaft D40 | Steel |
| 28 | 105494 | 1 | Middle Pulley shaft Endcap D40 | Steel |
| 31 | 104957 | 3 | Hinge profile L 45x45x8mm | Aluminium |
| 32 | 104959 | 2 | Hinge | Aluminium |
| 34 | 104975 | 2 | Rail Pivot Locking Support Plate | Aluminium |
| 35 | 104973 | 2 | Hinge Locking Adapter, Upper | Aluminium |
| 36 | 104974 | 1 | Hinge Locking Adapter, Lower | Aluminium |
| 37 | 105130 | 3 | Rope Guide | Aluminium |
| 38 | 104897 | 2 | Fixator plate | Aluminium |
| 40 | 104898 | 2 | Fixator L | Aluminium |
| 41 | 105409 | 110 | DIN125 8.8 M10 ZN | Fasteners |
| 45 | 105387 | 47 | DIN985 8.8 M10 ZN | Fasteners |
| 46 | 104894 | 1 | CAT1_22-175 | Mechanica |
| 47 | 105964 | 2 | Distance Bolt M16x40, Rail | Steel |
| 52 | 105388 | 10 | DIN6912 8.8 M10x55 ZN | Fasteners |

This document is confidential and property of Thread Systems and may not be reproduced, used or disclosed to others without written approval

| | | | | | |
|----------|----------------|------------|------------------------|-------------------|--------------|
| | | | Surface finish, notes: | | Scale: 1:20 |
| | | | Name: Front Rail | | A2 sheet 1/1 |
| Author | Lauri Valdmann | 20.04.2020 | ID: 106887 | Description: CATA | Rev no: 10 |
| Drafted | Lauri Valdmann | 20.04.2020 | | | |
| Checked | | | | | |
| Approved | | | | | |