

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Sander Miller

KuupKulguri rataste disain ja valmistamine

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

kosmosetehnoloogia nooremteadur Silvar Muru

Tartu 2025

Resümees/Abstract

KuupKulguri rataste disain ja valmistamine

Tartu Observatooriumis arendatakse Eesti esimest kuukulgurit nimega KuupKulgur. Kulgur vajab võimalikult kergeid rattaid, et vähendada Kuule saatmise kulusid. Siiski peavad rattad võimaldama Kuu pinnal sujuvat liikumist ja väiksemate kivide ületamist. Käesolevas töös katsetati erinevate kuukulgurite ratastel põhinevaid disaine. Eraldi vaadeldi ratta sisu ja rattaringi. Testide tulemuste põhjal pandi kokku ja valmistati KuupKulgurile sobivaimad rattad.

CERTS: T320 Kosmosetehnoloogia; T450 Metallitehnoloogia, metallurgia, metallitooted; [1]

Märksõnad: KuupKulgur, kuukulgur, ratas

Design and manufacturing of KuupKulgur's wheels

KuupKulgur, the first Estonian lunar rover is being developed at the Tartu Observatory of the University of Tartu. The rover needs as lightweight wheels as possible to reduce the cost of sending it to the Moon. At the same time, the wheels must provide smooth movement on the Moon's surface covered with smaller rocks. In the thesis, different designs based on the wheels of various lunar rovers were tested. The internal and external parts of the wheels were examined separately. Based on the results of the tests, the most suitable wheels for the KuupKulgur were designed and manufactured.

CERTS: T320 Space technology; T450 Metal technology, metallurgy, metal products; [1]

Keywords: KuupKulgur, lunar rover, wheel

Sisukord

Resümee/Abstract	2
Jooniste loetelu	5
Tabelite loetelu	6
Lühendid, konstandid, mõisted	7
1 Sissejuhatus	8
1.1 Probleemi tutvustus	8
1.2 Töö eesmärk ja ülevaade	9
2 Ülevaade probleemist	10
2.1 Huvi Kuu vastu.....	10
2.2 KuupKulgur.....	10
2.3 Tingimused Kuul.....	11
2.3.1 Atmosfäär	11
2.3.2 Kiirus	12
2.3.3 Temperatuur	12
2.3.4 Kuu pind ja tolm.....	12
2.4 Kulgurite rattad	13
2.4.1 Astroboticu CubeRover.....	13
2.4.2 NASA CADRE	14
2.4.3 NASA VIPER	14
2.4.4 NASA Curiosity ja Perseverance	15
3 Metoodika	17
3.1 Rataste disain.....	17
3.1.1 Disaininõuded rattale.....	17
3.1.2 Siiani kasutusel olnud ratas	17
3.1.3 Ratta sisu	18
3.1.4 Rattaring	20

3.2	Rataste valmistamine.....	22
3.2.1	Masinad	22
3.2.2	Materjalid	22
3.3	Katsepingid.....	23
3.4	Katsed.....	24
3.4.1	Kestvustest	24
3.4.2	Väändetest	25
3.4.3	Paindetest	25
3.4.4	Simulatsioonid.....	26
3.4.5	Libisemise test.....	26
3.4.6	Kallaku test.....	27
3.5	Tulemuste analüüs.....	27
3.5.1	Ratta sisu	27
3.5.2	Rattaring	29
3.6	Ratta lõplik disain ja valmistamine	32
3.6.1	Disain	32
3.6.2	Valmistamine	32
4	Tulemused	34
4.1	Ratta testimine testpingiga	34
4.2	Rataste testimine KuupKulguriga	34
4.3	Rataste vastavus nõuetele.....	35
5	Tulemuste analüüs ja järeldused	37
6	Kokkuvõte.....	38
	Viited.....	40
	Lisad.....	44
	Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	57

Jooniste loetelu

Joonis 1.1: Ratta terminoloogia: rattaring (hall): (a) hambad, (b) pikihambad; ratta sisu (värviline): (punane) kodarad, (roheline) rumm, (sinine) poldid	8
Joonis 2.1: KuupKulgur Tartu Observatooriumi kosmosemissioonide simuleerimise keskkuses.	11
Joonis 2.2: Astroboticu CubeRoveri testimine regoliidi simulandis [14]	13
Joonis 2.3: CADRE kulgur läbimas Kuu keskkonna (vaakum, temperatuur) testi [2]	14
Joonis 2.4: VIPER-i rataste testimine [25]	15
Joonis 2.5: Curiosity (vasakul) ja Perseverance (paremal) [30].....	16
Joonis 2.6: Curiosity (vasakul) ja Perseverance'i (paremal) rataste illustratsioon [28]	16
Joonis 3.1: Esialgne ratas	18
Joonis 3.2: Kodaratega rattad: (a) esimese ratta pealtvaade, (b) teise ratta pealtvaade, (c) esimese ratta eestvaade, (d) teise ratta eestvaade.....	19
Joonis 3.3: Monoliitne ratas	20
Joonis 3.4: Testitavad rattaringid: (a) baasversioon, (b) vähem hambaid, (c) rohkem hambaid, (d) pikemad hambad 1, (e) pikemad hambad 2, (f) pikemad hambad 3, (g) paksemad hambad, (h) avad, (i) pikihambad, (j) kitsam	22
Joonis 3.5: Testpingi põhikomponendid: (a) toitekaabel, (b) rõngasliugur, (c) lati kinnitus, (d) kuullaager, (e) tugijalg, (f) latt, (g) mootor, (h) testitav ratas	23
Joonis 3.6: Kaldepingi põhikomponendid, tõstetud asendis: (a) puidust kalle, (b) liivapaber, (c) alumiiniumpiire (üks serv pildi jaoks eemaldatud), (d) tugijalg, (e) tugiklots (pildil 5 kraadi asendis), (f) skaala.....	24
Joonis 3.7: Rataste simulatsioonid SW-s (vasakul väände- ja paremal paindetest).....	26
Joonis 3.8: Ratta sisu väändetesti tulemused.....	27
Joonis 3.9: Ratta sisu paindetesti tulemused	28
Joonis 3.10: Erinevate rattaringide mõju ringi läbimise ajale; erinevad hambapikkused on esitatud teisel graafikul	30
Joonis 3.11: Erinevate rattaringide võimekus ületada kõva pinnasega kallakut	31
Joonis 3.12: Erinevate rattaringide võimekus ületada 4 cm paksuse pehme pinnasega kallakut.	31
Joonis 4.1: KuupKulgur (esiots vasakul) uute ratastega Tartu Observatooriumi kosmosemissioonide simuleerimise keskkuses	35

Tabelite loetelu

Tabel 3.1: Testitavate rattaringide omadused.....	21
Tabel 3.2: Arvutuslike ja tõeliste ratta sisude masside võrdlus.....	29

Lühendid, konstandid, mõisted

2U (*two units*) – kaks mahuühikut (üks ühik on 10x10x10 cm)

3D (*three-dimensional*) – kolmemõõtmeline, ruumiline

CADRE (*Cooperative Autonomous Distributed Robotic Exploration*) – NASA poolt arendatav kuumissioon [2]

NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) – Riiklik Aeronautika- ja Kosmosevalitsus

PLA (*Polylactic acid*) – polülaktiidhape

SW – SolidWorks

ULYSSES (*UniversaL physics-based planetary SurfaceS Exploration Simulator*) – KuupKulguri projektis arendatav arvutisimulatsioonikeskkond [3]

USA (*United States of America*) – Ameerika Ühendriigid

VIPER (*Volatiles Investigating Polar Exploration Rover*) – NASA endine kuukulguri projekt [4]

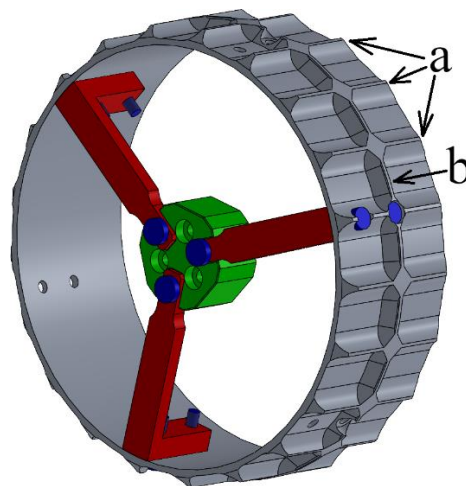
1 Sissejuhatus

Kuu on Maa ainsa loomuliku kaaslasena parim alguspunkt kosmosesse laienemiseks. Inimkond loodab kasutada Kuud ressursside saamiseks ja vahepeatuseks kaugematele taevakehadele lendamiseks [5]. Kuu uurimiseks vajalike kulgurite ehitamine ja taevakehale saatmine on väga kallis protsess. Seetõttu on hakanud kosmoseagentuurid, ettevõtted ja ülikoolid arendama väikeseid, kuid võimekaid kuukulgureid [2,6,7]. Tartu Observatooriumis arendatakse kuukulgurit nimega KuupKulgur [8], mis oleks nii massilt kui tootmiskulude poolest võimalikult väike.

1.1 Probleemi tutvustus

Suured ja väikesed kulgurid käituvad Kuu pinnasel erinevalt [9]. Seetõttu vajab KuupKulgur suurte kulgurite ratasest erinevaid rattaid. Selleks on vaja analüüsida erinevaid ratta disaine ja läbi viia katseid Kuu pinnasega analoogsel materjalil.

Käesolevas töös vaadati rattaid kahes osas: ratta sisu ja rattaring. Rattaring on joonisel 1.1 halli värvi rõngas. Ratta sisu on kogu ülejäänud ratas. Seega rumm, kodarad ning kinnitusteks vajalikud poldid ja mutrid lähevad ratta sisu alla.



Joonis 1.1: Ratta terminoloogia: rattaring (hall): (a) hambad, (b) pikihambad; ratta sisu (värviline): (punane) kodarad, (roheline) rumm, (sinine) poldid

1.2 Töö eesmärk ja ülevaade

Töö eesmärk oli teha Tartu Observatooriumis kohapeal KuupKulgurile võimalikult kerged rattad, mis arvestaksid oludega Kuul ning võimaldaksid vanadest ratastest paremat kallakute ületamist.

KuupKulguri projekt on veel algusjärgus ning vajab veel aastaid arendamist. Kulgur võib veel palju muutuda, sealhulgas ka nõuded rattale. Seetõttu oli loodavate rataste eesmärk kasutada neid eeskätt testimiseks Maal.

Vajalikud sammud eesmärgi saavutamiseks olid:

- 1) Kuu tingimuste ja teiste kulgurite rataste analüüs,
- 2) rataste disainimine ja valmistamine võrdlevate testide tegemiseks,
- 3) testi tulemuste ja simulatsioonide analüüs ning
- 4) lõplike rataste disainimine, valmistamine ja nõuetele vastavuse testimine.

2 Ülevaade probleemist

2.1 Huvi Kuu vastu

Viimase viieteist aastaga on maailmas huvi Kuu vastu tunduvalt suurenenud. Pärast kolmekümne aasta pikkust pausi on Kuule maandunud hulgaliselt kosmoseaparaate [10]. Edukalt on pehmelt maanduda suutnud ainult viie riigi maandurid. Ameerika Ühendriikide (USA) ja Venemaa kõrval saavutas Hiina seda 2013. aastal ning India ja Jaapan vastavalt 2023. ja 2024. aastal. USA kuulutas 2018. aastal, et alustab uuesti kuumissioonidega. Kuu on oluliseks eesmärgiks saanud ka erinevatel eraettevõtetel [11]. Euroopa Kosmoseagentuur soovib arendada iseseisvat Kuul maandumise võimekust ning nende andmetel peaks enne 2030. aastat toimuma maailmas üle 100 kuumissiooni [12].

Riikide ja ettevõtete huvi Kuu vastu on seotud seal leiduvate haruldaste muldmetallide ja heelium-3 isotoopidega, mida võiks tulevikus kasutada puhta energia tootmiseks Maal. Lisaks otsitakse pinnasest vett, mis toetaks alaliste baaside rajamist ja raketikütuse tootmist. Nii saaks Kuul rakette tankida, et võimaldada pikemaid kosmosemissioone. Baaside omamine Kuul kasvatab riigi mõju ka Maal, kuna näitab poliitilise ja majandussüsteemi tugevust [5].

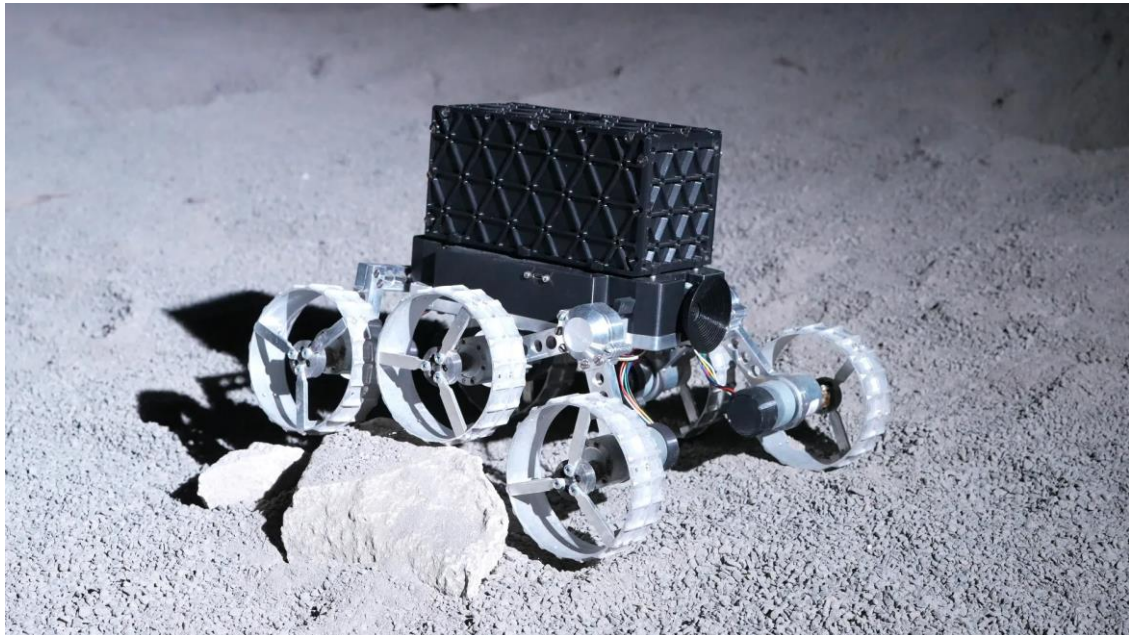
2.2 KuupKulgur

KuupKulgur on Tartu Observatooriumi tudengiprojekt, mille eesmärk on arendada ja ehitada valmis Eesti esimene samanimeline kuukulgur (Joonis 2.1). Projekt on inspireeritud kuupsatelliitidest nagu ESTCube [13] ning ettevõtte Astrobotic kulgurist CubeRover, mille lasti suurused on standardiseeritud [14].

Projekti eesmärk on anda erinevatele ettevõtetele võimalus kasutada oma teaduslikke instrumente juba valmis platvormil, mis pakub nendele elektritoidet ning liikumis- ja suhtlemisvõimalusi. Kõik vajalik kulguri toimimiseks asub põhiraamil, millele saab lisada kuni kahe mahuühiku (2U) ehk 20x10x10 cm suuruse lasti [3,8,15]. KuupKulguri pikkus on umbes 42 cm ning laius 29 cm. Kulguri maksimaalne kõrgus koos lastiga on 27 cm. KuupKulguri kandevõime on 2,6 kg, millega koos oleks mass kokku 6 kg. See jaotub kuue ratta vahel.

Projekti käigus arendatakse arvutisimulatsioonikeskkonda ULYSSES (*UniversaL physics-based planetary SurfaceS Exploration Simulator*), kus saab KuupKulguri digitaalse kaksiku peal testida kulguri juhtimist ja andmete kogumist. Simulatsiooni jaoks vajalikke andmeid saadakse Tartu

Observatooriumi kosmosemissioonide simuleerimise keskusest, kus katsetatakse KuupKulgurit kuupinnaga analoogsel materjalil. [3,15].



Joonis 2.1: KuupKulgur Tartu Observatooriumi kosmosemissioonide simuleerimise keskuses

2.3 Tingimused Kuul

2.3.1 Atmosfäär

Kuul valitsevad olud erinevad tunduvalt Maa omadest. Kuu gravitatsioon on $1,62 \text{ m/s}^2$ ehk umbes kuus korda nõrgem kui Maal [16]. Seetõttu ei suuda Kuu säilitada oma atmosfääri [17]. Tegu on peaaegu vaakumiga, mistõttu ei ole Kuul kaitset väiksemate meteorkehade eest [18]. Vähem kui millimeetrise läbimõõduga mikrometeoroidid võivad liikuda kiirusega 13–18 km/s. Pikaajalise missiooniga kuukulguri jaoks on kaitse nende eest tähtis, sest keskmiselt saab kulgur milligrammise mikrometeoroidiga pihta kord aastas. Suurema massiga meteorkehaga kokkupõrke tõenäosus väheneb koos taevakeha massi kasvuga [16].

Vaakumkeskkond soodustab mitmete materjalide muutumist gaasiliseks, mis seejärel võivad kondenseeruda teistele pindadele. Optilisele pinnale kondenseerumisel võib see häirida optikaseadmete tööd. Seetõttu ei saa Kuul kasutada enamikke plastikust ja kummist materjale [19].

2.3.2 Kiirgus

Kuul puudub lisaks atmosfäärile ka magnetväli, mistõttu on seal kiirgust sama palju kui Planeetidevahelises ruumis. Kuu pinnal on ioniseeriv kiirguskeskkond, mis koosneb päikesetuule osakekestest, kosmilisest kiirgusest ja vahel ka päikesepursete ajal tekkinud osakeste voost. Lisaks on palju röntgen- ja ultraviolettkiirgust. Kiirgus mõjutab põhiliselt elektroonikakomponente ja elusorganisme, aga ka materjale, millest kulgur tehtud on. Seetõttu tuleb kiirgusega arvestada materjalide valimisel [19].

2.3.3 Temperatuur

Erinevalt Maast ei suuda Kuu nõrk atmosfäär temperatuuri ühtlustada, mistõttu on võimalikud suured temperatuurikõikumised [16]. Ööpäev kestab Kuul neli nädalat ning suurem osa taevakehale jõudvast päikesekiirgusest muutub soojuseks, kuna kuupinna peegeldumisnäitaja on alla 10%. Temperatuur sõltub suuresti laiuskraadist ja ööpäeva ajast. Mõne sügava kraatri põhjas, kuhu päikesekiired ei jõua, võib temperatuur langeda alla $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatuurivahemik, mida eeldatavalt Kuul kogeb, on -150 kuni $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$, kuid see sõltub missioonist [19].

2.3.4 Kuu pind ja tolm

Kuu pinda mõjutavad päikesetuuled, kosmilised kiired ja seismiline aktiivsus, kuid suurimaks maastiku muutjaks on meteorkehad. Üldiselt jäävad suurimad kalded, millest kuukulgurid üles saavad, vahemikku 30° kuni 35° , kuid reaalsuses võivad kraatrite nõlvade kalded olla suuremad kui 35° [19].

Kuu pinda katab regoliit ehk lahtine materjal, mis on tekkinud pidevate mikrometeoroidide kokkupõrgete, temperatuuri suure kõikumise ja päikesetuultest põhjustatud erosiooni tõttu [17]. Leidub ka suuremaid kive, mis kulguri liikumist takistavad. Regoliidi osakekestest 90% on väiksemad kui millimeeter ning umbes 10–20% on väiksemad kui $20\text{ }\mu\text{m}$ [18]. Seetõttu on Kuul probleemiks tolm.

Tolm võib põhjustada pindade ja halvasti tolmu eest kaitstud liikuvate osade kulumist. Tolmukiht aeglustab ka soojusülekanne. Kuu tolmu eemaldamine kulgurilt on keeruline, sest osakestel on staatiline laeng, mistõttu kinnituvad need maandamata või mittejuhtivate pindade külge. Põhiline lenduv tolm tuleb kuukulguri rataste liikumisest regoliidil. Apollo 17 kuuauto paiskas suurtes kogustes tolmu kõrgemale kui kaks meetrit. Samas ei jää vaakumkeskkonna tõttu tolm hõljuma, vaid kukub kiirelt kuupinnale tagasi. Tolmu kergitavad ka meteorkehad, maanduri mootorid ning päikesekiirgus [19].

Regoliit on kuukulgurile ohtlik, kuna sellesse saab kergesti kinni jääda. Lisaks võib see põhjustada kulguri libisemist või takistada kallakust üles sõitmist. Probleemiks on ka külglibisemine, mis võib tekkida, kui kulgur liigub järsul kraatri serval. Lahtine materjal masina rataste all hakkab vajuma kraatri põhja ning koos sellega vajub ka seade ise [20].

2.4 Kulgurite rattad

2.4.1 Astroboticu CubeRover

Astroboticu CubeRoveri 2U versioon (Joonis 2.2) on KuupKulguriga analoogne. Mõlemad on sarnaste mõõtmete ja massiga ning võimaldavad kanda sama suurusega lasti. 2U CubeRoveri mass on 5 kg, millele saab lisada kuni 2 kg pagasit. CubeRoveril on veel kaks versiooni: 4U ja 6U, mis on mõeldud vastavalt kandma kaks ja kolm korda suuremat lasti [6]. Astrobotic plaanib CubeRoveri Kuule saata 2025. aasta kolmandas kvartalis oma maanduriga Griffin [21].

Igal CubeRoveri versioonil on sarnased, kui erineva läbimõõduga rattad. 2U versioon suudab üles sõita 25° kaldest, ületada 10 cm kõrgust takistust ning jätab pinna ja põhja vahele 7 cm ruumi [6]. CubeRover 2U-l rattal on kolm kodarat ja kitsas avadega rattaring, millel on 12 sirget ümarate otstega hammast.

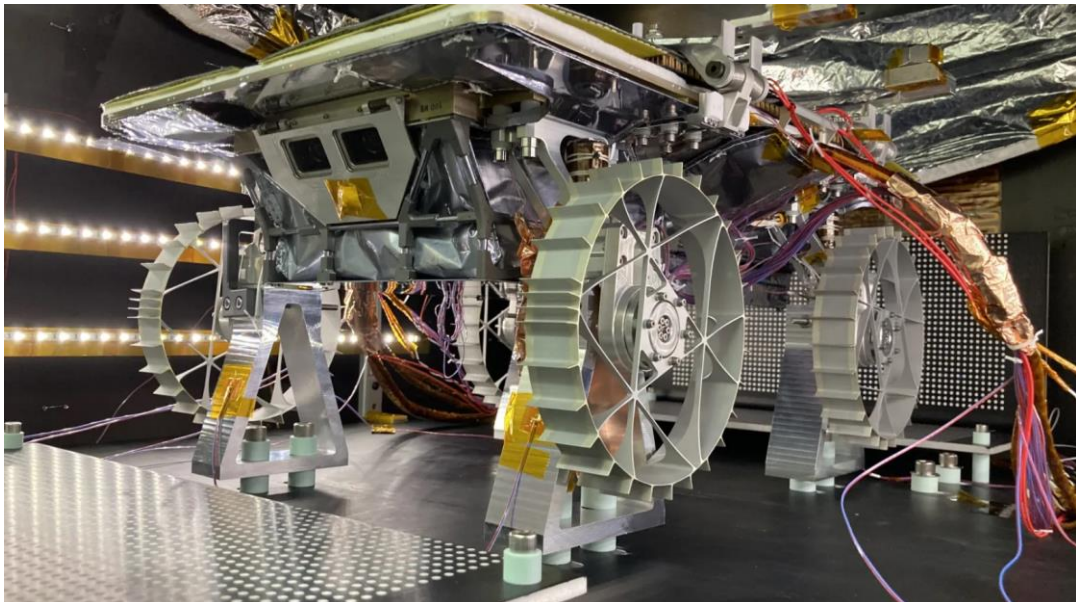


Joonis 2.2: Astroboticu CubeRoveri testimine regoliidi simulandis [14]

2.4.2 NASA CADRE

CADRE (*Cooperative Autonomous Distributed Robotic Exploration*) on Ameerika Ühendriikide Riikliku Aeronautika- ja Kosmosevalitsuse (NASA) poolt arendatav kuumissioon, mille eesmärk on saata Kuule KuupKulguriga sarnases suurusjärgus kulgurite trio (Joonis 2.3). Need peaksid koostööna autonoomselt kuupinda kaardistama paremini kui üksik robot seda teha suudaks [2]. Veebruaris 2025. aastal anti kulgurid üle ettevõttele Intuitive Machines, et need integreerida maanduriga IM-3. Kuukulgurid peaksid jõudma Kuule enne 2026. aasta teist poolt [22].

CADRE kulguri ratta rumm kinnitub rattaringi külge kerge kolmnurkse struktuuriga. Rattaring ise on kitsas ja sellel on 29 sirget hammast. Neli hammast on teistest tihedamalt koos, mida võidakse kasutada ratta tehtud täisringide tuvastamiseks.



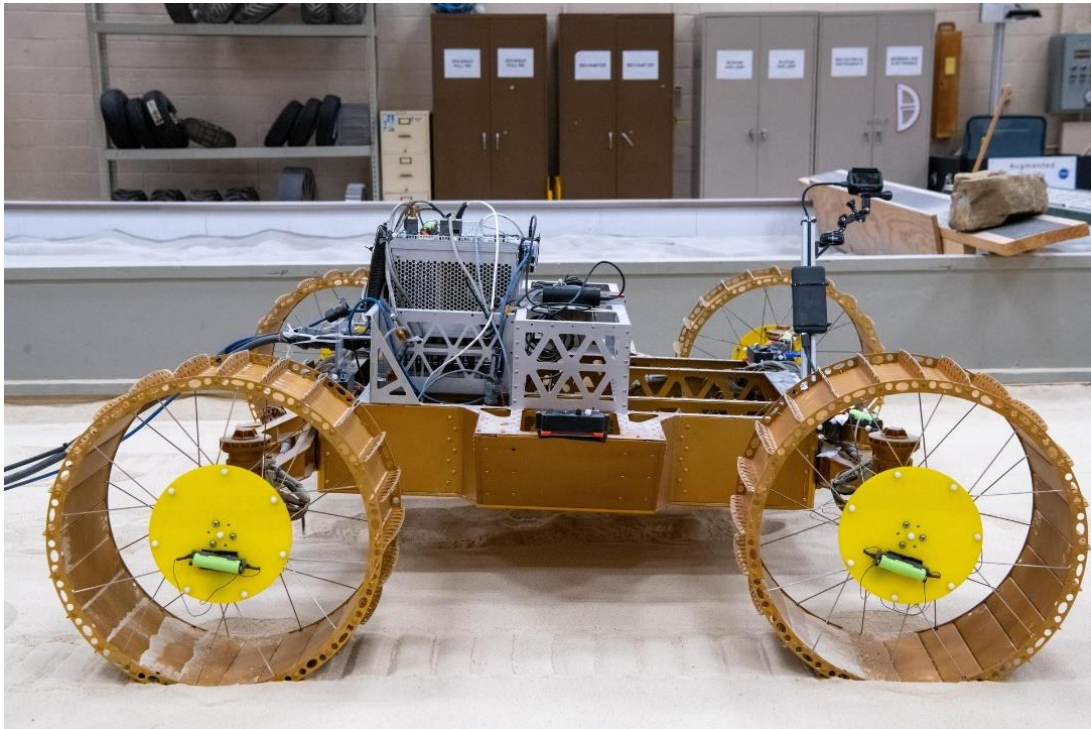
Joonis 2.3: CADRE kulgur läbimas Kuu keskkonna (vaakum, temperatuur) testi [2]

2.4.3 NASA VIPER

VIPER (*Volatiles Investigating Polar Exploration Rover*) (Joonis 2.4) pidi olema NASA esimene kuukulgur, kuid roboti arendamine lõpetati 2024. aastal kulude märgatava kasvu ja stardikuupäeva edasi lükkamise tõttu [4]. Kulguri eesmärk oli otsida ning analüüsida jääd Kuu pinnal ja selle sees. VIPER on KuupKulgurist palju suurem: 1,5x1,5x2,5 m ja selle mass on 450 kg [23].

VIPER-i kõik rattad saavad pöörata sõltumatult teistest ning liikuda üles ja alla. See annab kulgurile võimaluse liikuda külgsuunas või kohapeal pöörelda ning eriti koheval pinnasel rattaid nii-öelda jalgadena kasutada. Kulgur suudab liikuda edukalt mööda 15-kraadiseid kallakuid [24].

Rattarummu ja rattaringi ühendavad peenikesed kodarad. Rattaringil on 24 ümarate servadega ja avadega hammast ning mõlemal serval avadega pikihambad.



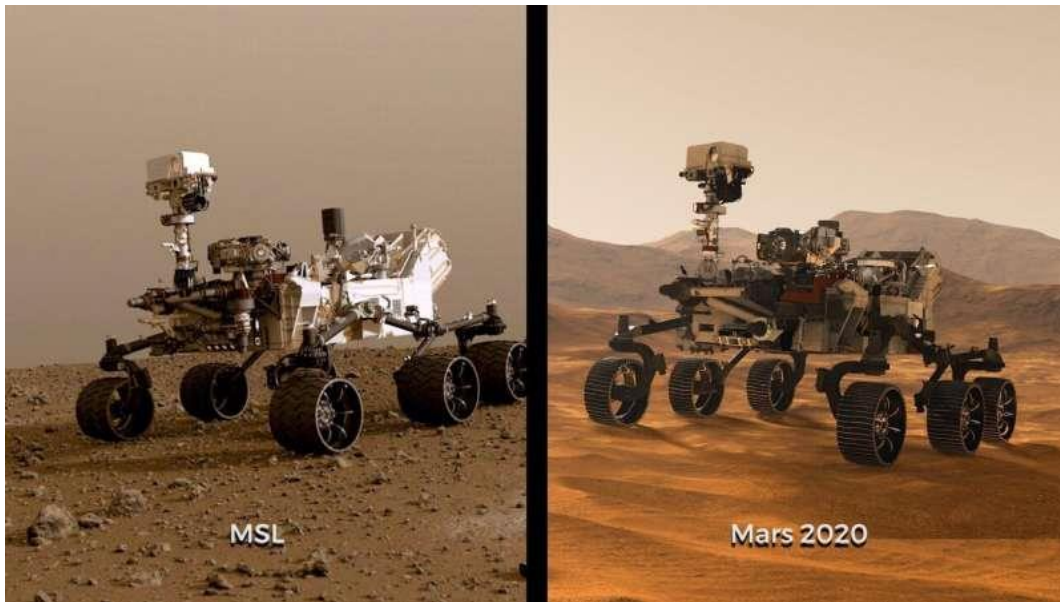
Joonis 2.4: VIPER-i rataste testimine [25]

2.4.4 NASA Curiosity ja Perseverance

Curiosity ja Perseverance on NASA marsikulgurid (Joonis 2.5), mis maandusid Marsile vastavalt 2012. ja 2021. aastal. Mõlemad kulgurid on jätkuvalt töökorras ning uurivad, kas Marsil olid kunagi eluks sobilikud tingimused ja kas elust on jäänud märke [26,27].

Perseverance on Curiosity edasiarendus. Sellele on lisatud uusi teaduslikke instrumente ja tehtud teisi muudatusi, aga välimus on marsikulgurile peaaegu samasugune [28]. Curiosity ja Perseverance'i mass on vastavalt 899 kg ja 1025 kg, kuid üheks suurimaks nähtavaks erinevuseks on rattad (Joonis 2.6). Curiosity ratta läbimõõt on 50,0 cm ja laius 40,0 cm. Ratta põhi on tehtud 0,75 mm paksusest alumiiniumist ning sellel on 19 V-kujulist ja 8 sirget hammast. Perseverance'i ratta läbimõõt on 52,3 cm, laius 33,6 cm ning põhi 1,651 mm paksusest alumiiniumist, millel on 48 nõrgalt lainelist hammast [29].

Muudatused olid tingitud Curiosity rataste ulatuslikest vigastustest. Esimest korda avastati suures koguses mõrasid 14 kuud pärast missiooni algust Marsil. 2021. aasta seisuga oli rattastel ohtlikult palju auke ja mõrasid ning purunenud neli hammast. Siiski olid rattad veel kasutuskõlblikud ning missioon sai jätkuda [29].



Joonis 2.5: Curiosity (vasakul) ja Perseverance (paremal) [30]



Joonis 2.6: Curiosity (vasakul) ja Perseverance'i (paremal) rataste illustratsioon [28]

3 Metoodika

3.1 Rataste disain

Rataste kolmemõõtmelised (3D) mudelid disainiti 3D-modelleerimise programmis SolidWorks (SW) [31].

3.1.1 Disaininõuded rattale

Lähtuvalt KuupKulguri disaininõuetest (Lisa 1) kehtestati rattale järgnevad disaininõuded.

1. Rattad peavad taluma temperatuuri -40–100 °C.
2. Rattad peavad võimaldama kiirust vähemalt 3 cm/s.
3. Rattad peavad võimaldama kohapeal pööret kiirusega vähemalt 5 kraadi/s.
4. Rattad peavad võimaldama 15-kraadisest kallakust üles liikumist.
5. Rattad peavad võimaldama libisemiseta 20-kraadisest kallakust alla liikumist.
6. Rattad peavad võimaldama liikuda piki 15-kraadist kallakut.
7. Rattad peavad võimaldama 30 mm kõrguste takistuste ületamist.
8. Rattad ei tohi vajuda üle 15 mm pinna sisse, kui kulgur on paigal.
9. Rattad peavad võimaldama vähemalt 3 km läbimist.
10. Rataste läbimõõt peab olema vähem kui 150 mm.
11. Rattad peavad olema valmistatavad Tartu Observatooriumis.

3.1.2 Siiani kasutusel olnud ratas

KuupKulguri siiani kasutusel olnud ehk esialgne ratas (Joonis 3.1) koosnes viiest osast, millest põhilised olid välja freesitud alumiiniumplokkidest. Rattaringi toorik lõigati 110/120 mm läbimõõduga torust. Välispinnale freesiti 21 ristuvat ja keskossa üks pikisuunaline hammas. Rattaringi laius oli 40 mm, paksus 1,5 mm ning hamba kõrgus 3,5 mm. Rattarummu külge oli ühendatud M4 poltidega kolm kodarat, millest igäüks oli ühendatud kahe poldiga rattaringi külge. Ratta kogumass oli 134 g.

Mootori külge kinnitus ratas kuusnurkse messingist adapteriga. Viiest M3 poldist kaks surusid vastu mootorivõlli ja kolm fikseerisid rattarummu adapteri külge.



Joonis 3.1: Esialgne ratas

3.1.3 Ratta sisu

Kõigi rataste sisud disainiti 110 mm-se sisediameetriga rattaringile. See võimaldas kasutada olemasolevat materjali ning lasi paremini võrrelda uusi disaine esialgse rattaga, eemaldades diameetri muutuja. Seega selles töös ei keskendutud diameetri mõju uurimisele. Ratta sisusid, välja arvatud monoliitne sisu, testiti 50 mm laiuse rattaringiga. Parema ühilduvuse nimel kinnitati kõik rattad mootori külge sama adapteriga, mis oli juba KuupKulguril kasutusel.

Esialgse ratta sisu disain sarnanes Astroboticu CubeRoveri ratastega. Mõlemad kasutasid kolme ühtlaste vahedega paigutatud kodarat. Seetõttu uut CubeRoveri ratastega sarnanevat disaini ei loodud, vaid testimisel kasutati esialgse ratta sisu.

3.1.3.1 Kodaratega rattad

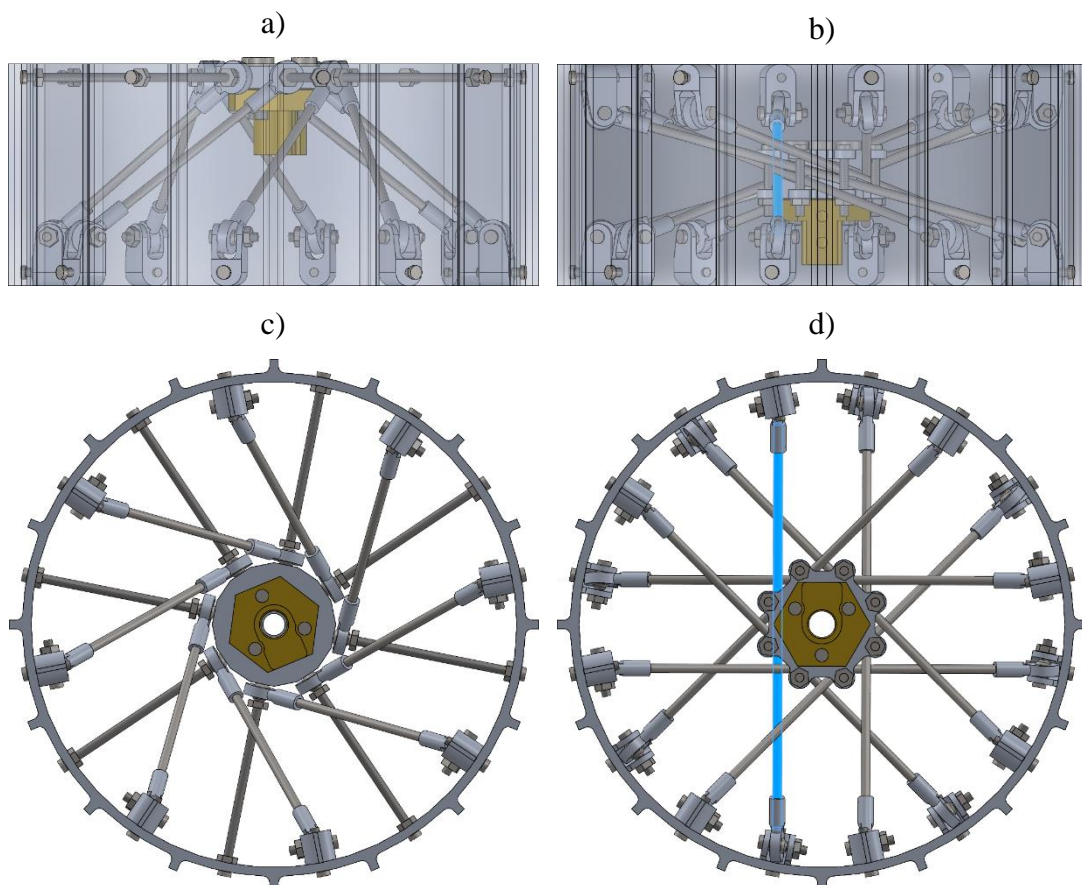
Kodaratega disaini (Joonis 3.2) mõte võeti NASA VIPER-i rattalt. Rattaringi mõlemat serva toetati kodaratega kaheksast kohast. Nii jaotus koormus endise KuupKulguri rattaga võrreldes ühtlasemalt, et tulevikus kasutada õhemat rattaringi. Samas ei soovitud liigsete kodaratega sisu liiga raskeks teha. Samal põhjusel valiti kodarateks M2 keermelatid [32] ja 50 mm pikad poldid [33]. Keermelatid saadi õige nurga alla kuulliigenditega [34].

Antud rattaid nimetati käesolevas töös kodaratega ratasteks, kuna need meenutasid kõige rohkem klassikalisi peenikesi jalgratta kodaraid. Kodaratega rattaid tehti kaks versiooni, mida nimetati vastavalt disainimise järjekorrale esimeseks ja teiseks.

Esimesel rattal liigutati kulguri mõõtmete vähendamiseks rumm servaga kohakuti. Nii sai kasutada polte ja ratas ümbritses võimalikult suurt osa mootorist. Rumm kinnitus rattaringi külge

kaheksa pika poldiga. Rummust eemal oleva rattaringi serva toetamiseks lisatud keermelatide kuulliigendid vajasis eraldi kinnitusi. Kuulliigendite maksimaalne kaldenurk ei võimaldanud neid ainult poldiga ratta külge nii kinnitada, et keermelati teine ots jõuaks rummuni. Keermelatid pandi poltide suhtes nurga alla, et muuta ratast tugevamaks mootorist rummule rakenduva pöördemomendi suhtes.

Teine ratas tehti esimesest rattast sümmeetrilisem. Selline sisu toetas ratta mõlemat külge võrdset. Kõik kodarad oli sama pikkusega, toetasid korraga rattaringi mõlemat serva ja püsisid paigal ka ilma rummuta. Rumm asus täpselt ratta keskel ning koosnes kahest ühesugusest poolest, mis M2 ja M3 poltidega kodaratele kinnitati. M2 poldid hoidsid kodaraid rummu vastas, et takistada üksiku kodara paindumist, toetades neid keskel. M3 poldid hoidsid kinni mootori adapterit.



Joonis 3.2: Kodaratega rattad: (a) esimese ratta pealtvaade, (b) teise ratta pealtvaade, (c) esimese ratta eestvaade, (d) teise ratta eestvaade

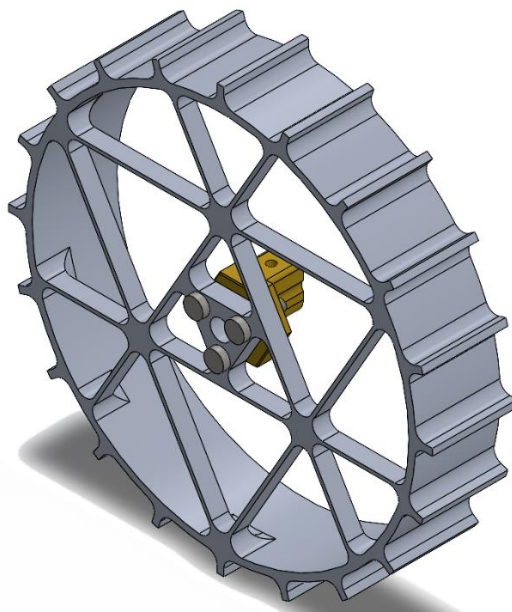
Kodaratega rataste suureks miinuseks oli detailide paljusus, mis tähendas suurt ajakulu nende tootmisel ja kokku panemisel. Esimesel rattal oli vähem kuulliigendeid ja nende kinnitusi, mis tegi selle teisest kergemaks.

3.1.3.2 Monoliitne ratas

Ühes tükis ratta disain (Joonis 3.3) põhines NASA CADRE kuukulgurite ratastel. Ratta sisu pidanuks tänu oma kolmnurksele struktuurile olema kerge, aga tugev. Struktuur koosnes 5 mm laiustest ja 1 mm paksustest alumiiniumribadest. Neid ühendasid 3 mm raadiusega ümarad üleminekud, kuna freesimisel pidid avade raadiused olema tera raadiusega võrdsed või suuremad.

Monoliitse ratta eeliseks oli lihtne tootmine. Välja oli vaja lõigata rattast suurem toorik ning kinnitada tugevalt freespinki. Pärast freesimist ei vajanud ratas eraldi kokkupanemist. Selle asemel kulus aeg freesimisele. Lisaks oli disaini võimalik vajadusel kergesti tugevdada, muutes ratta võre paksemaks ja laiemaks, kuid sellega kaasneks massi kasv. Suurimaks miinuseks oli suur materjali kulu, kuna põhiline osa alumiiniumist tuli toorikust eemaldada.

Käesoleva töö tegemise ajal oli Tartu Observatooriumi töökojas suurima saadaoleva alumiiniumploki paksus 30 mm. Kui arvestada tooriku kinnitamiseks vajalikku osa, sai ratta laius olla maksimaalselt 25 mm. Seetõttu erines monoliitse ratta rattaring ülejäänutest, kuid ratta sisude testimisel ei olnud sarnasus vajalik.



Joonis 3.3: Monoliitne ratas

3.1.4 Rattaring

Selles töös otsustati kasutada ainult sirgeid hambaid. Kõik eelpool nimetatud kuukulgurid kasutasid sirgeid hambaid ning marsikulguri Curiosity purunenud V-kujulised hambad asendati edasiarenduses peaaegu sirgete hammastega. Aja ja materjali kokkuhoiu nimel kasutati

rattaringide testimiseks polülaktiidhapest (PLA) 3D-printeriga prinditud rattaid. Seetõttu oli mitmed mõõtmed, nagu seina paksus ja hamba paksus, suuremad, kui vastavatel alumiiniumist versioonidel vajalik oleks. Kõik rattad kasutasid monoliitset ratta sisu, et need ei vajaks pärast printimist koostamist.

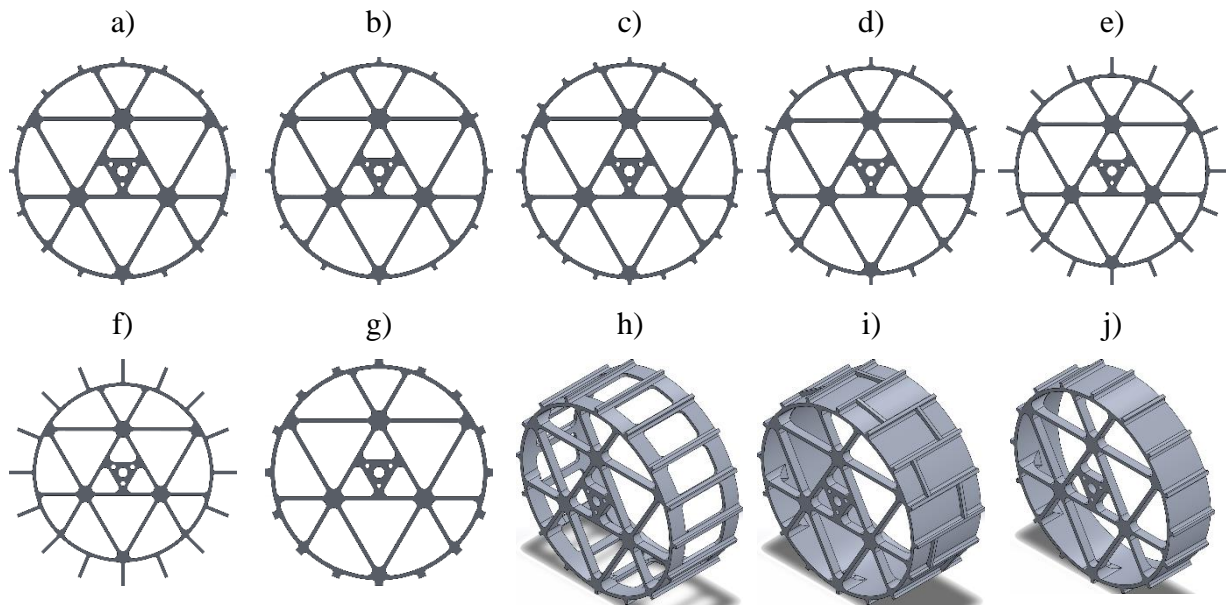
Alustuseks disainiti rattaring (edaspidi baasversioon), mida sai välja freesida 110/120 mm läbimõõduga alumiiniumtorust. Sellel oli 16 hammast, et kodaratega ratta kinnitused ei satuks hammastega kohakuti. Nende kõrgus oli 3 mm, et toorikut maksimaalselt ära kasutada, ja paksus 2 mm. Rattaringi seina paksus oli 2 mm. Nakashima jt [35] tööst selgus, et libisemise vastu aitas üldiselt suurem diameeter ja laius. Õige hammaste arv ja nende mõõtmed tuli leida katsetega.

Kokku disainiti rattaringide testimiseks kümme erinevat ratast (Joonis 3.4). Erisused on välja toodud tabelis 3.1. Iga ratta saamiseks muudeti baasversioonil ainult üht parameetrit.

Tabel 3.1: Testitavate rattaringide omadused

Versioon	Hammaste arv	Hammaste pikkus [mm]	Eriomadus	Mass (SW) [g]
Baasversioon	16	3	-	134
Vähem hambaid	12	3	-	130
Rohkem hambaid	20	3	-	138
Pikemad hambad 1	16	5	-	143
Pikemad hambad 2	16	10	-	164
Pikemad hambad 3	16	15	-	186
Paksemad hambad	16	3	Hamba paksus 4 mm	147
Avad	16	3	Hammaste vahel kandilised avad	89
Pikihambad	16	3	Lisatud 2 mm paksud pikihambad	138
Kitsam	16	3	Laius 30 mm	90

Tabelis toodud massid leiti SW-ga, ratta materjaliks määrati 6061 T6 alumiiniumisulam. Pikihammastega variandi puhul lisati need ristihammaste vahele kordamööda ühest ja teisest ratta servast 13 mm kaugusele. Nii välditi olukorda, kus ratta ristlõige oleks ühtlane ring, mis tekitaks takistuste ületamisel libisemist.



Joonis 3.4: Testitavad rattaringid: (a) baasversioon, (b) vähem hambaid, (c) rohkem hambaid, (d) pikemad hambad 1, (e) pikemad hambad 2, (f) pikemad hambad 3, (g) paksemad hambad, (h) avad, (i) pikihambad, (j) kitsam

3.2 Rataste valmistamine

Sisu testimiseks mõeldud rattad valmistati Tartu Observatooriumi töökojas ja on näha lisas 2. Rattaringi testrattad prinditi mustast PLA-st isikliku Bambu Lab A1 mini 3D-printeriga [36].

3.2.1 Masinad

Ratta sisu testrattaste tootmiseks tarvitati viit masinat. Toorikute mõõtu lõikamiseks kasutati CORMAK BS128HDRC lintsaagi [37] ning lõikejääkide puhastamiseks lintlihvijat Scheppach BTS900 [38]. Kõik alumiiniumist detailid freesiti välja Tormach 1100MX freespingiga [39]. Pingile sobilik masinkood 3D-mudelitest loodi programmiga Fusion 360 [40]. Ratta osadesse, kuhu freespingiga vajalikke avasid puurida ei saanud, puuriti need puurpingiga. Osa detaile ja toorikuid vajasisid eel- ja lõpptöötlemist, mida tehti treipingiga JET BD-920W [41].

3.2.2 Materjalid

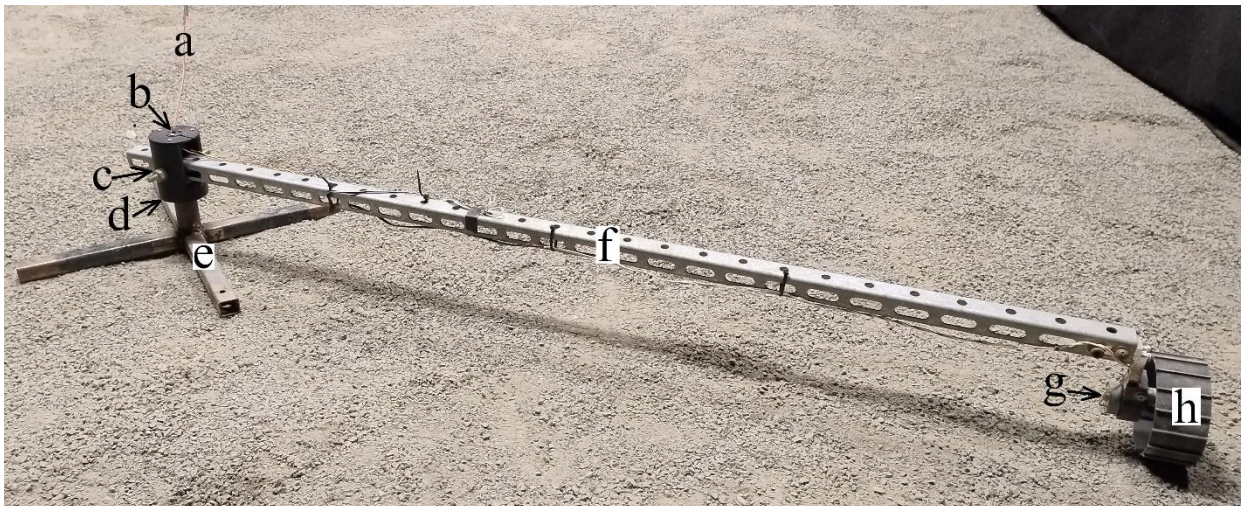
Kõik rataste freesitavad osad toodeti EN AW 6082 T651 alumiiniumisulamist. Tegu oli lihtsasti masintöödeldava, odava ja kättesaadava materjaliga ning sellel oli madala tiheduse kohta küllaltki suur tõmbetugevus (270 – 320 MPa) [42]. Seetõttu sai seda hästi kasutada KuupKulguri arendustöös. Kokku valmistati rataste sisude testimiseks üks monoliitne ratas ning teiste rataste jaoks alumiiniumtorust üks rattaring. Kodaratega rataste jaoks freesiti välja rummud ning 24 kuulliigendite kinnitust, mis vajasisid ka keermestamist.

Endise ratta mootori adapterid olid välja freesitud C360 messingist, sest see oli lihtsasti masintöödeldav ja kõrge tõmbetugevusega (340 – 470 MPa) [43]. Valmistoodet nagu poldid, mutrid ja keermelatid olid tehtud AISI 304 roostevabast terasest. Kuulliigendite kest oli alumiiniumist.

3.3 Katsepingid

Rataste testimiseks valmistati tsirkulaarne testimispink (Joonis 3.5), edaspidi testpink. Pingi põhikomponendid olid tugijalg, kuullaager, latt ja mootor. Ratas kinnitati adapteriga mootori külge ning selle ja tugijala vahelist kaugust oli võimalik muuta. Latile sai lisada raskusi mõlemale poole jalga, et suurendada või vähendada rattale mõjuvat raskusjõudu. Testpink sai toidet elektrivõrgust ning kasutas rõngasliugurit, et voolu üle kanda pöörlevale osale.

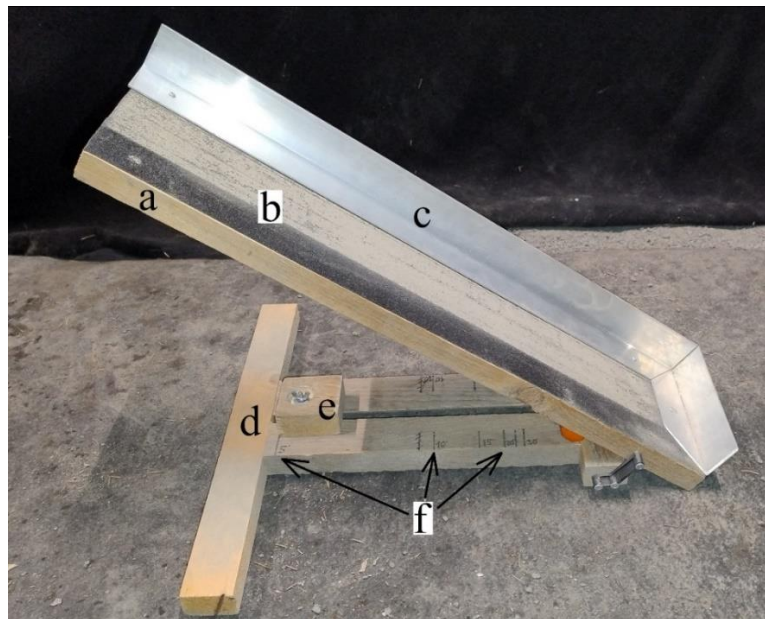
Käesolevas töös kasutati testpinkki maksimaalse, 1,4 m raadiusega, et ratta liikumine meenutaks võimalikult palju otse liikumist. Selliselt rakendus mootori otsas olevale rattale mass 1,35 kg. KuupKulguri mass oli sõltuvalt lastist kuni 6 kg ning sellel oli kuus ratast. Seega rakendus igale rattale keskmiselt 1 kg. Testimisel oli mõistlik kasutada natuke suuremat massi, et võtta arvesse olukorda, kus kõik rattad ei puuduta maapinda. Testpingist endast rakenduv 35% massi kasv oli testi jaoks piisav. Kuigi testpink võimaldab ka vastukaalu lisada, ei viidud käesolevas töös läbi teste Kuu gravitatsiooniga, sest uued rattad olid mõeldud eeskätt KuupKulguri testimiseks Maal.



Joonis 3.5: Testpingi põhikomponendid: (a) toitekaabel, (b) rõngasliugur, (c) lati kinnitus, (d) kuullaager, (e) tugijalg, (f) latt, (g) mootor, (h) testitav ratas

Rattaringide testimiseks ehitati puidust kaldepink (Joonis 3.6), millel määratud nurgast pidi ratas üles sõitma. Pingi pinda kattis liivapaberite teip, mis parandas nakkumist rataste ja pinna vahele.

Kuna rattad käituvad erinevalt kõval ja pehmel pinnasel, sai kaldepingile lisada pehme pinnasega katmiseks alumiiniumprofiilist piirded. Heikeni jt väitel [44] on Kuu pinnas 5–10 cm sügavusel väga tihe võrreldes pealispinnaga. Kaldepink ei kannatanud 10 cm paksu pinnase raskust, kuna oli algselt ehitatud testimaks rattaid ainult kõval pinnasel. Seetõttu kasutati testimiseks 4 cm paksust pinnast. Kaldepingile märgiti peale kalded iga viie kraadi tagant. Pingi täpsus polnud piisav, et teha katseid tihedamalt. Suuremate kaldenurkade korral tähendas tugiklotsi väike nihe suurt muutust kaldes. Lisaks surus ratta ja pinnase raskus kaldepinda alla ja suurendas mõõtemääramatust.



Joonis 3.6: Kaldepingi põhikomponendid, tõstetud asendis: (a) puidust kalle, (b) liivapaber, (c) alumiiniumpiire (üks serv pildi jaoks eemaldatud), (d) tugijalg, (e) tugiklots (pildil 5 kraadi asendis), (f) skaala

3.4 Katsed

3.4.1 Kestvustest

Katse (Lisa 3) eesmärk oli testida, kas ratta sisud olid piisavalt vastupidavad. Test viidi läbi kosmosemissioonide simuleerimise keskses. Ratas kinnitati testpingile ning lasti 24 tundi mööda kuupinna analoogi ringe teha. Rattad läbisid katse jooksul umbes 15 kilomeetrit, mis oli viis korda rohkem nõudest 9. Rada, mida ratas läbis, koosnes kallakutest ja kivist, et kontrollida ka vastupidavust põrutustele. Tervet testi filmiti ning seda sai jälgida otseülekanadena. Selleks kasutati programme OBS [45] ja nginx [46,47] ning otseülekanande nägemiseks virtuaalset privaattõrku Tailscale [48]. Testil kasutati Xiaomi nutipistikut [49], mis võimaldas testpingi toidet kaugelt katkestada.

3.4.2 Väändetest

Eksperimendiga (Lisa 4) taheti teada saada, millist väänet ratta sisud kannataks ning kas ratas deformeeruks, kui see jääks kinni mootori töötamise ajal. KuupKulguris kasutati NFP-GM37-545-EN 12 V elektrimootoreid 150:1 ülekandeteguriga käigukastiga ning nende pöördemoment oli 1.42 Nm [50]. Võttes varuteguriks kordaja kaks pidid rattad vastu pidama vähemalt 3 Nm-sele väändemomendile. Rataste külge kinnitati adapter, milles oli sobiv ava momentvõtme jaoks. Adapteri külge lisati seier, mis näitas deformatsiooni suurust. Rattad keerati tugevalt kruustangide vahele ning neid hakati momentvõtmega väänama. Väändemomenti suurendati, kuni ratas deformeerus vähemalt neli kraadi või saavutati momentvõtme piir 25 Nm. Kuna järgnes veel teine deformeerumise test, ei soovitud ratta sisu liigselt lõhkuda.

3.4.3 Paindetest

Katsega (Lisa 5) testiti, millist paindemomenti ratta sisud kannataks. Selleks kinnitati ratas kruustangide vahele ja rummu külge kruviti 15 cm pikkune messingist adapter. Adapteri külge riputati raskusi umbes 14 cm kaugusele rummust. Pulga külge kinnitati laser, mis näitas seinale kinnitatud ruudustiku keskpunkti. Seejärel hakati lisama ja eemaldama poole kilogrammise sammuga järjest suuremaid raskusi, kuni oli võimalik tuvastada plastset deformatsiooni. Seejärel jätkati koormuse suurendamisega ning pandi kirja, kui palju laser alguspunktist mööda näitab. Katse lõpetati, kui laser ei näidanud enam paberile. Raskuste massidest arvutati rattale mõjunud paindemomendid valemiga (3.1):

$$M = mgl, \quad (3.1)$$

kus

M – paindemoment [Nm],

m – mass, mis adapterile rakendati [m],

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – Maa raskuskiirendus [m/s^2] ja

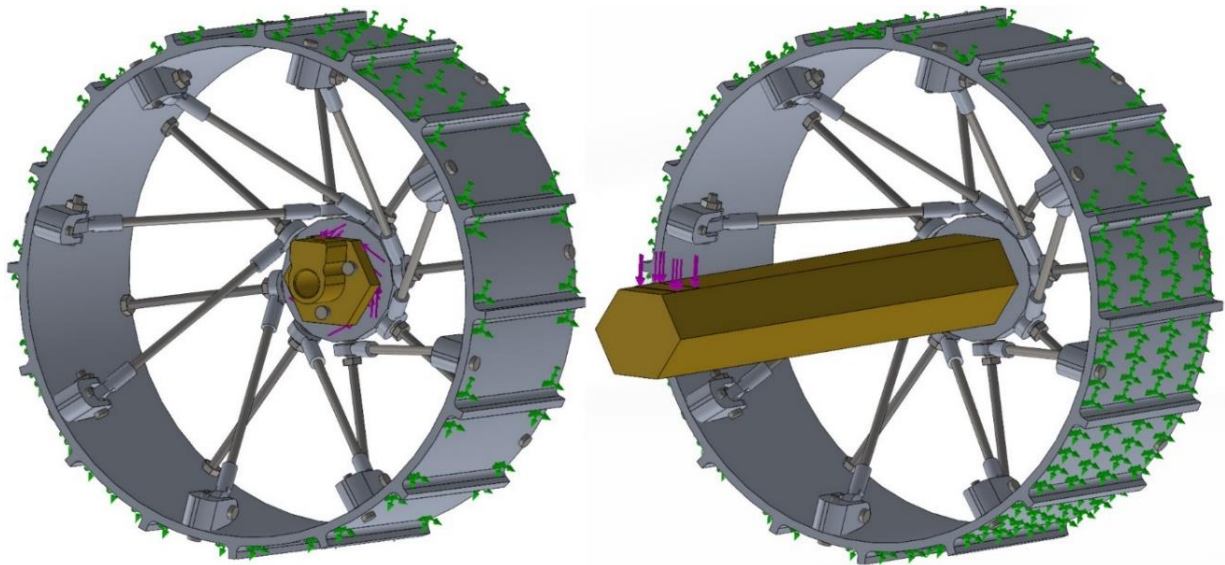
l – jõu õla pikkus [m].

3.4.4 Simulatsioonid

Iga ratta sisu kohta tehti painde- ja väändetesti simulatsioon programmis SolidWorks. Selle eesmärk oli teada saada jõudude suurusjärgud, millele rattad võiksid vastu pidada. Tulemusi võrreldi päris eksperimentidega, et anda hinnang simulatsioonide täpsusele.

Ratastest loodi võimalikult täpsed 3D-mudelid ning detailidele määrati sobivad materjalid. Alumiiniumisulamina kasutati materjali 6061 T6, kuna see oli defineeritud sulam, mille uuritavad mehaanilised omadused olid samad toorikute materjali 6082 T651-ga. Seejärel defineeriti testide parameetrid ning rattaid koormati erinevate jõudude ja pöördemomentidega. Otsiti vähimat väärtust, mille puhul koostus olev detail deformeerus. Joonisel 3.7 tähistavad rohelised nooled fikseeritud pinda ning lillad nooled rakendatava jõu suunda. Kõikidel katsetel oli fikseeritud ratta välispind.

Väändetestis rakendati pöördemomenti mootorikinnitusele (joonisel kollakaspruun), sest see detail oli kõigil ratastel ühine. Paindetestis rakendati jõudu adapterile, mida kasutati ka päris testis. Jõudu rakendati 14 cm kaugusele ratta rummusest.



Joonis 3.7: Rataste simulatsioonid SW-s (vasakul väände- ja paremal paindetest)

3.4.5 Libisemise test

Esimeses rattaringi testis lasti rattal sõita testpingis kümme ringi. Iga ringi läbimise aeg salvestati. Mida kiiremini ratas ringid läbis, seda vähem oli libisemist. Pind, mida ratas ületas, tehti rehaga ühtlaselt pehmeks iga testi alguses, et muuta tingimusi võimalikult sarnasteks.

3.4.6 Kallaku test

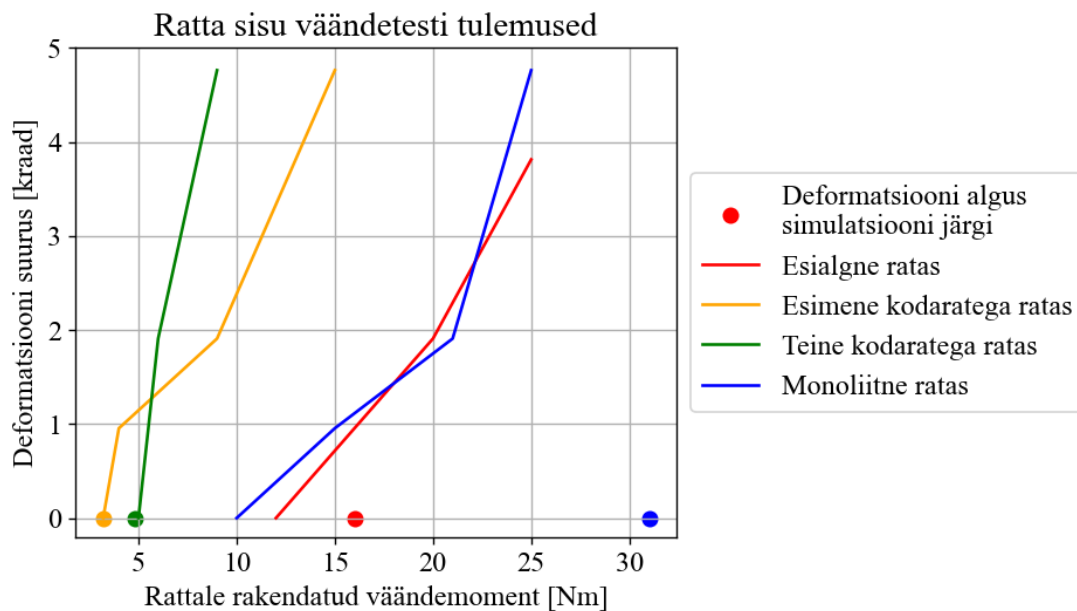
Katsed (Lisa 6) viidi läbi eelnevalt mainitud kaldepingi peal, eesmärgiga saada teada, kui hästi sobivad erinevad rattaringid kallaku ületamiseks. Kaldenurk jäi nii kõva kui ka pehme pinnase korral vahemikku 5–30 kraadi. Nurka suurendati viie kraadi kaupa. Testi läbimiseks pidi ratas liikuma ette määratud kohani. Nii välditi ratta alla kukkumist kalde lõpus. Iga kalde kohta pandi kirja, kas ratas suutis selle ületada.

3.5 Tulemuste analüüs

3.5.1 Ratta sisu

Kestvustesti tulemusena oli kõigi rataste välimistel osadel kulumisjälgi. Siiski ei purunenud ükski ratta detail, mistõttu läbisid kõik rattad kestvuskatse.

Väändetesti tulemuste graafikul (Joonis 3.8) näitavad punktid simulatsiooni järgi leitud momenti, millest alates peaksid rattad hakkama deformeeruma. Sama värvi jooned näitavad füüsilise testi tulemusi. Kõik rattad pidasid vastu minimaalsele vajalikule 3 Nm pöördemomendile. Siiski on näha, et mõlemad kodaratega rattad kannatavad teistest ratastest vähem pöördemomenti. Seega osutusid selle testi parimateks monoliitne ja esialgne ratas.



Joonis 3.8: Ratta sisu väändetesti tulemused

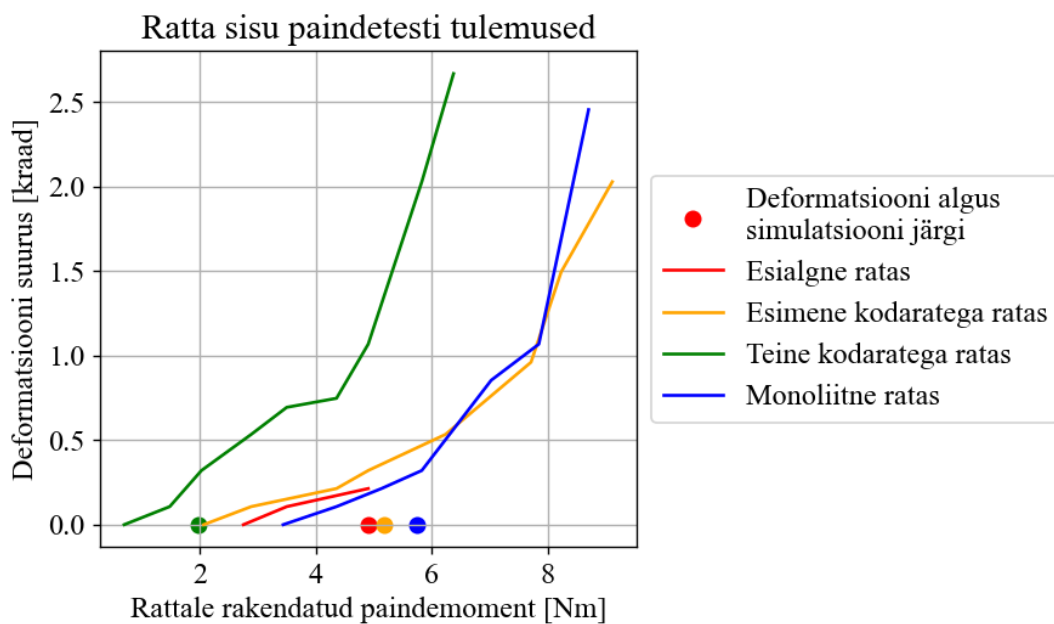
Simulatsiooni täpsus kodaratega rataste puhul on hea, erinedes päris tulemustest vähem kui 5%. Esialgse ratta disaini puhul oli erinevus umbes 25% ning monoliitse ratta puhul lausa 68%. Suur erinevus simulatsioonist tulenes tõenäoliselt adapterist, mida kasutati, et momentvõtit ratta külge

kinnitada. Päriselus osutus kinnitus nõrgemaks, kui simulatsioonis. Monoliitse ratta puhul ei deformeerunud ratas ise, vaid adapterit kinni hoidvad poldid. Seetõttu ei saanud selgeks ratta tegelik tugevus. Esialgse ratta tulemus oli simulatsioonile lähemal, kuna see toetas adapterit ka külje pealt.

Paindetesti tulemused on näha joonisel 3.9, kus jooned näitavad deformatsiooni sõltuvust rakendatud paindemomendist. Punktid tähistavad simulatsioonis leitud plastse deformatsiooni algust.

Graafiku joonte pikkus sõltus katse kestvusest ehk mitu mõõtmist sai teha enne, kui ratas kruustangide vahel liikuma hakkas. Antud katse puhul ei saanud rattaid kruustangide vahele servadest kinnitada, kuna sellisel juhul toetunuks rakendatavad raskused vastu kruustange. Kruustangide vahele pandi ratta ümar välispind. See tähendas, et rattaid kinni hoidev jõud sõltus sellest, kuidas rataste sisu toetas välimist osa. Monoliitse sisuga ja kodaratega rattad toetasid rattaringi ühtlaselt ning need hakkasid kruustangide vahel liikuma umbes 8 kg rakendamisel. Esialgse ratta kolm kodarat ei toetanud rattaringi sama hästi. See muutus silmnähtavalt ovaalseks ning hakkas libisema juba 4 kg juures. Seetõttu õnnestus esialgse ratta puhul kätte saada ainult kolm andmepunkti.

Paindetesti tulemustest nähti, et teine kodaratega ratas oli ülejäänutest nõrgem. Teised rattad olid tugevuselt sarnased. Seega sai testis parima tulemuse monoliitne ratas, millele järgnes esimene kodaratega ratas.



Joonis 3.9: Ratta sisu paindetesti tulemused

Testide tulemused olid simulatsioonide tulemustest umbes 25-30% väiksemad ning esimese kodaratega ratta puhul lausa 45% väiksem. Erinevus võis tulla asjaolust, et rattaid ei saanud kindlalt kruustangide vahele kinnitada ning need võisid märkamatuult libiseda. Lisaks olid rattad väändetestist natuke deformeerunud. Siiski saab simulatsiooni tulemuste järgi rattaid omavahel edukalt võrrelda.

Kuna kuukulgur peab olema võimalikult kerge, võrreldi ka ratta sisude masse. Kuna monoliitse ratta sisu ei saa eemaldada ning selle väline osa erineb teistest ratastest, polnud võimalik selle massi mõõta. Seetõttu leiti selle mass SW abiga. Tabelis 3.2 on välja toodud sisude päris ja SW-s leitud massid ning nende erinevus protsentides. Keskmise erinevus oli 4,5%. Seega oli monoliitse ratta hinnanguline mass 15,2 g.

Massi võrdluses selgus, et monoliitne ratas on umbes kolm korda kergem kui esialgne ja esimene kodaratega ratas ning neli korda kergem teisest kodaratega rattast. Seetõttu on monoliitsel rattal suur eelis teiste disainide ees.

Tabel 3.2: Arvutuslike ja tõeliste ratta sisude masside võrdlus

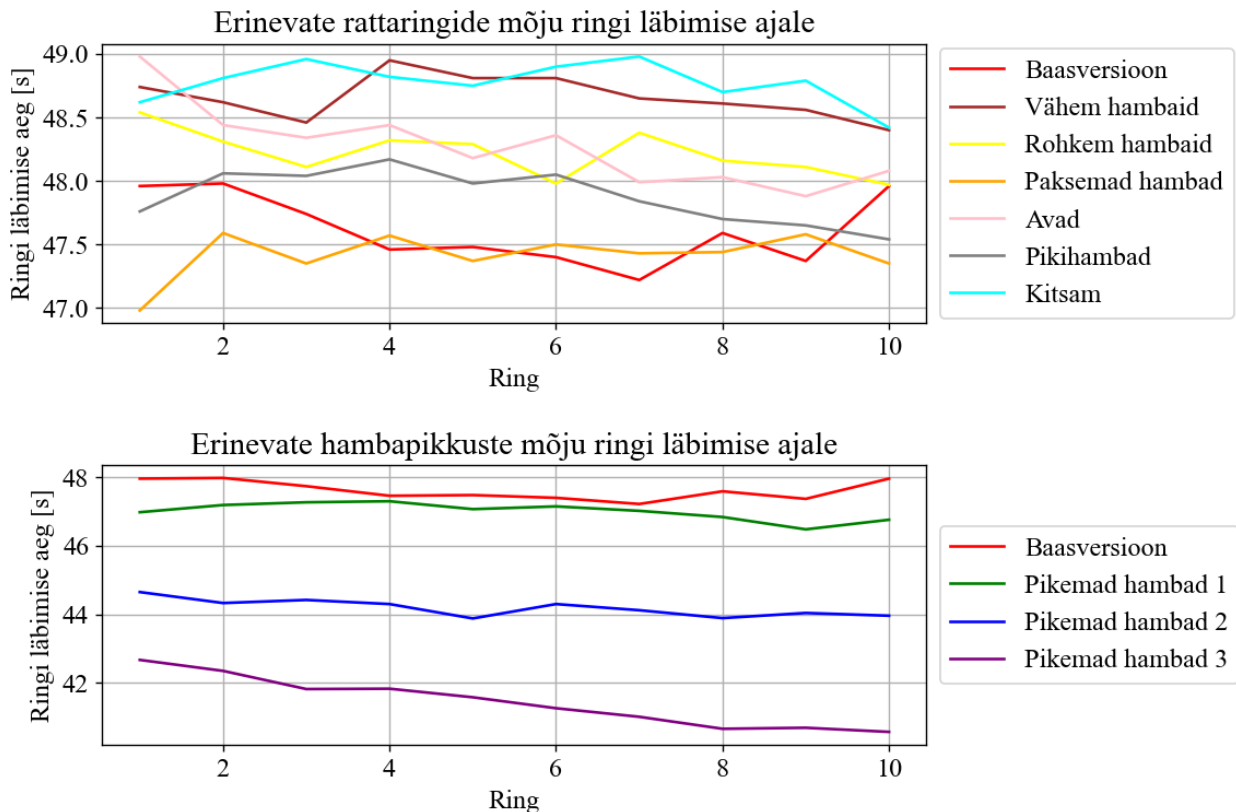
Ratas	Mass [g]	Mass (SW) [g]	Erinevus [%]
Esialgne	44	46,5	5,4
Esimene kodaratega	46	48,8	5,7
Teine kodaratega	63	64,6	2,5
Monoliitne	15,2 (hinnang)	15,9	$(5,4+5,7+2,5)/3 = 4,5$

3.5.2 Rattaring

Libisemise testi tulemustest tehti kaks graafikut (Joonis 3.10), sest hammaste pikemaks muutmisega suurenes ka ratta diameeter. Kuna mootori nurkkiirus oli iga rattaga sama, tegid suurema diameetriga rattad ringe kiiremini (keskmised ringi läbimise ajad: hamba pikkus 5 mm – 47,0 s, 10 mm – 44,2 s, 15 mm – 41,4 s). Polnud võimalik aru saada, kas ja kui suur osa tulenes paremast haardetugevusest pinnasel. Seetõttu ei saanud neid võrrelda teiste ratastega. Katse edasiarenduses võiks mõõta ratta täispöörde tegemisel läbitavat vahemaad ja võrrelda seda teoreetilise tulemusega.

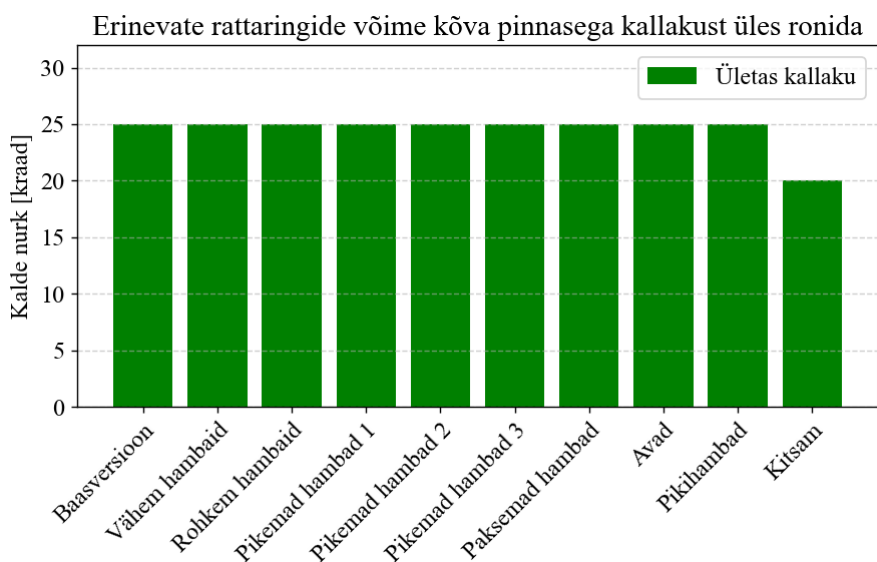
Kõik võrreldavad rattad, välja arvatud paksemate hammastega ratas, osutusid aeglasemaks kui baasversioon (keskmise ringi läbimise aeg – 47,6 s). Maksimaalne ajakulu erinevus ringi kohta oli umbes 1,5 s. Hammaste arvu muutus tähendas mõlemal juhul kiiruse langust (vähem

hambaid – 48,7 s, rohkem hambaid – 48,2 s), mistõttu baasversiooni 16 hammast oli optimaalne arv. Paksemad hambad parandasid haardetugevust vähe (47,4 s), mistõttu ei olnud suurema massi tõttu nende kasutamine otstarbekas. Avadega ratta (48,3 s) kiiruse vähenemine oli piisavalt väike, et õigustada nende kasutust, kui see oluliselt ratta massi alandab. Pikihambaid (47,9 s) võiks liigse külglibisemise takistamiseks kasutada, kuna nende negatiivne mõju ratta haakuvusele oli minimaalne. Laius (48,8 s) mõjutab ratast kõige rohkem. Ratta ja pinnase 40% väiksem kontaktpind suurendas libisemist, kuid vähendas märkimisväärselt massi.



Joonis 3.10: Erinevate rattaringide mõju ringi läbimise ajale; erinevad hambapikkused on esitatud teisel graafikul

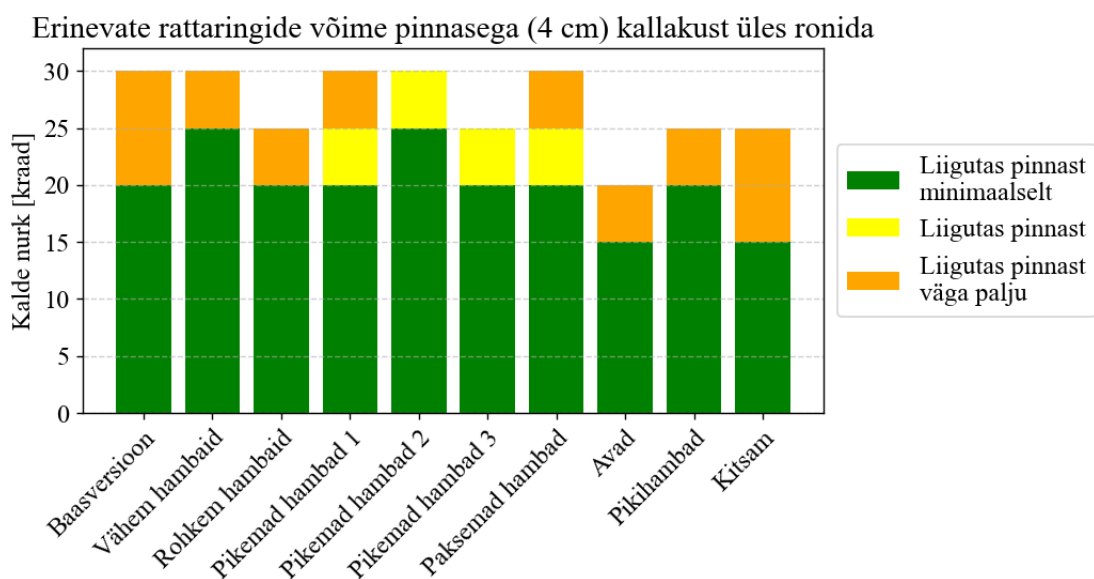
Kõva pinnasega kallaku testi tulemused on näha joonisel 3.11. Ükski katsetatud ratastest ei suutnud ületada 30-kraadist kallakut. 25-kraadise kalde ületasid kõik rattad, välja arvatud kitsam variant, mis tegi seda kuni 20 kraadi korral. Kuna kaldepingi disain ei võimaldanud suurte väärtuste korral kallet täpselt muuta, polnud võimalik rataste erinevuste esile toomiseks täpsemaid mõõtmisi teha.



Joonis 3.11: Erinevate rattaringide võimekus ületada kõva pinnasega kallakut

Pehme pinnasega kallakust üles ronimise tulemused on joonisel 3.12. Paremate võrdlusandmete saamiseks vaadeldi lisaks kalde ületamisele ka pinnase nihkumist rataste liikumisel. Roheline tähendab, et maha jäi samasugune jälg nagu horisontaalsel pinnasel. Kollane, et ratas vajus rohkem pinnasesse, kuid ei jõudnud kõva pinnaseni. Oranž, et ratas jõudis kõva pinnaseni, kuid liikus aeglaselt üles. Ülejäänud kordadel kaevus ratas kohe kaldepingi põhjani.

Baasversiooniga võrreldes aitasid ronimisvõimele kaasa pikemad ja paksemad hambad ning nende arvu vähendamine. Parima tulemuse andsid 10 mm pikkused hambad. Negatiivselt mõjusid rattale avad ja laiuse vähendamine. Siiski suutsid kõik rattad ületada edukalt nõudest 4 tuleneva minimaalse ehk 15-kraadise kallaku.



Joonis 3.12: Erinevate rattaringide võimekus ületada 4 cm paksuse pehme pinnasega kallakut

3.6 Ratta lõplik disain ja valmistamine

3.6.1 Disain

Ratta sisude testide parimate tulemuste hulgas oli vaatamata oma kergusele monoliitne ratas. Seetõttu otsustati käesolevas töös kasutada KuupKulguri ratta lõplikus versioonis monoliitse ratta disaini, mis tähendas, et ratta laius pidi olemasoleva toormaterjali pärast olema 25 mm. Kuigi kitsam rattaring jäi katsetes teistele alla, ei olnud vahe liiga suur. See vastas nõudele 5 ehk sai hakkama 15-kraadise kallakuga ja selle kasutamine vähendas rattaringi massi võrreldes katsetatud 50 mm rattaringiga poole võrra.

Rattaringi disainis otsustati ratta kitsuse tõttu mitte kasutada avasid, kuna pinnase sisse vajumist takistavat pinda oli vähe. Hammaste arvuks valiti 16. Vähem hambaid parandas ronimisvõimet, kuid libisemise testis muutsid ratas aeglasemaks. Kallakul ronimisel oli parim 10 mm pikkune hammas, mida kasutati lõplikus disainis. Massi vähendamiseks otsustati hammaste ja välispinna paksust vähendada 1,5 mm-ni. See tagas Maa pealseks katsetamiseks tugevad rattad. Kuu pinnal võiksid hästi töötada ka õhemad rattad, kuid seda tuleks tõestada vastavate katsetega.

Külglibisemise vastu disainiti teine samasugune ratas, millele olid lisatud pikihambad. Töö ajal oli KuupKulguril kuus ratas. Ette ja taha otsustati panna pikihammasteta rattad, et vähem takistada kulguri pööramist. Keskmised rattad olid pikihammastega, kuna need liikusid pööramisel kõige vähem.

3.6.2 Valmistamine

Lõpliku ratta tootmine koosnes kolmest osast: tooriku mõõtu lõikamine, ratta välja freesimine ja freesimise jäägi eemaldamine. Pikast 30x150 mm läbilõikega latist saeti välja 140 mm pikkused toorikud ning lõikamisjäätid lihviti.

Programmis Fusion 360 loodi freespingile G-kood, kus ajakulu vähendamiseks kasutati suurema alumiiniumi koguse eemaldamiseks 12 mm läbimõõduga freesi, seejärel kontuuride puhastamiseks 10 mm-st freesi ja lõpuks täpse mõõdu saamiseks 6 mm diameetriga freesi. 12 mm läbimõõduga frees võimaldas oma pikkuse tõttu materjali eemaldada kogu tooriku paksuses korraga. Teised freesid pidid seda tegema kahes osas. Vajalikud avad puuriti freespingis ning ümaruse saamiseks ratta sisu kinnitustel kasutati 5 mm raadiusega ümara otsaga freesi. Pink suutis ratta välja freesida umbes ühe tunniga. G-kood jättis 3 mm jagu materjali freesimata, et toorik saaks tugevalt pingis püsida.

Kolmandas osas tuli see materjal eemaldada. Kuna ratas oli liiga nõrk, et seda freespingi jaoks piisavalt tugevalt kruustangide vahele kinnitada, tuli teha selleks alus. Alus freesiti välja samasugusest toorikust ning sellele lisati keermestatud avad. Lisaks tehti 55 mm läbimõõduga plaat, mis surus ratta ühtlaselt aluse külge. Ratta toorikud kruviti tagurpidi koos plaadiga ja M3 poltidega aluse külge ning freesiti 12 mm läbimõõduga freesiga kinnitust ümbritsev jääk maha. Siis suruti ratta servad aluse külge ja eemaldati plaat. Seejärel freesiti jääk ratta keskosast. Pildid valmis ratastest ning tootmisest on välja toodud lisades 7–11.

Ratta tooriku mass enne freesimist oli 1,7 kg. Pikihammasteta rataste mass oli 74 g. Seega oli materjalikadu umbes 95,6%. Ühemeetrine tooriku latt maksis umbes 60 € ehk ühe ratta materjali hind oli umbes 8,4 €.

4 Tulemused

4.1 Ratta testimine testpingiga

Lõpliku disaini 3D-prinditud versioone ja endist rattaringi võrreldi kaldetestides. Kõval pinnasel suutsid uued rattad ületada 20-kraadise ja vana ratas 25-kraadise kallaku. Tulemused sarnanevad rattaringi testidega, kus ainult kitsas ratas ei saanud 25-kraadist kallakut ületatud. Pehme pinnase puhul ületasid kõik rattad minimaalse pinnase liigutamisega 20-kraadise kalde ning suurte raskustega 25-kraadise kallaku. 30-kraadise kaldega ei saanud ükski ratas hakkama. Võrreldes eelnevate katsetega suudavad uued pikemate hammastega rattad kaevumata ületada viis kraadi järsemat kallakut kui kitsas ratas.

Alumiiniumist rattaga tehti testpingil kestvustesti moodi katse. See läbis 3 km, et kinnitada vastavust nõudele 9.

4.2 Rataste testimine KuupKulguriga

KuupKulgurile pandi alla uued rattad ning kontrolliti nõuetele 2–8 vastavust Tartu Observatooriumi kosmosemissioonide simuleerimise keskuses (Joonis 4.1). Testides avastati, et keskmiste ja tagumiste rataste hambad puutuvad kokku kui kulgurit järsult keerata. Põhjuseks oli KuupKulguri vedrustus, mis loksus rohkem, kui 3D-mudelist näha oli. Seetõttu freesiti keskmiste rataste hambad 3,5 mm lühemaks, et rataste vahele jääks vähemalt 1 mm vahe. Pikihammastega rataste massiks sai 72 g.

Kulguri kaldeteste tehti piklikus liivakastis (Lisa 12), mille üks ots tõsteti üles. Kalde täpsuseks hinnati kaks kraadi. Katseid tehti 15-, 20- ja 25-kraadise kaldenurgaga. Kallaku külgsuunas libisemise katsetamiseks (Nõue 6) ei suudetud piisavalt korratavat keskkonda luua. Seetõttu pandi kulgur risti liivakasti. Kulguri edasi-tagasi liikumise ajal vaadeldi, kui kiiresti see kaldest alla vajus.



Joonis 4.1: KuupKulgur (esiots vasakul) uute ratastega Tartu Observatooriumi kosmosemissioonide simuleerimise keskuses

4.3 Rataste vastavus nõuetele

1. Alumiiniumsulami 6082 mehaanilised omadused paranevad temperatuuri vähenemisega [51]. Sulami omadused hakkavad arvestatavalt muutuma alles 170 °C juures [42]. Seega peavad rattad vastu temperatuurivahemikule -40 kuni +100 °C.

Sulami joonpaisumistegur on $\alpha = 23 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ [42], mis tähendab, et meetrine latt pikeneb 23 μm kui seda soojendada kraadi võrra. Rattad freesiti välja toatemperatuuril ehk suurim temperatuuri muutus saab olla $100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 80^\circ\text{C}$. Lõikeprotsessis eraldus küll palju soojust, kuid jahutusvedelik hoidis tooriku temperatuuri madalana. Rataste soojuspaisumise arvutamiseks kasutati valemit (4.1):

$$\Delta L = \beta \Delta T L, \quad (4.1)$$

kus

ΔL – pikkuse muutus [m],

β – joonpaisumitegur [$\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$],

ΔT – temperatuuri muutus [$^\circ\text{C}$] ja

L – esialgne pikkus [m].

Rataste suurim läbimõõt oli $L = 0,133$ m ehk rataste soojuspaisumine 100 °C juures oli:

$$\Delta L = 23\ \mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{°C}) \cdot 80\ \text{°C} \cdot 0,133\ \text{m} = 244,72\ \mu\text{m} \approx 0,24\ \text{mm}, \quad (4.2)$$

mis ei tohiks probleeme tekitada.

2. Kulgur läbis kuus meetrit 35 sekundiga ehk kiirusega $17\ \text{cm/s}$, mis on oluliselt suurem miinimumnõudest $3\ \text{cm/s}$.
3. Kulgur tegi ühe täisringi 11,4 sekundiga ehk keeras kiirusega $31,6$ kraadi/s. See on suurem kui 5 kraadi/s.
4. Kulgur suutis hästi liikuda üles 20 -kraadisest kallakust ning raskustega 25 -kraadisest kaldest. Seega ületati minimaalnõuet vähemalt 5 kraadi võrra.
5. Kulgur suutis edukalt 25 -kraadisest kallakust alla liikuda ilma märkimisväärse libisemiseta, ületades minimaalnõuet 5 kraadi võrra
6. Kulgur suudaks liikuda mööda nõutud 15 -kraadist kallakut, kuid libiseks natuke, mistõttu oleks sõitmisel vaja kõrgust vahetevahel korrigeerida.
7. Kulgur ületas $80\ \text{mm}$ kõrguse takistuse. Kõrgemat takistust ei testitud, kuna tekkis oht kulguri ümber kukkumiseks. Minimaalne nõutud takistus oli $30\ \text{mm}$.
8. Kulguri asetamisel pinnasele ei vajunud see piisavalt sügavale, et pinnas oleks puutunud rattaringi. Seetõttu loeti tulemuseks $0\ \text{mm}$, mis oli vähem kui lubatud $15\ \text{mm}$.
9. Ratas läbis nõutud $3\ \text{km}$ vigastusteta. Hammaste otstel esines kulumisjälgi.
10. Rataste suurim läbimõõt oli $133\ \text{mm}$, mis oli vähem kui $150\ \text{mm}$.
11. Rattaid oli võimalik valmistada Tartu Observatooriumis.

5 Tulemuste analüüs ja järeldused

Võrreldes endiste ratastega, läbis uute ratastega KuupKulgur kuus meetrit 3,5 s kiiremini ehk kiirus kasvas peaaegu 1,6 cm/s või 10%. Kiiruse kasv tulenes pikemate hammaste tõttu suurenenud diameetrist. Kasvas ka pööramise kiirus. Vanad rattad keerasid kiirusega 28,3 kraadi/s ehk uued olid 3,3 kraadi/s või 11,7% kiiremad. Kallakust üles ja alla liikumises parandasid uued rattad mõlemat tulemust 5 kraadi võrra, vastavalt 15 kraadi pealt 20-le ning 20 kraadilt 25-le. Piki kallakut liikumisel olid rattad sarnased. Mõlemate ratastega suutis kulgur ületada suurima testitud 80 mm takistuse. Uued rattad jäid hammastele kandma, kuid endised rattad vajusid kulguri pinnasele asetamisel lühemate hammaste tõttu mõne millimeetri sügavusele.

Üldjoones täitsid uued rattad oma eesmärgi. KuupKulgur suutis paremini liikuda järsakutel ning rataste mass vähenes ühe ratta kohta 60 g ehk uued rattad olid umbes 45% kergemad. Kokku tegi see KuupKulguri 360 g võrra kergemaks. Siiski oleks võimalik neid rattaid veel kergemaks teha, vähendades hammaste ja rattaringi paksust veelgi, kuni testide tulemusel hakkaksid rattad purunema. Rataste töökindluse säilitamiseks tuleks leida kesktee.

6 Kokkuvõte

Käesoleva töö käigus tehti testide tulemuste põhjal KuupKulgurile uued rattad, mis võimaldasid vanadest paremini kallakuid ületada ja vähendasid rataste massi 45%. Kulguri otstesse pandi 10 mm hammastega ja keskele 6,5 mm hammastega ning 5 mm pikihammastega rattad. Nii välditi erinevate rataste hammaste kokku puutumist ning vähendati kulguri külglisemist takistamata pööramist. Rattad valmistati Tartu Observatooriumi töökojas. Neid testiti KuupKulguriga Kuu pinnasele analoogsel materjalil, kus täideti kõik ratastele kehtestatud nõuded.

Lisaks võrreldi omavahel SolidWorks'is tehtud simulatsioone ja päriselu katseid. Nende tulemusena leiti, et kuigi simulatsioonid ei anna alati piisavalt täpseid väärtusi, et jätta päris katsed tegemata, saab neid esialgseteks võrdlusteks ja suurusjärkude leidmiseks ikkagi kasutada.

Tänuavaldused

Sooviksin tänada oma töö juhendajat Silvar Muru, kes aitas kaasa nõu ja jõuga ning rataste valmistamisega.

Lisaks oma õde keeleteoimetuse ja mehaanikateadmiste jagamise eest.

/ allkirjastatud digitaalselt /

Viited

- [1] ETIS, Common European Research Classification Scheme (CERCS), <https://www.etis.ee/Portal/Classifiers/Index/26?> 12.05.2025.
- [2] NASA, Cooperative Autonomous Distributed Robotic Exploration (CADRE), <https://www.nasa.gov/cooperative-autonomous-distributed-robotic-exploration-cadre/> 05.04.2025.
- [3] S. Quazi, „KuupKulgur, The Estonian Lunar Rover“, <https://tospexgroup.space/projects/kuupkulgur/> 27.03.2025.
- [4] T. P. Doyle, „NASA Ends VIPER Project, Continues Moon Exploration“, <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-ends-viper-project-continues-moon-exploration/> 05.04.2025.
- [5] M. Petrova, „Why there is a new global race to the moon“, *CNBC*, 2024, <https://www.cnbc.com/2024/01/20/why-there-is-a-new-global-race-to-the-moon-.html> 10.05.2025.
- [6] Astrobotic, „ASTROBOTIC CUBEROVER Payload User’s Guide“, 2024, https://www.astrobotic.com/wp-content/uploads/2024/01/Astrobotic_CubeRover-PUG_V2-2.pdf 04.04.2025.
- [7] IRIS, <https://irislunarover.space/> 15.05.2025.
- [8] KuupKulgur, <https://kuupkulgur.space/> 28.03.2025.
- [9] Astrobotic, „Astrobotic’s CubeRover Completes Successful Mobility Testing“, 2020, <https://www.astrobotic.com/astrobotics-cuberover-completes-successful-mobility-testing/> 15.05.2025.
- [10] „Explainer: Why are countries racing to the moon’s heavily cratered south pole?“, *Reuters*, 2023, <https://www.reuters.com/science/why-are-countries-racing-moons-heavily-cratered-south-pole-2023-08-23/> 30.03.2025.
- [11] S. Nelson, „Moon Race 2.0: Why so many nations and private companies are aiming for lunar landings“, *BBC*, 2024, <https://www.bbc.com/future/article/20240216-moon-race-20-why-so-many-nations-are-aiming-for-lunar-landings> 30.03.2025.
- [12] European Space Agency, „Europe is aiming for the Moon“, 2023, https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/Europe_is_aiming_for_the_Moon 30.03.2025.
- [13] ESTCube, <https://www.estcube.eu/> 28.03.2025.
- [14] Astrobotic, CubeRover, <https://www.astrobotic.com/lunar-delivery/rovers/cuberover/> 28.03.2025.

- [15] M.-L. Plats, „Teadlased ja tudengid hakkavad arendama esimest Eesti kuukulgurit“, 2023, <https://ut.ee/et/sisu/teadlased-ja-tudengid-hakkavad-arendama-esimest-est-kuukulgurit> 28.03.2025.
- [16] M. Bhardwaj, V. Bulsara, D. Kokan, S. Shariff, E. Svarverud ja R. Wirz, „Design of a pressurized lunar rover“, 1992, pp. 10–11, NASA-CR-192033.
- [17] C. M. Katzan ja J. L. Edwards, „Lunar dust transport and potential interactions with power system components“, 1991, pp. 1–3, NASA-CR-4404.
- [18] B. Climent, O. Torroba, R. González-Cinca, N. Ramachandran ja M. D. Griffin, „Heat storage and electricity generation in the Moon during the lunar night“, *Acta Astronautica*, 93, 2014, pp. 352–358, DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.07.024.
- [19] J. J. Zakrajsek, D. B. McKissock, J. M. Woytach, J. F. Zakrajsek, F. B. Oswald, K. J. McEntire, G. M. Hill, P. Abel, D. J. Eichenberg ja T. W. Goodnight, „Exploration Rover Concepts and Development Challenges“, *1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005, pp. 13–15, DOI: 10.2514/6.2005-2525.
- [20] K. Iizuka ja K. Inaba, „Slip Estimation Using Variation Data of Strain of the Chassis of Lunar Rovers Traveling on Loose Soil“, *Remote Sensing*, 15, 17, 2023, pp. 1–2, DOI: 10.3390/rs15174270.
- [21] W. Robinson-Smith, Spaceflight Now, „NASA cancels half-billion dollar water-ice-seeking VIPER Moon rover“, <https://spaceflightnow.com/2024/07/18/nasa-cancels-half-billion-dollar-water-ice-seeking-moon-rover/> 05.05.2025.
- [22] M. Pamer, „NASA’s Mini Rover Team Is Packed for Lunar Journey“, 2025, <https://www.nasa.gov/missions/tech-demonstration/cadre/nasas-mini-rover-team-is-packed-for-lunar-journey/> 05.05.2025.
- [23] NASA, VIPER In Depth, 2023, <https://science.nasa.gov/mission/viper/in-depth/> 05.04.2025.
- [24] NASA, VIPER Rover and Instruments, 2023, <https://science.nasa.gov/mission/viper/rover-and-instruments/> 05.05.2025.
- [25] NASA, Volatiles Investigating Polar Exploration Rover (Viper), <https://science.nasa.gov/image-detail/amf-grc-2021-c-00503/> 05.05.2025.
- [26] NASA, Mars Science Laboratory: Curiosity Rover, 2017, <https://science.nasa.gov/mission/msl-curiosity/> 06.04.2025.
- [27] NASA, Mars 2020: Perseverance Rover, 2017, <https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/> 06.04.2025.
- [28] NASA, Perseverance Rover Components, 2024, <https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/rover-components/> 06.04.2025.

- [29] A. Rankin, N. Patel, E. Graser, J.-K. F. Wang ja K. Rink, „Assessing Mars Curiosity Rover Wheel Damage“, 2022 *IEEE Aerospace Conference (AERO)*, 2022, pp. 1–19. DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843634.
- [30] phys.org, „Two rovers to roll on Mars again: Curiosity and Mars 2020“, 2019, <https://phys.org/news/2019-12-rovers-mars-curiosity.html> 18.05.2025.
- [31] SOLIDWORKS, The Solution for 3D CAD, Design and Product Development, 2025, <https://www.solidworks.com/> 19.04.2025.
- [32] Amazon, M2 x 250 mm Fully Threaded Rod 304 Stainless Steel Right Hand Thread Silver Tone, https://www.amazon.de/dp/B07DFKRZ47?ref=ppx_yo2ov_dt_b_fed_asin_title&th=1 20.04.2025.
- [33] Amazon, M2 x 50mm 304 Stainless Steel Phillips Round Head Screws Bolt 60pcs, https://www.amazon.de/-/en/Stainless-Steel-Phillips-Round-Screws/dp/B012TDJE3O?crd=2VYQUFDOVD7JQ&dib=eyJ2IjoiMSJ9.id86FhflrBpc3HCOjuFM5EeuLeaqT7vOCy0h9aXLgN5XhDUP9faOq5W-VVOetf4fkJmnGdMtbAOwGS1klh9syKp6Zhh_MpVDf_7a0ojtDEbaKI18ySu5acg8vPw-Ppi0rDq35fZVTMFHgsaK4cAyv8tJLYHoug25EvyyKNozsC9oPfAkL1D1plFF8tv71YTUXpFmUyHkExhwcFF7OGbGh_XukvLcFvcLL2aR1gXVyyyGP6l8fm6rYK_ZGYc-HPxqcZqO-H46SN7IA8Yz6BoYRZKD9P4P-Mpj8BkKrSze5wM.9-IXWJrI5Ez8n8zmXnURC8VILXFy4w3IM3kLPpqsUis&dib_tag=se&keywords=m2+50+mm&nsdOptOutParam=true&qid=1734099944&srefix=m2+50+mm%2Caps%2C138&sr=8-5 20.04.2025.
- [34] Amazon, 10 Pieces Ball Head Holder Tie Rod End M2 Ball Joint Linkage for RC Crawler Car RC Link Ball Head Holder (Blue) Accessories for Model Cars, https://www.amazon.de/-/en/Pieces-Holder-Linkage-Crawler-Accessories/dp/B0B63KQ69J/257-3335918-9809552?pd_rd_w=DExtj&content-id=amzn1.sym.8e106f69-d570-43b7-93ab-939542784ec5:amzn1.symc.15cbde64-36a4-47c6-b315-5d1a0d7227bc&pf_rd_p=8e106f69-d570-43b7-93ab-939542784ec5&pf_rd_r=7N41H9PFMKJ2K2J2AXA6&pd_rd_wg=SlBX9&pd_rd_r=ec857359-8bc2-4030-ad0b-86c99df08d38&pd_rd_i=B0B63KQ69J&psc=1 20.04.2025.
- [35] H. Nakashima, H. Fujii, A. Oida, M. Momozu, H. Kanamori, S. Aoki, T. Yokoyama, H. Shimizu, J. Miyasaka ja K. Ohdoi, „Discrete element method analysis of single wheel performance for a small lunar rover on sloped terrain“, *Journal of Terramechanics*, 47, 5, 2010, pp. 307–321, DOI: 10.1016/j.jterra.2010.04.001.
- [36] Bambu Lab, Bambu Lab A1 mini, <https://bambulab.com/en-us/a1-mini> 17.05.2025.
- [37] CORMAK, BS128HDRC 230V Band Saw, <https://www.cormak.pl/gb/gravitational-feed-band-saws/1860-bs128hdrc-230v-metal-band-saw.html> 20.04.2025.
- [38] SCHEPPACH DIRECT, Scheppach BTS900 6" 370W Brushless Electric Belt & Disc Sander 230V, <https://scheppachdirect.com/product/bts900-belt-and-disc-sander/> 07.05.2025.

- [39] Tormach, 1100MX CNC Mill, <https://tormach.com/machines/mills/1100mx.html> 20.04.2025.
- [40] Autodesk, Autodesk Fusion, <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview> 07.05.2025.
- [41] Toolsource.com, JET BD-920W BENCH LATHE, https://www.toolsource.com/engine-stands-c-1321_139_151_152/jet-bd920w-bench-lathe-p-167841.html 07.05.2025.
- [42] MakeItFrom, 6082-T651 Aluminum, <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6082-T651-Aluminum> 14.05.2025.
- [43] Interstate Metal, Inc., Guide to 360 Brass | 360 Brass Properties, 2021, <https://www.interstatemetal.com/blog/360-brass-guide/> 13.05.2025.
- [44] G. Heiken, D. Vaniman ja B. M. French, „Lunar Sourcebook: A User’s Guide to the Moon“, Cambridge University Press, 1991, pp. 494–500.
- [45] OBS Studio, <https://obsproject.com/> 10.04.2025.
- [46] nginx, <https://nginx.org/en/> 10.04.2025.
- [47] dodgepong, OBS Forums, „How to set up your own private RTMP server using nginx“, 2014, <https://obsproject.com/forum/resources/how-to-set-up-your-own-private-rtmp-server-using-nginx.50/> 10.04.2025.
- [48] Tailscale, <https://tailscale.com> 10.04.2025.
- [49] Xiaomi, Xiaomi Smart Plug 2 Wi Fi, <https://www.mi.com/global/product/xiaomi-smart-plug-2-wi-fi/> 10.04.2025.
- [50] NFPshop, 37mm Metal Gear Motor | Model NFP-GM37-545, 2025, <https://nfpshop.com/product/37mm-metal-gear-motor-model-nfp-gm37-545-en> 19.04.2025.
- [51] I. Westermann, O. S. Hopperstad ja M. Langseth, „Mechanical Behaviour of an AA6082 Aluminium Alloy at Low Temperatures“, *ResearchGate*, 2025, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.794-796.532.

Lisad

Lisa 1: KuupKulguri rataste nõuded

KuupKulgur wheel requirements

DOCUMENT CHANGE RECORD			
Issue	Revision	Date	Brief description
1	0	2024.01.08	V1.0

Table 1: Document change record

The wording of statements in this requirements specification determines the disposition of requirements:

- "SHALL" and "SHALL NOT" are used to indicate a mandatory requirement.
- "SHOULD" and "SHOULD NOT" are used to indicate a recommendation, which is not mandatory.
- "MAY" and "NEED NOT" indicate permission or an option.
- "WILL" indicates a statement of fact or intention.

Abbreviation	Description
FUN	Functional requirement
DES	Design requirement
ENV	Environmental requirement

Table 2: Requirement Types

Abbreviation	Description
T	Test
A	Analysis
ROD	Review-of-design
I	Inspection

Table 3: Types of Verification Methods

The wheels must fulfil the following systems level requirements:

TN2-FUN-0302	The rover shall be able to operate over a temperature range of -25°C to 60°C. It shall survive non-operating in temperature ranges of -40°C to 100°C.	A, T	N/A	
The rover must support the same temperature ranges, both operating and non-operating, as the payloads.				

TN2-FUN-0400	The rover speed shall be higher than 3 cm/s.	A, T		
The rover shall move on Lunar analog terrain with dedicated speed.				

TN2-FUN-0401	The rover should have a stationary turning rate higher than 5 degrees/s.	A, T		
The rover should be able to turn with dedicated rate at stationary position.				

TN2-FUN-0402	The rover shall be able to climb upwards of at least 15 degrees slope.	A, T		
The wheel's grip and centre of gravity shall support the rover to climb upwards of modest inclination without getting stuck.				

TN2-FUN-0403	The rover shall be able to drive downwards of at least 20 degrees slope.	A, T		
The wheel's grip and centre of gravity shall support the rover to drive downwards of modest inclination without falling over.				

TN2-FUN-0404	The rover shall be able to drive forward with at least 15 degrees side tilt.	A, T		
The suspension system and centre of gravity shall allow the rover to drive forward with modest side tilt.				

TN2-FUN-0405	The rover shall be able to climb over at least 30 mm high obstacles.	A, T		
The wheel design and suspension system shall enable the rover to climb over modest obstacles without getting stuck or fall over.				

TN2-FUN-0406	The rover shall be able to travel at least 2 km.	A, T		
The rover shall move the minimum distance without significant degradation.				

TN2-FUN-0407	The rover should not sink in more than 15 mm while stationary.	A, T		
The rover's wheel design should prevent the rover from sinking too deep into the Lunar surface.				

TN2-ENV-0502	The rover shall survive thermal conduction with the Lunar surface.	ROD, A, T		
The rover wheels and suspension system shall mitigate thermal fluctuation or gradient.				

TN2-ENV-0503	The rover materials shall be chosen to mitigate galvanic corrosion.	ROD, T		
The rover material shall be chosen in a way to mitigate corrosion and cold welding due to materials' different thermodynamic activities.				

TN2-ENV-0504	The rover materials shall be chosen to withstand the near vacuum of space.	ROD		
The rover material shall be chosen in a way to withstand near vacuum.				

TN2-ENV-2201	The rover shall survive the vibration environment of the launch.	ROD, A, T		
The rover system shall be designed to withstand the vibration profiles of all the ESA and NASA accepted launch vehicles.				

TN2-FUN-2003	The rover system chassis and wheel shall be able to carry the dedicated weight without significant performance drop.	ROD, T		
Due to different payload configurations the final weight of the rover system shall not determine the rover performance.				

TN2-FUN-2004	The factors of safety to be used for dimensioning of mechanical items shall be clearly reported in the documentation. ECSS-E-ST-32-10 and ECSS-E-ST-32-02 shall be used as reference.	ROD		
To mitigate any mismatched tolerance incompatibilities.				

TN2-DES-2000	The rover system should use only Torx head screws.	ROD		
To mitigate any problems with achieving rated screw torques.				

Wheels and suspension shall fulfil the following requirements:

TN2-FUN-2100	The wheels outer diameter should be equal to or less than 150 mm.	ROD		
To stay in the dedicated volume size.				

TN2-FUN-2101	The wheel should be made only out of space compatible materials listed in ECCS-E-ST-32-10.	ROD, I		
To mitigate any issues with compatibility.				

TN2-FUN-2102	The wheels should have enough grip to fulfil the transferability requirements.	ROD, A, T	TN2-FUN-0400 TN2-FUN-0401 TN2-FUN-0402 TN2-FUN-0403 TN2-FUN-0404 TN2-FUN-0405 TN2-FUN-0406 TN2-FUN-0407	
To allow the rover to achieve listed performance.				

TN2-FUN-2103	The wheel should be durable for at least 3 km of drive.	ROD, T	TN2-FUN-0406	
To survive minimum distance according to TN2-FUN-0406.				

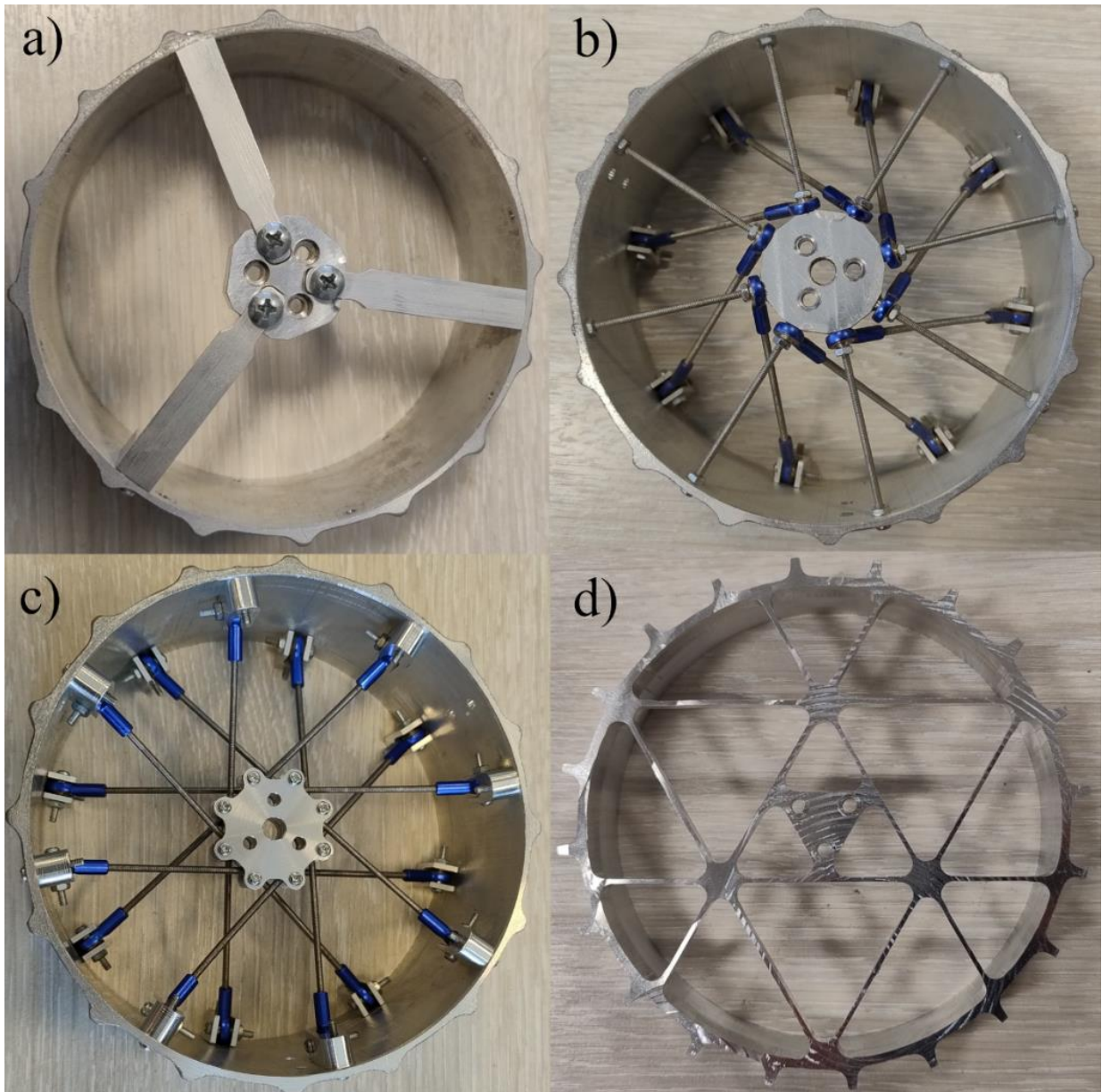
TN2-FUN-2104	The wheels and suspension system shall be thermally suitable to prevent cold welding on moveable joints.			
To mitigate cold welding due to relatively low ambient pressure.				

TN2-FUN-2105	The wheels and suspension system shall be able to carry the overall weight of the system.		TN2-PHY-0001 TN2-FUN-2003	
The wheels and suspension system should have sufficient stiffness to handle maximum weight according to TN2-PHY-0001.				

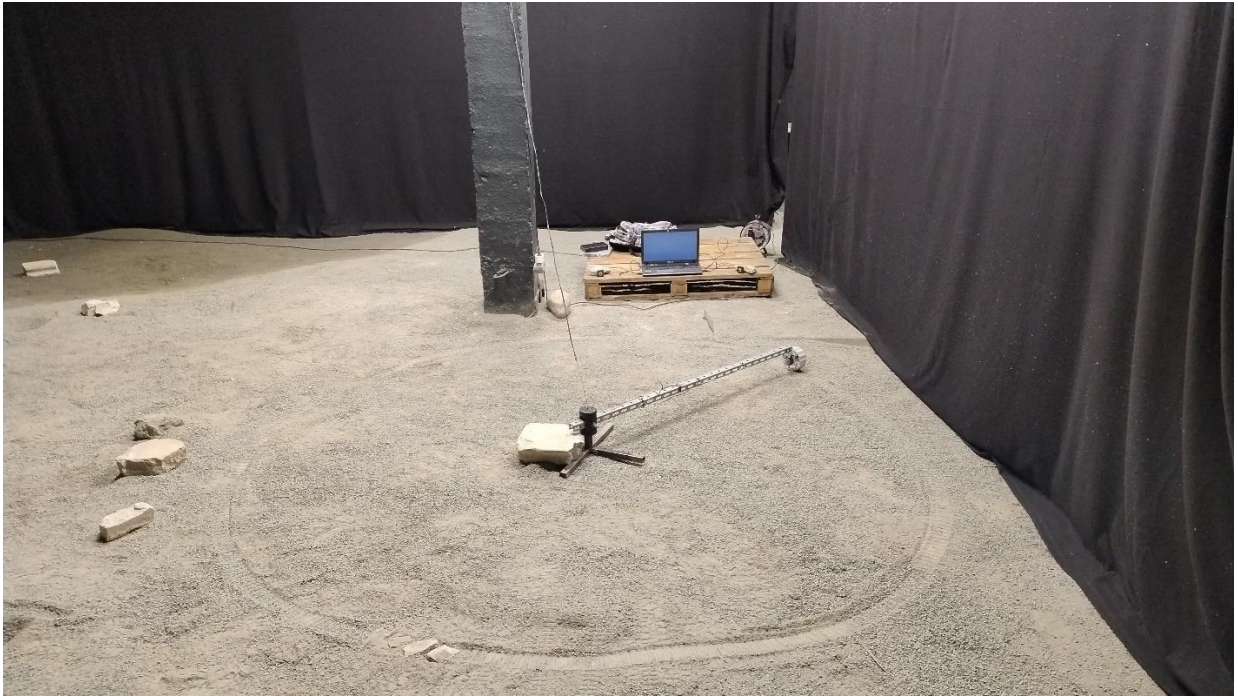
TN2-DES-2500	The rover system and deployment system shall follow the ISO 286 standard for any attachment holes.	ROD		
To mitigate any mismatched tolerances.				

TN2-DES-2501	The rover system and deployment system shall follow the DIN ISO 2768 for any general tolerances.	ROD		
To mitigate any mismatched tolerances.				

Lisa 2. Rataste sisud: (a) esialgne, (b) esimene kodaratega, (c) teine kodaratega, (d) monoliitne



Lisa 3. Kestvustest



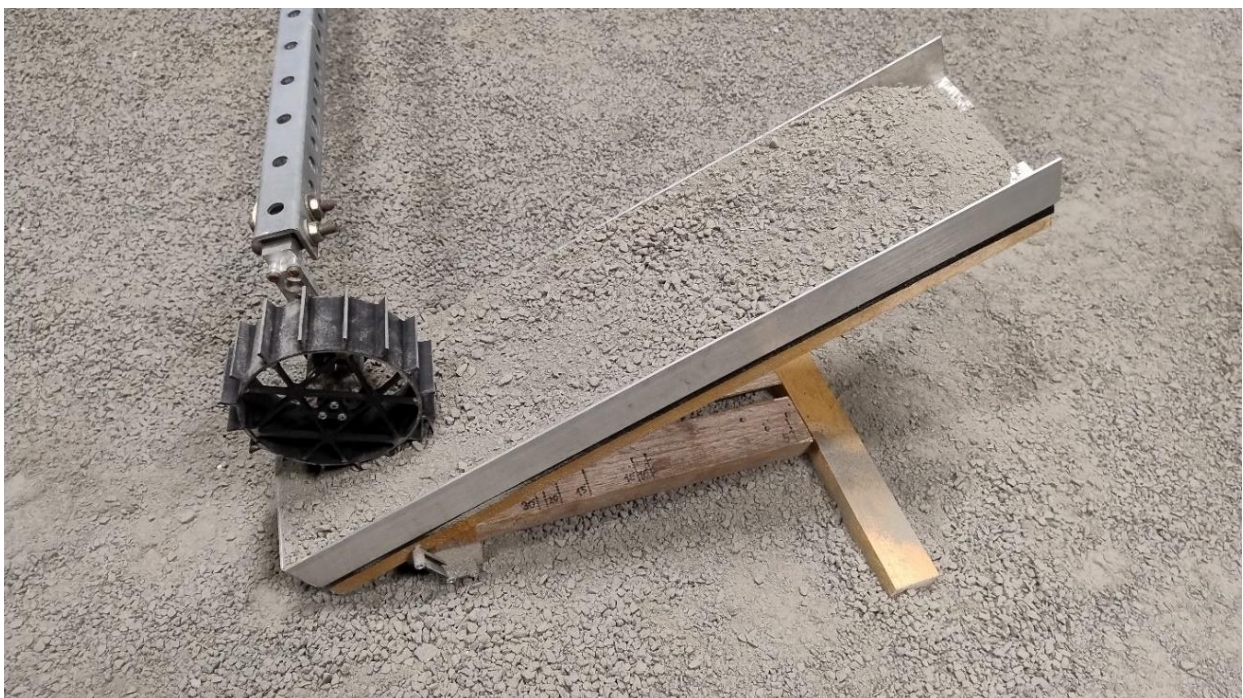
Lisa 4. Väändetest



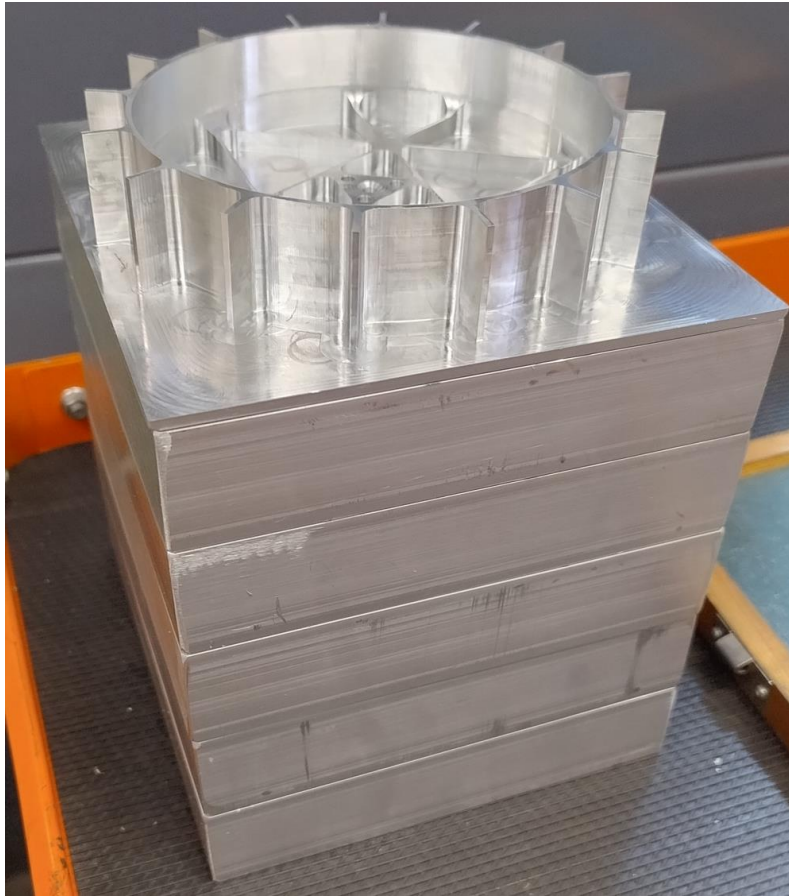
Lisa 5. Paindetest



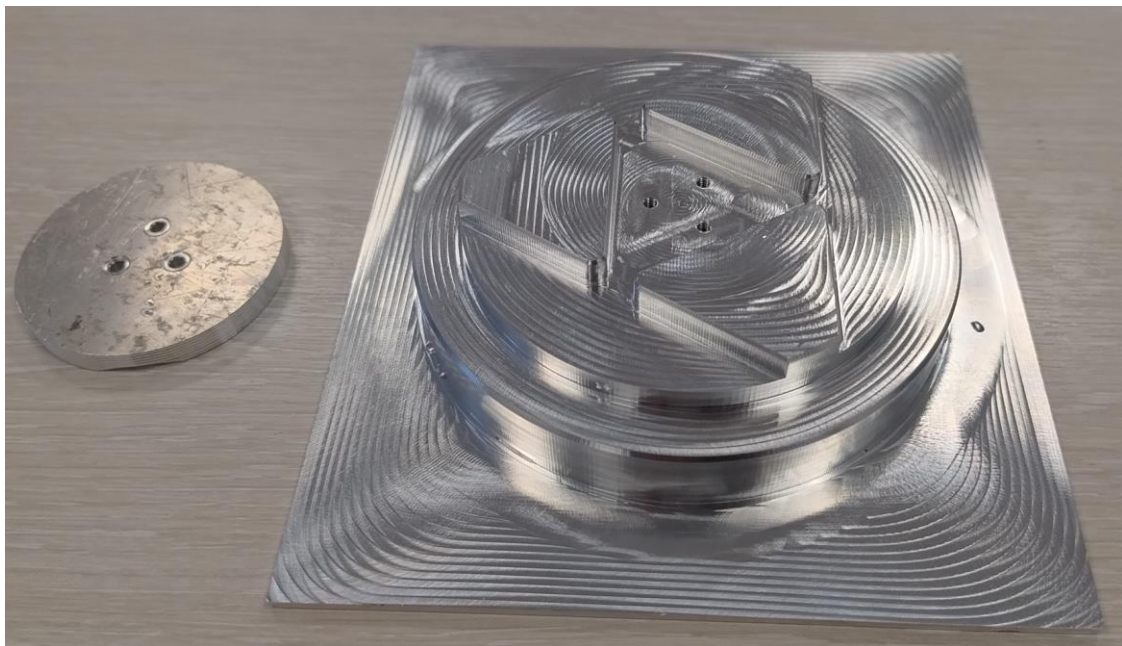
Lisa 6. Kaldetest pehme pinnasega



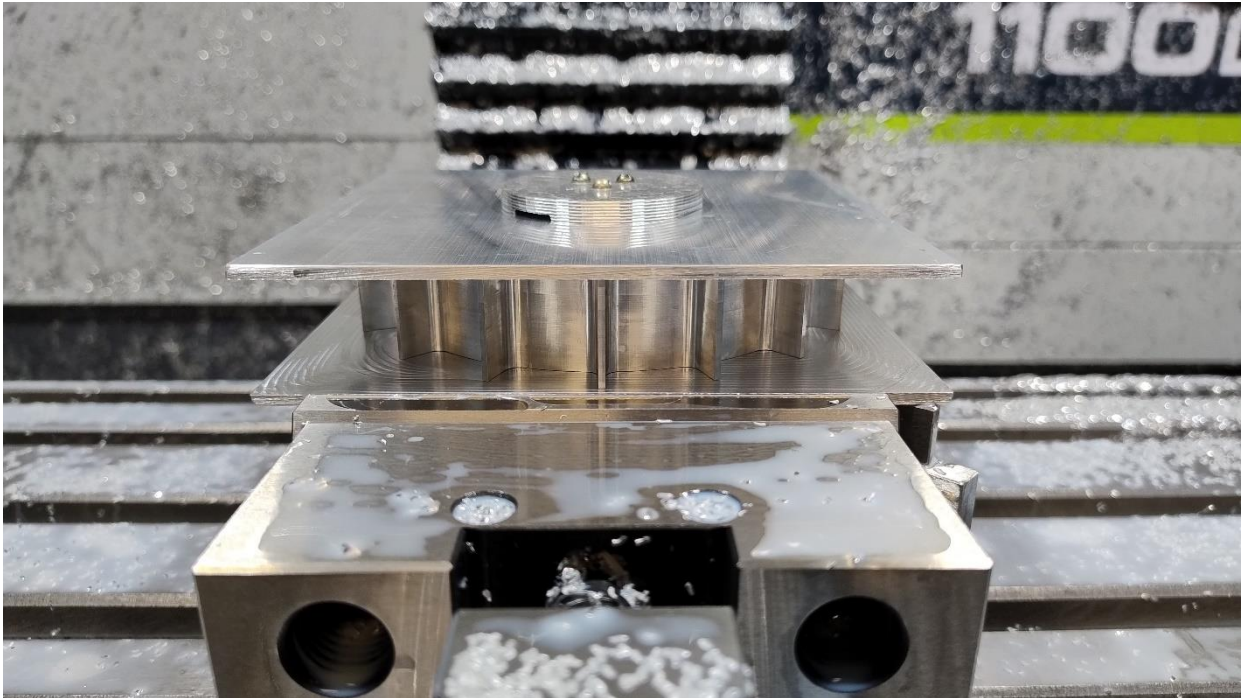
Lisa 7. Freesimisjäägiga ratas toorikute peal



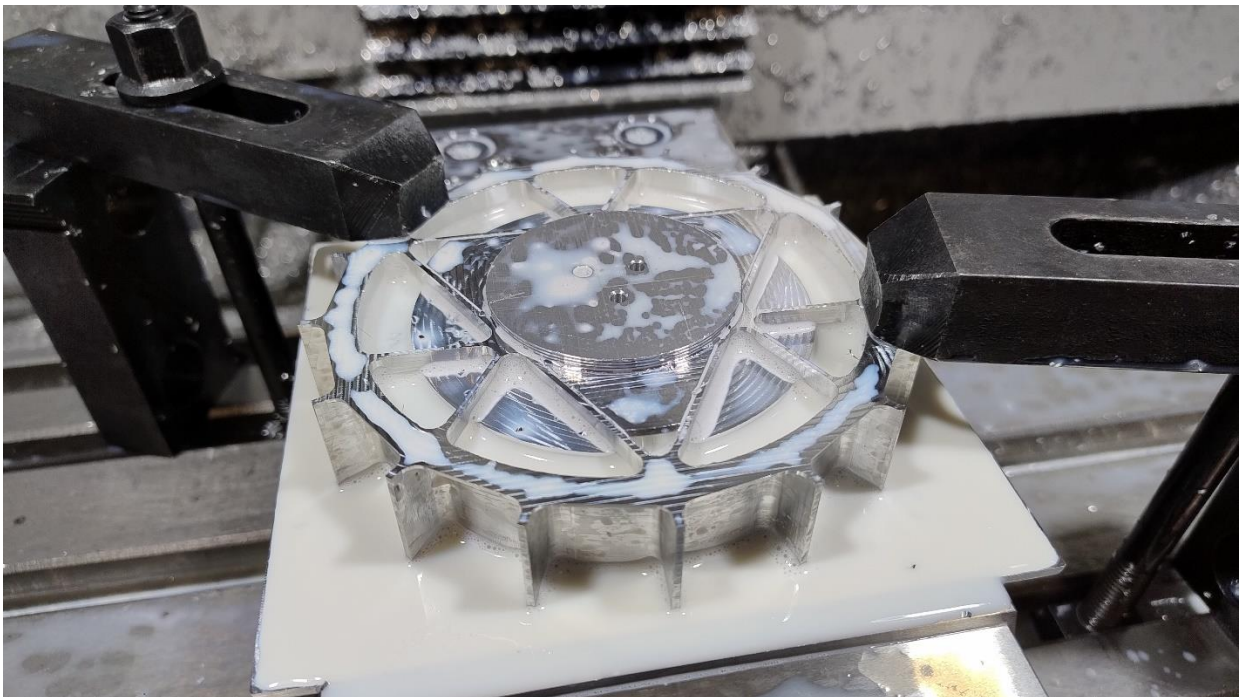
Lisa 8. Alus ja plaat ratta kinnitamiseks, et eemaldada freesimisjääk



Lisa 9. Kinnitus freesimisjäägi välimise osa eemaldamiseks



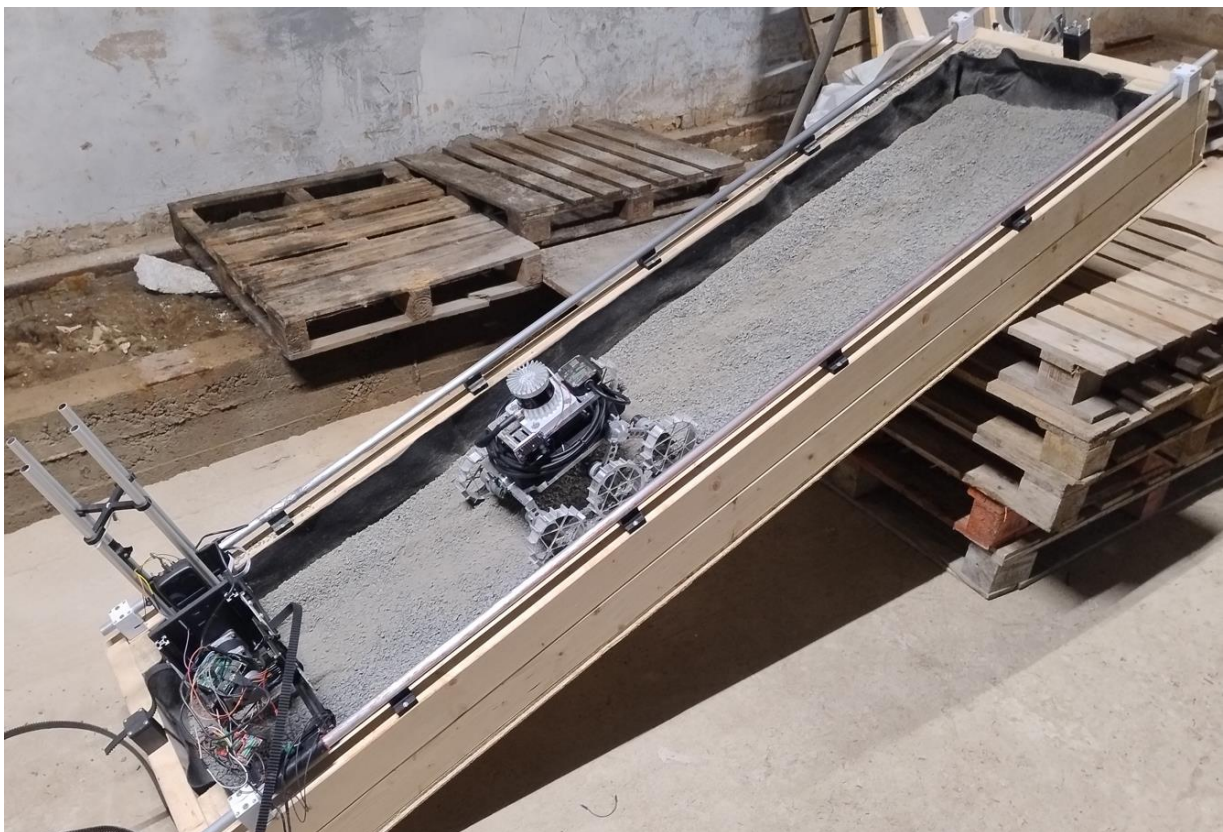
Lisa 10. Kinnitus freesimisjäägi sisemise osa eemaldamiseks



Lisa 11. Uued rattad



Lisa 12. Uute rataste testimine KuupKulguriga liivakastis



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Sander Miller

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

“KuupKulguri rataste disain ja valmistamine”

mille juhendaja on Silvar Muru

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Sander Miller

20.05.2025