

**Mart Suursoo**

# **TOYOTA POWERSPLIT KÄIGUKASTI 3D PRINDITUD MUDELI PROJEKTEERIMINE**

**LÕPUTÖÖ**

**Õppeaines: AUTOTEHNIKA**

**Tehnikainstituut**

**Õpperühm: AT 2019**

**Juhendaja: lektor Kaido Hiieleek**

**Tallinn 2023**

## **Autori deklaratsioon ja lihtlitsents**

Mina, Mart Suursoo, sünnikuupäev: 17.01.1999, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt. Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Toyota powersplit käiguksti 3D prinditud mudeli projekteerimine“:

- reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
- elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
- kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist;
- ning kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigus.

Autor: Mart Suursoo

/allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas/

## **Juhendaja kinnitus**

Lõputöö vastab lõputöö ja kirjalike tööde vormistamise juhendile. Lubada lõputöö kaitsmisele instituudi direktori korraldusega.

Juhendaja:

1. Kaido Hiieleek, lektor

/allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas/

# SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1. TEEMA AKTUAALSUS .....	6
1.1. Eesmärk .....	6
2. AUTO JA KÄIGUKASTI MUDEL .....	7
2.1. Auto Lexus RX450h.....	7
2.2. Hübriid käigukasti P313 elektrimootorid .....	9
3. HÜBRIID KÄIGUKASTI P313 TÖÖPÕHIMÕTE .....	12
3.1. Jõudude jagamise mehhanism „power split device“ .....	12
3.2. Kinemaatiline skeem .....	14
3.3. Sõidu režiimid.....	16
3.3.1. READY ehk sõiduks valmis .....	16
3.3.2. Kohalt võtt.....	17
3.3.3. Sisepõlemismootori käivitamine .....	17
3.3.4. Püsikiirusega liikumine .....	17
3.3.5. Pidurdamine .....	17
3.3.6. Tagurpidi käiguga sõitmine.....	17
4. 3D MUDELI PROJEKTEERIMINE .....	18
4.1. Projekteerimise algus.....	18
4.2. Käigukasti P313 lahti võtmine .....	18
4.3. CAD mudeli projekteerimise tarkvara.....	19
4.4. Hammasrataste loomine .....	19
4.4.1. Evolventi joonestamine .....	21
4.5. Mõõtmised peale esimest väljaprinti .....	22
4.6. 3D mudel .....	25
4.6.1. PlanetaarülekanDED.....	25
4.6.2. Mootorgeneraatorid ja sisepõlemismootor .....	27
4.6.3. Mudeli alus.....	28

4.6.4. Laagrid ja standardid .....	28
5. ÕPPESTENDI EDASIARENDUS .....	29
6. MAJANDUSLIKUD ARVUTUSED .....	33
KOKKUVÕTTE .....	35
7. SUMMARY .....	36
VIIDATUD ALLIKAD.....	37
LISAD .....	38

## SISSEJUHATUS

Autotehnika erialal teise kursuse kevad semestril oli selline aine nagu „Hübriid- ja elektriajamiga auto“, kus oli autori esimene kokkupuude hübriidajamiga. Aine raames olid hübriid käigukasti uurimiseks ja tööpõhimõtte arusaamiseks väljaprintitud skeemid. Kõrgkoolis oli lahti lõigatud korpusega käigukast ning lisaks sai teha ka testisõitu kõrgkooli õppeautoga dūnostendil. Diagnostika arvutiga oli võimalik auto elektroonikast salvestada erinevaid parameetreid, et nende järgi saada aru hübriidajami tööpõhimõttest. Sellise mahuka koduse töö tegemine võttis palju aega, kuna oli raske aru saada käigukasti tööpõhimõttest lihtsalt mõõteväärtuste järgi. Antud juhul oleks suureks abiks 3D mudel, mille peal saaks katsetada, proovida erinevaid ülekannete kombinatsioone, et oma silmadega näha, kuidas ja mis seal käigukasti sees pöörleb. Antud lõputöös projekteeritakse Lexus hübriid käigukastist P313 3D mudel, mida oleks tulevikus võimalik väljaprintida 3D printeriga ja koostada, et järgmiste hübriid käigukasti loengute käigus seda mudelit kasutada.

# 1. TEEMA AKTUAALSUS

Novembris 2022 pakkus Euroopa komisjon uued EURO 7 autode regulatsiooni. Selle eesmärk on toetada elektrifitseerimist. [1]

Vaadates transpordiameti sõidukite statistikat on hetke seisuga Eestis umbes 31 000 hübriidautosid. Elektrisõidukeid on palju vähem. Umbes 4000 sõidukit üle terve Eesti [2]. Tavapärase inimese jaoks jääb ikka suureks probleemiks elektriautode pikk laadimisprotsess ning väike kogus laadimiskohti. Seega hübriidsõiduk on aktuaalne tänapäeval, kombineerides fossiilkütust ja elektrit.

Autotootjad pakuvad tänapäeval aina rohkem hübriidsõidukeid. Kõrgkooli autotehnika erialas hakati õpetama sõidukite hübriid ja elektriajameid. Tänapäevane noor tudeng tavaliselt ei ole üldse või on vähesel määral hübriidsõidukitega kokku puutunud. Saab väita, et hübriidajami tööpõhimõttest teab väike osa tudengitest, seega ka loengutel on raske midagi täiesti uut õppida. Uute asjade õppimisel kõige paremini aitavad praktilised tunnid. Sealhulgas ka õppetendid, mida saab katsetada õppekäigus aitavad teooriat seedida.

Saab teha hübriidajami õppemudeli, mis aitab tudengitele antud ajami tööpõhimõtte endale selgeks teha.

## 1.1. Eesmärk

Antud lõputöö eesmärk on luua hübriid käigukastist 3D prinditud mudel, mis aitaks Tallinna Tehnikakõrgkoolis õppeaine „Hübriid-ja elektriajamiga sõidukid“ raames õppivatele tudengitele selgeks teha, esmapilgul keerulise ehitusega tunduva hübriid käigukasti Toyota näitel. Valmistatavas mudelis olevad hammasrattad peavad vabalt liikuma, nagu ka päris käigukastis. Lisaks mudeli edasi arendamiseks saab külge panna elektrimootorid, mille ülesandeks on simuleerida käigukasti erinevaid töörežiime, ajades ringi võlle ja hammasrattaid nagu see toimib päris käigukastis. Käigukasti töörežiimid on kirjeldatud Toyota tehase juhendis TechDoc.

## 2. AUTO JA KÄIGUKASTI MUDEL

Mudeli loomise aluseks oli võetud Lexus RX450h hübriid käigukast. Antud valik oli tehtud seetõttu, et Tehnikakõrgkoolis on olemas lahti lõigatud korpusega käigukast. Samuti on ka õppevahend, millega saab dūnostendil salvestada erinevad parameetrid nagu elektri mootorite pöörded ja momendid, sisepõlemismootori pöörded jpm. Neid andmeid saab kasutada, et luua simulatsioon prinditud mudelile.

### 2.1. Auto Lexus RX450h

Nagu oli juba eelnevalt mainitud, käigukasti mudel tehakse Lexus RX450h automudeli hübriidkäigukasti järgi. Antud keretüübiga sõidukeid toodeti Jaapani tehastes alates 2008 aastast kuni 2015 aastani. Nende aastate jooksul toimus mudeli värskendus, niinimetatud „facelift“. Suurematest muudatustest on uuemale versioonile lisatud tagasilda MGR elektrimootor, mis ajab ringi ainult tagasilda. Seega sõiduk on nelikveoline, kuid samas sellel puudub mehaaniline ülekanne esi- ja tagasildade vahel kardaaani näol.



Pilt 1. Lexus RX450h

Käesolevas lõputöös kasutatud auto on varustatud 2GR-FXE V6 ottomootoriga töömahuga 3456 cm<sup>3</sup> ja võimsusega 183kW 6000 p/min. Maksimaalne moment 317Nm 4800 p/min juures. Tagasild on varustatud eraldi MGR mootor-generaatoriga, mis toodab 50kW võimsust ja 139Nm momenti. Auto käigukast on varustatud kahe elektrimootoriga. Üks nendest on MG2 mis veab esisilla rattaid. MG1 mootor-generaator töötab sisepõlemismootori starterina ja generaatorina. All tabelites on toodud sisepõlemismootori ja tagasilla elektrimootori karakteristikud tabeli kujul (Tabel 1).

Tabel 1. Sisepõlemismootori karakteristikud

Jõuallikas	Sisepõlemismootor
Nimetus	2GR-FXE
Tüüp	V6 Ottomootor
Võimsus (p/min)	183 kW (6000)
Moment (p/min)	317 Nm (4800)

Teises tabelis tuuakse välja tagasilla elektrimootori MGR karakteristikud. MGR lühend tuleb sõnadest «mootor generator rear» (mootor generaator tagumine). Harjadeta püsिमagnetitega elektrimootor. (Tabel 2)



Tabel 2. Tagasilla mootor-generaatori karakteristikud

Jõuallikas	Mootor generaator tagumine (MGR)
Tüüp	Püsimagnetiga elektrimootor
Nimetus	Q211
Funktsioon	Genereerib voolu, veab tagarattaid
Maksimaalne süsteemi pinge	Alalispinge DC 650 V
Maksimaalne võimsus	50 kW
Maksimaalne moment	139 Nm
Jahutamise tüüp	Õhkjahutamine

Kolmandas tabelis saab näha P313 käigukasti lõpp ülekandearvud. (Tabel 3)

Tabel 3. Käigukasti lõppülekande arvud.

Käigukast	P313
Ülekande arv	Ette 3,137
	Taha 3,137

## 2.2. Hübriidkäigukasti P313 elektrimootorid

Selles peatükis tuuakse välja olulised karakteristikud auto hübriidkäigukastist, mis sai antud lõputöö 3D mudeli prototüübiks. Antud käigukast on koos mootoriga esiveolise auto konstruktsiooniga, kus mõlemad on paigutatud risti mootoriruumis. Käigukast sisaldab endas 2 elektrimootorit. Esimene elektrimootor MG1 ehk mootor generaator 1 on seal selleks, et genereerida voolu teiste mootor generaatorite jaoks ja veojõuaku laadimiseks, ning töötab veel bensiinimootori starterina.

Voolu genereeritakse kahel viisil. Peamine tuleneb sise põlemismootori töötamisest, kuna MG1 mootor-generaator on viimasega otseselt seotud hammasrataste kaudu ja erinevate režiimide ja

vajaduste puhul genereerib voolu. Teine variant kuidas voolu genereeritakse on läbi auto pidurdamise. Pidurdamise ajal kasutatakse rataste pöörlemist mootor-generaatorite pöörlemiseks, seega viimased hakkavad elektrienergiat genereerima, millega laetakse veojõuakut.

Teine mootor-generaator järjestuses on nimega MG2. Selle peamine ülesanne on vedada esisilla rattaid. Antud mootor on otseselt läbi planetaarülekanne hammasrataste seotud esisilla diferentsiaaliga. Sisepõlemismootoriga otsene ühendus, nagu ka MG1 - puudub. MG1 ja MG2 mootor-generaatorite püsिमagnetite paketid on ühe läbimõõduga, kuid MG2 on magnetite pakett laiem. Tehasepoolses juhendis MG1 võimuse ja momendi näidud puuduvad. Saab järeldada, et see tuleneb sellest, et see ei ole mõeldud rataste vedamiseks.

Mõlemate mootor-generaatorite maksimaalne alalispinge on 650 V. Muidu Toyota ja Lexus mudelites kasutakse hübriidsõidukites nikkel-metall veojõu akusid, mille nimipinge on keskmiselt 288 V. Sellist kõrgemat pinget 650 V saavutatakse nii nimetataval invertori „boost“ režiimis ja kõik kolm MG1, MG2 ja MGR mootor-generaatorit saavad töötada pingete vahemikus 288 V kuni 650 V.

Alumises tabelis toodud kõik MG1 ja MG2 mootor-generaatorite karakteristikud (Tabel 4).

Tabel 4. MG1 ja MG2 karakteristikud.

Jõuallikas	Mootor-generaator 1 (MG1)	Mootor-generaator 2 (MG2)
Tüüp	Püsimagnetiga elektrimootor	Püsimagnetiga elektrimootor
Asuvad	Käigukastis P313	Käigukastis P313
Funktsioon	Genereerib voolu, käivitab sisepõlemismootorit	Genereerib voolu, veab esirattaid
Maksimaalne süsteemi pinge	Alalispinge (DC) 650V	Alalispinge (DC) 650 V
Maksimaalne võimsus	-	123 kW
Maksimaalne moment	-	335 Nm
Jahutamise tüüp	Õlijahutus	Õlijahutus

### **3. HÜBRIIDKÄIGUKASTI P313 TÖÖPÕHIMÕTE**

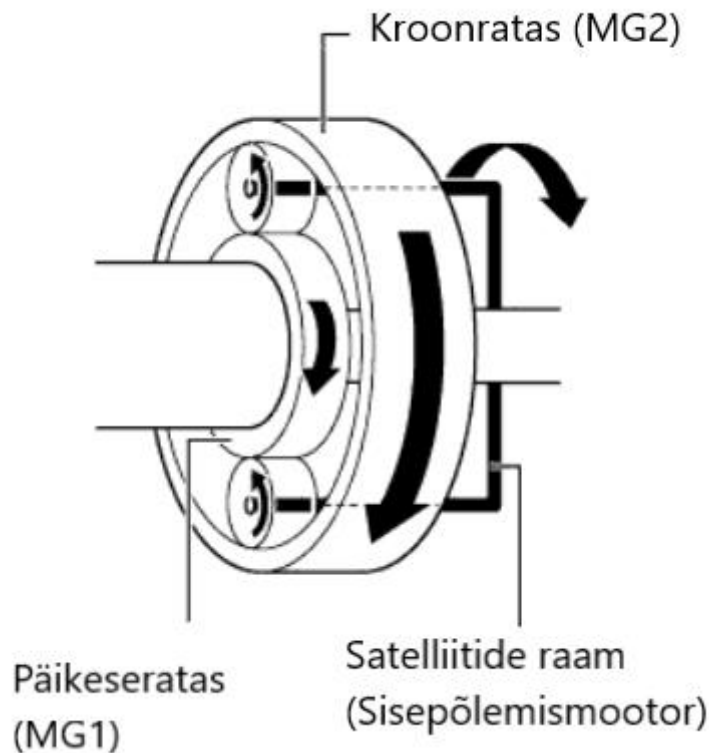
#### **3.1. Jõudude jagamise mehhanism „power split device“**

Eelnevalt olid mainitud uuritava käigukasti elektrimootoreid. Selles peatükis tuuakse välja nende tööpõhimõte.

P313 käigukast sisaldab endas Toyota tehase poolt loodud ülekande lahendust, mille nimeks on „Power split device“. Sellest otsetõlkest on järeldatav, et selle mehhanismi juures toimub jõudude jagamine. Erinevate jõudude all mõeldakse just sisepõlemismootori ja kahe MG1 ja MG2 mootor-generaatorite koostööd. Selline lahendus võimaldab kasutada erinevaid jõuallikaid ühes korpuses, kas voolu genereerimiseks või auto edasi vedamiseks ja seda kõike üheaegselt. [3]

Antud „power split device“ lahendus esineb suuremas osas Lexus hübriidsõidukites ja sõltumata auto mudelist ja selle käigukastist, tööpõhimõtte jääb seal üheks ja samaks. [3]

Jõudude jagamise mehhanism koosneb põhimõtteliselt ühest planetaarülekandest, kus selle elemendid ehk hammasrattad on erinevate jõuallikate vahel jagatud, nagu sisepõlemismootor, MG1 ja MG2 mootor-generaatorid. All on lihtsustatud pilt „power split device“ osade jagamisest (Pilt 2). [1]



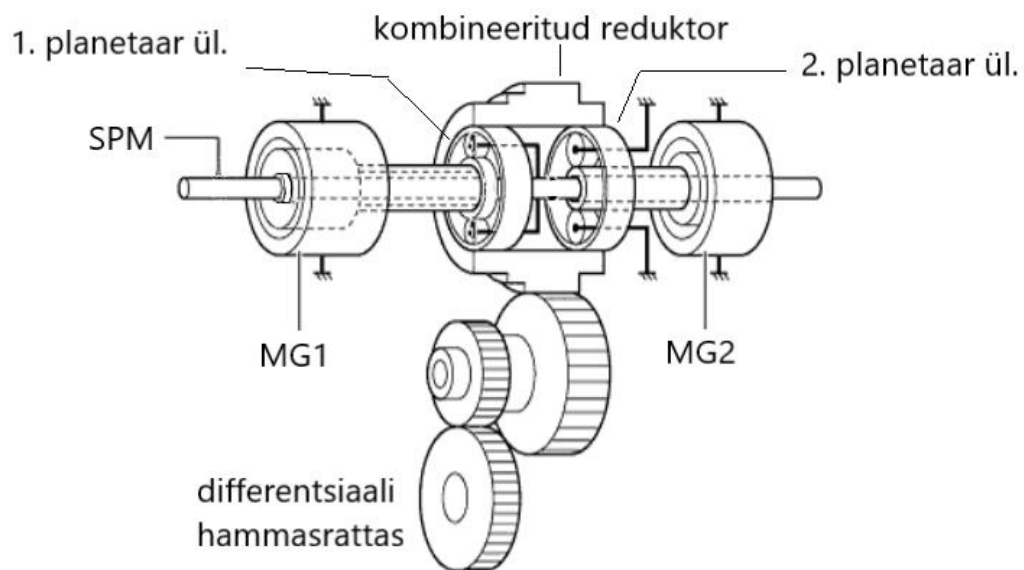
Pilt 2. „Power split“ mehhanismi osade jagamine

Pildi pealt on näha, kuidas MG1, MG2 mootorite ja sisepõlemismootori vahel on jagatud planetaarülekanne osad. Keskmine päikeseratas kuulub MG1 mootor-generaatorile. Sisepõlemismootori võlliga on otseselt seotud satelliitide raam. Satelliidid on aga seotud raamiga. Viimane ja suurim planetaarülekanne osa ehk kroonratas on MG2 mootoriga veetav. Planetaarülekanne sõltub nende erinevate hammasrataste liikumissuunast ja pöörlemise kiirusest. [3]

Seega uuritav P313 on variaator tüüpi käigukast. Variaatorkäigukasti ingliskeelne lühend on CVT - Continuously Variable Transmission. Otsetõlkes tähendab see sujuva reguleerimisega käigukasti. Antud käigukastis ülekandearvu muudetakse teisiti. Tavaliselt on variaatorkäigukast rihmajamiga, kuid lõputöös arendatava mudeli käigukastis pole ühtegi rihma ega ketti. Autotootja on andnud hübriidkäigukastile e-CVT lühendi, kus alguses „e“ täht annab meile teada, et see on käikudeta käigukast, kus ülekandearv on elektrooniliselt muudetav. Antud juhul siis mootor-generaatoritega MG1 ja MG2. [3]

Vaadates nüüd konkreetsel P313 käigukasti tervikuna, mitte ainult jõu jagamise mehhanismi, näeme skeemi peal kahte planetaarülekannet (Skeem 1). Esimene planetaarülekanne on jagatud sisepõlemismootori (skeemi peal SPM) ning MG1 ja MG2 mootor-generaatorite vahel nagu oli

viidatud (Pilt 2) peal. MG1 mootor vastutab päikeseratta liikumise eest, sisepõlemismootor ajab ringi satelliitide raami koos satelliitidega, ning kroonrattast saavad liigutada nii MG2 mootor üksinda, kui ka koos sisepõlemismootoriga. Seda esimest planetaarülekanne nimetatakse „power split“ mehhanismiks, sest seal toimub kolme erineva jõuallika jõudude jagamine. Teine planetaarülekanne on seotud ainult MG2 mootor-generaatoriga. Selles ülekandes satelliitide raami polegi, mis võimaldaks satelliitidel ümber päikeseratta telje liikumist. Antud juhul teise planetaarülekanne peamine ülesanne on töötades reduktorina tõsta MG2 mootor-generaatori väljund momenti (Skeem 1). Mõlema planetaarülekanne kroonrattad on otseselt seotud ühes suures hammasratta sees. Selle hammasratta inglisekeelne nimetus on „compound gear unit“, mida saab siis nimetada kombineeritud reduktoriks, kuna see sisaldab endas mitut planetaarülekanne, mis omavahel kombineerides annavad ühe väljundi sellele samale suurele hammasrattale. Kombineeritud reduktorist moment jõuab teise hammasrataste paketini, mis asub eraldi teisel vahevõllil. Sealt edasi kantakse moment juba diferentsiaalhammasrattale, kust lõppülekandegaga jõuab moment esiratasteni (Skeem 1). [3]



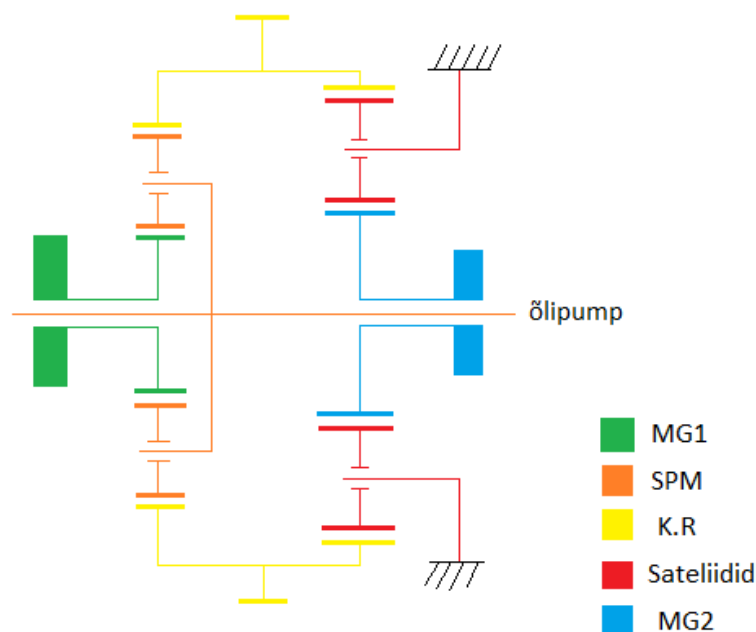
Skeem 1. Lihtsustatud P313 käigukasti hammasrataste skeem

### 3.2. Kinemaatiline skeem

Kinemaatilise skeemi peal on erinevate värvidega märgistatud erinevad hammasrattad ja toodud välja ka legend, kus on kirjas missugune jõuallikas vastutab millise värvi hammasratta eest (Skeem 2).

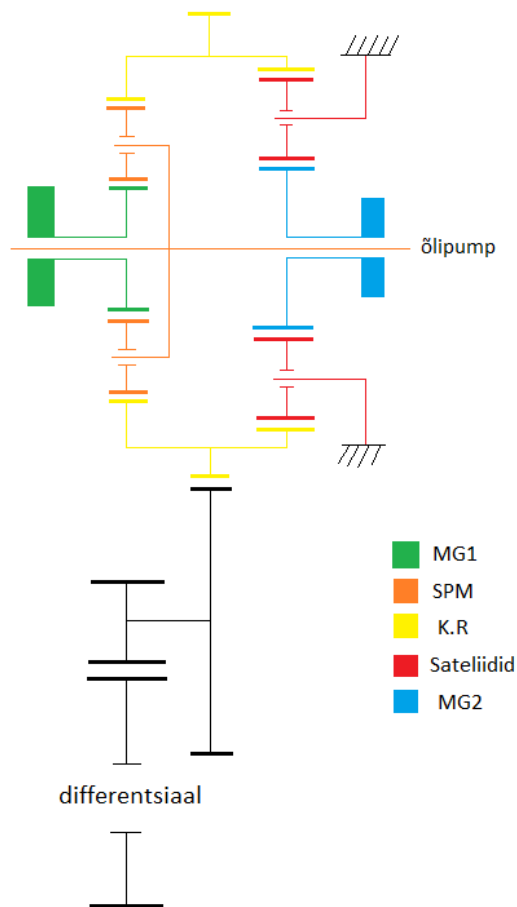
Toodud kaks kinemaatilist skeemi. Esimesel (Skeem 2) on toodud kombineeritud reduktor eraldi, mis sisaldab endas kahte planetaarülekannet. Rohelised ja sinised suured ristkülikud on mootor-generaatorid. Roheline on MG2 ja sinine on MG1 mootor-generaator. Oranži värviga satelliitide raam on võlliga läbi nuutide seotud sisepõlemismootori (SPM) hoorattaga. Satelliitide raamist sisepõlemismootorist teisele poole läheb käigukasti õlipumba võll, mis on nuutidega raamiga ühendatud (Skeem 2).

Punase värvi satelliidid ei oma raami, vaid nende teljed on kinnitatud käigukasti korpusesse. Saavad käia ringi ainult ümber oma telje. Kombineeritud reduktor on skeemi peal kollast värvi. Selle lühend skeemi legendis K.R. (Skeem 2).



Skeem 2. Planetaar ülekannete ja kombineeritud reduktori kinemaatiline skeem

Teisel skeemil on musta värviga listaud lisa vahevõll koos lõpp hammasrattastega, ning ka diferentsiaali hammasrattas. (Skeem 3)



Skeem 3. P313 käigukasti kinemaatiline skeem

### 3.3. Sõidu režiimid

Antud alateema eesmärk on kirjeldada käigukasti erinevate režiimide töötamist

#### 3.3.1. READY ehk sõiduks valmis

Istudes autosse ja vajutades „START“ nupule, kuvab kellaplokk hübriid auto puhul peale süsteemide kontrolli rohelist „READY“ kirja, mis annab juhile teada, et auto on sõitmiseks valmis. Juhul kui hübriid autol kõik EV režiimi töötamiseks vajalikud tingimused on täidetud, näiteks veojõu aku laetusaste, sisepõlemismootori ja välise keskkonna temperatuur on optimaalsed antud režiimi jaoks, siis auto jääbki töötama ainult veojõuaku pealt ning sisepõlemismootorit ei käivita. [3]



### **3.3.2. Kohalt võtt**

Kohalt võtult kui kõik EV režiimi tingimused on täidetud, kasutakse ainult MG2 mootor-generaatorit, mis veab esi rattaid umbes kuni 30 km/h. Peale seda käivitub sisepõlemismootor, mis hakkab aitama autot edasi viia. [3]

### **3.3.3. Sisepõlemismootori käivitamine**

Juhul kui veojõuaku täituvuse aste on madal, käivitatakse sisepõlemismootor, et ajada ringi MG1 mootor-generaatorit, mis hakkab genereerima voolu MG2 ja MGR mootorite jaoks ja/või veojõu aku laadimiseks.

### **3.3.4. Püsikiirusega liikumine**

Sõites rahulikult püsikiirusega ja kui koormus autole on väike, siis esi rattaid läbi käigukasti veavad nii sisepõlemismootor kui ka MG2 mootor. Sisepõlemismootori jõudu jagatakse esi rataste vedamiseks kui ka MG1 mootori ringi ajamiseks, et viimane saaks voolu genereerida. [3]

### **3.3.5. Pidurdamine**

Pidurdamise ajal sisepõlemismootor suretatakse välja ja auto osaliselt pidurdab mootor generaatoritega, mida nüüd ajavad ringi vastupidises suunas auto rattad. [3]

### **3.3.6. Tagurpidi käiguga sõitmine**

Tagurpidi käiku otseselt ei olegi. Auto tagurdamine toimub ainult MG2 mootor-generaatoriga teises suunas pöörlemisega. [3]

## **4. 3D MUDELI PROJEKTEERIMINE**

### **4.1. Projekteerimise algus**

Alustades käigukasti mudeli projekteerimisest, koostati plaan mille järgi hakata mudeli projekteerima. Esimese etapina oli vaja uurida käigukasti tööpõhimõtte autotootja tehasepoolsest juhendist TechDoc. Tehes endale selgeks kuidas töötab ja millistest komponentidest koosneb, oli järgmiseks etapiks vaja lahti võtta päris käigukast. Lahti võtmine oli autori jaoks vajalik, et aru saada komponentide suurustest ja nende paigutustest, kuna juhendite skeemide ja piltide pealt olid mõned kinnituse kohad peidus või projekteerimise lahendused arusaamatud. Lisaks oli vaja aru saada käigukasti päris suurusest, et määrata projekterivale mudelile mõõtkava.

### **4.2. Käigukasti P313 lahti võtmine**

Käigukasti lahti võtmiseks mingeid erilisi spetstööriistasid vaja ei läinud. Kogu käigukasti sai lahti võtta akutrelliga ja paari padrunvõtmega 10 ja 12 mõõdus, ning paar korda oli vaja pikendust kasutada.

Kogu lahti võtmise protsessi kergendas see olukord, et korpus oli osaliselt lahti lõigatud ja seal kus olid laagrite pingistud korpusega, tulid need osad lahti suhteliselt kergelt.

Peale lahti võtmist mõõdeti komponendid, tehti selgeks nende omavaheline paigutus ning uuritud kinnituse lahendused. (Pilt 3Pilt 3. Lahti võetud käigukast P313)



Pilt 3. Lahti võetud käigukast P313

### 4.3. CAD mudeli projekteerimise tarkvara

CAD mudeli osade projekteerimiseks oli valitud Autodesk Inventor-i tarkvara, kuna sellega saab teostada palju lahendusi, alustades lihtsamatest skeemidest ja lisades mudelitele hammasrattaid või rihmülekandeid.

### 4.4. Hammasrataste loomine

Algus oli pandud planetaarülekannete projekteerimisele. Kokku oli vaja kahte planetaarülekannet. Esimene – „jõu jagamise mehhanism“ ja teine oli MG2 mootori kiiruse piirav ja momendi kasvav planetaarülekanne. Mõlemad planetaarülekanded omavad erinevaid hammasrattaid. Erinevus on nii hammasrataste koguses, suuruses kui ka hammaste arvus.

Enne hammasrataste projekteerimist oli uuritud hammasrataste koostamise teooriat. Ideaalne hammasratta hammas on evolventi kujuga. Selline kuju tekib kui tuua näide niidi lahti kerimisega niidirullilt Evolventi kuju abil, tekkib hammaste vahel kõige sujuvam ülekanne. [2]

Selleks et koostada hammastel evolventi kuju, on vaja arvutada plaanitava hammasratta parameetrid. Oli vaja arvutada hammasratta mooduli. Seda saab arvutada teades plaanitava mudeli hammaste arvu  $N$  ja selle jaotuslähimõõtu  $d$  (mm). Lisaks oli vaja määrata radiaallõtku  $c$  (mm) kahe hammasratta hammaste vahel. Tavaliselt on see vahemikus 0,1 – 0,3 mm. Juba nendest andmetest piisab, et luua

esimese evolventi kuju tulevasele hammasrattale. Tuginurk  $\varphi$  (°) kõikidele mudeli hammasratastele määratakse 20 kraadi, mis on kõige tihedamini kasutatav tuginurk masinaehituses. [2]

Toome näide „power split“ planetaar ülekanne päikeserattaga. Antud hammasrattal peab olema 30 hammast ja jaotuslääbimõõt 44,40 mm. Otsime välishambumise hammasratta valemite järgi vajalikud parameetrid.

Nende andemetega saame leida mooduli  $m$  (mm) valemiga (1) [3] :

$$m = \frac{d}{N}, \quad (1)$$

kus  $d$  – jaotuslääbimõõt, mm;

$N$  – hammaste arv, (tk).

Päikeseratta moodul vastavalt valemile (1) võrdub:

$$m = \frac{44,40}{30} = 1,48 \text{ mm.}$$

Arvutuste käigus leidsime päikeseratta mooduli, mis võrdub 1,48 mm.

Teades nüüd mooduli ja määrades hammasrataste radiaallõtku 0,1 mm, saame leida ka ülejäänud vajalikud hammasratta loomiseks andmeid.

Arvutame välja jalgadelääbimõõtu  $d_r$  (mm), mis on nii-öelda hamba põhi. Leiame selle (2) valemi järgi [3]:

$$d_r = d - 2 \times (m + c), \quad (2)$$

kus  $d$  – jaotuslääbimõõt, mm;

$m$  – moodul, mm;

$c$  – radiaallõtk, mm.

Leiame jalgade läbimõõtu valemiga (2) ja see võrdub:

$$d_r = 44,4 - 2 \times (1,48 + 0,1) = 41,24 \text{ mm.}$$

Leidsime jalgadelääbimõõtu 41,24 mm.

Vaja välja arvutada hammaste  $d_b$  (mm) baaslääbimõõtu, kust evolventi kuju saab oma alguse. Valem on järgmine (3) [3]:

$$d_b = d \times \cos(\varphi), \quad (3)$$

kus  $d$  – jaotuslābimõõt, mm;

$\varphi$  – hamba tuginurk, °.

Saame vastuseks (3) valemist:

$$d_b = 44,4 \times \cos(20) = 41,72 \text{ mm.}$$

Antud baaslābimõõtu 41,72 mm on vaja, et teada kust hamba evolventi hakata joonestama.

Viimasena on vaja leida kõige suurema ehk hammasratta välimine läbimõõt  $d_0$  (mm). Selle valem on (4) [3]:

$$d_0 = d + 2 \times m, \quad (4)$$

kus  $d$  – jaotuslābimõõt, mm;

$m$  – moodul, mm.

Hammaste peadelābimõõt võrdub (4):

$$d_0 = 44,4 + 2 \times 1,48 = 47,36 \text{ mm.}$$

Viimane vajalik hammasratta loomiseks läbimõõt on leitud. Peadelābimõõt võrdub 47,36 mm.

#### 4.4.1. Evolventi joonestamine

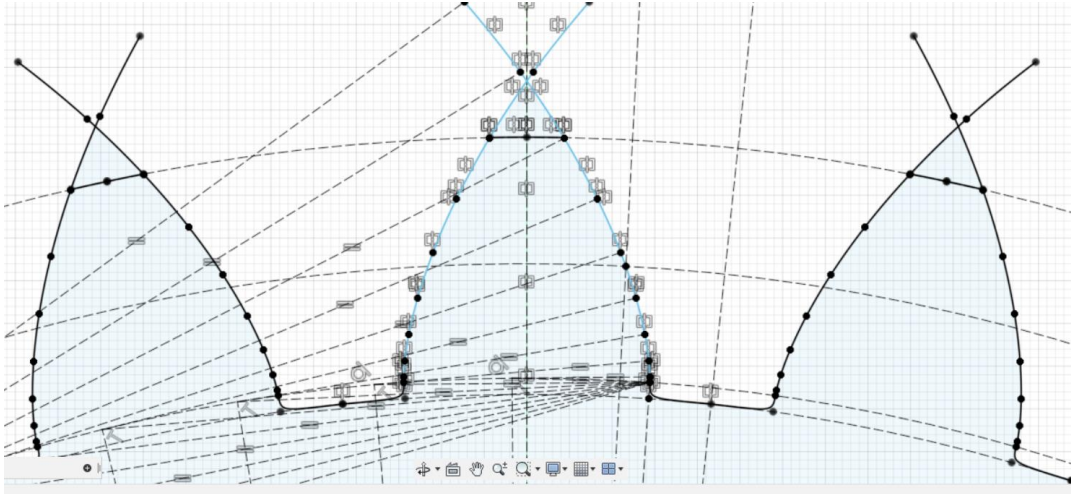
Seda tööd on lihtsamini teha teises Autodesk tarkvaras Fusion 360. Pärast saab valminud mudeleid kergelt eksportida Inventor-se.

Hammasratas saab oma alguse kõigi eelneva nelja läbimõõdu joonestamisest.

Sealt edasi on vaja joonestada tuginurka  $\frac{1}{4}$  ja  $\frac{1}{2}$  osad. Neid on vaja, kuna evolventi kuju algab baaslābimõõdust ja  $\frac{1}{4}$  tuginurga ristumise juurest. Null asendiks jääb näiteks vertikaal y-telg. See telg jagab hammasratta täpselt pooleks pikkupidi. [2]

Evolventi kujundamiseks on vaja teha mitut punkte, mille järgi hakkab kõverjoon evolventi kuju saama. Antud hammasratta loomisel oli tehtud 10 punkti ja nagu oli eelnevalt toodut näide niidirullist üksiku niidi lahti kerimise moodi baaslābimõõdust kella vastassuunas hakkavad punktid kujunema õigetes kohtades. Nende 10 punkti järgi saab joonestada korraliku evolventi. Vertikaal y-teljest oli

tehtud peegeldus teisele poole. Hamba ja hammasratta põhjas pindade vahel tekkinud teravad nurgad muudetakse veidi ümmarguseks, et tugevdada hamba alust. Viimase ülemiseks piiriks on  $d_0$  läbimõõt. Sealt tekibki hammasratta hamba pea. (Pilt 4) [2]



Pilt 4. Hamba evolventi kuju joonestamine

Käigukasti mudelis kasutakse silinderhammasrattaid kuldhammastega. Töökojas oleva käigukasti hammasrataste nurk oli mõõdetud ja mudelis kasutakse sama nurka, mis on  $20^\circ$ . [2]

Autodesk Inventor-is on olemas ka funktsioon, kus tarkvara saab ise hammasratastele õiget evolventi kuju luua, mis edaspidi lihtsustab mudeli loomist. Iseseisvalt hammasratta loomine aitab tööpõhimõttest aru saada ja aitab kujundada enda eesmärkide jaoks vajaliku hammasratta. Seda teooriat oli vaja automaatprogrammi kasutamises, kuna seal küsitakse parameetreid, mida peab sisestama.

#### 4.5. Mõõtmised peale esimest väljaprinti

Inventor tarkvara abil olid loodud esimesed hammasrattad ja planetaarülekannte koostud. Sealt edasi oli vaja katsetada esimeste osade väljaprintimisega, et saaks katsetada ja vaadata kuidas need osad hakkavad reaalelus välja tulema, teha võrdlused CAD ideaal mudeliga.

Esimeste osade väljaprintimine oli tehtud tehnikakõrgkoolis 3D printeriga Creality-CR5. Printimises oli kasutatud PLA plastiktraat.

Esimese katsega olid prinditud kahe planetaarülekannte osad ehk kroonrattad, päikeserattad ja satelliidid koos nende raamidega. (Pilt 5),(Pilt 6)



Pilt 5. Esimene välja printitud planetaarülekanne



Pilt 6. Esimese planetaarülekanne satelliitide raam

Osad olid mõõdetud. Tabelisse on toodud 3D printimise kvaliteedi võrdluseks satelliit hammasrataste mõõdud, kuna neid on kõige rohkem ja neid saab omavahel võrrelda. (Tabel 5)

Tabel 5. Esimese väljaprindi mõõtmise tulemused

Komponent	Esimese planetaar ülekanne satelliit	Teise planetaar ülekanne satelliit
Sisemine läbimõõt d1 (mm)	21,18	21,0;
	21,20	21,38
	21,0	21,28
	21,15	21,28
Välisläbimõõt d2 (mm)	35,60	47,26
	35,60	47,26
	35,50	47,46
	35,54	47,3

CAD mudelis on mõlematel planetaarülekannete satelliitide sisemised läbimõõdud 22,0 mm. Esimese satelliitide välised läbimõõdud peaksid olema 36,272 mm. Teisel aga 47,599 mm.

Antud tabelist (

Tabel 5) on näha, et väljaprinditud osad olid väiksemad kui CAD tarkvaras olevatel mudelitel. Esimese planetaarülekanne osad on väiksema läbimõõdu ja paksusega kui teine planetaarülekanne ja nagu tabelist on näha, nendel on peale väljaprintimist plastik kõige rohkem kahenenud. Sisemine läbimõõt d1 on keskmiselt umbes 4% väiksem ja välimine umbes 2%.

Vaadates teise planetaarülekanne mõõte, näeme et välisläbimõõt d3 ei ole nii suure erinevusega, kui võrrelda CAD mudeliga. Sisemine d1 vajus 3,5% ja välimise d2 erinevus on ainult 0,6%. Tundub, et mida väiksem on komponent, seda ebatäpsem tuleb väljaprindi tulemus. Sellega peab arvestama ja proovida lisada samad protsendid olemasolevale CAD mudelile, et lõpptulemusena saada soovitud mõõdud.

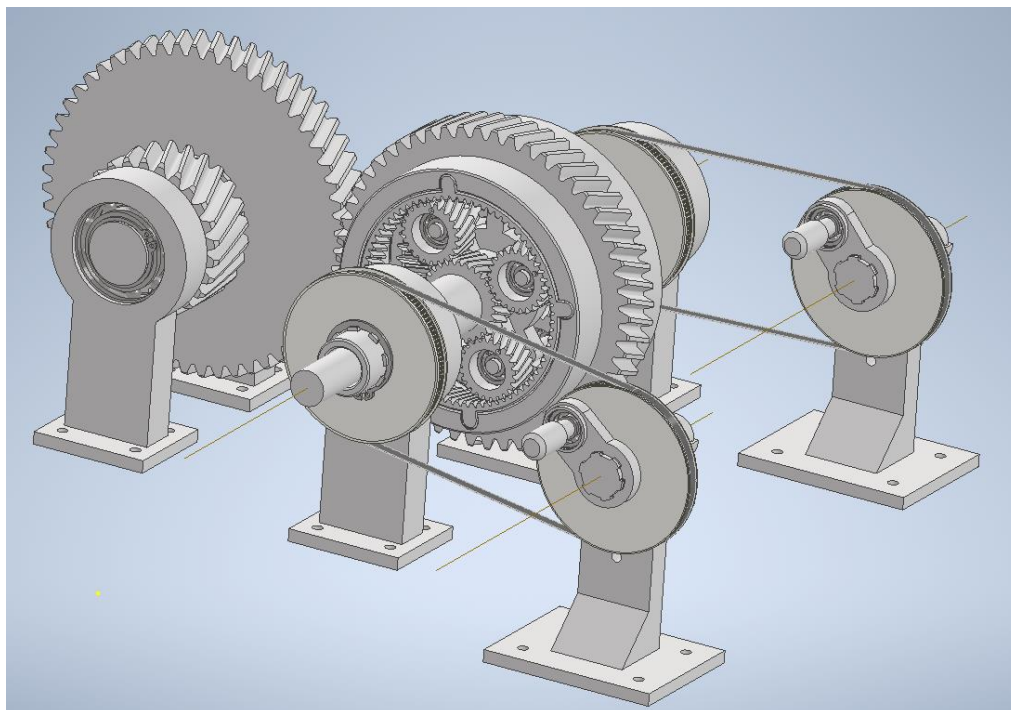


Mõnedes kohades hammaste peal on tekkinud üleliigset plastikut, mis veidi takistas sujuvat hambumist. Peale väljaprintimist on vaja teostada prinditud osade puhastamist üleliigsest plastikust, muidu kipuvad hammasrattad kinni kiiluma.

#### 4.6. 3D mudel

Mudeli projekteerimine oli otsustatud teha käigukasti suuruses mõõtkavas umbes 1:1. Mõnedes kohtades oli vaja komponendid originaalist veidi teises mõõtkavas teha, kuna mudel on ilma korpuseta, et õppevahendil oleks näha kõikide oluliste komponentide liikumist. Seega ka osad oli vaja ümber teha võrreldes originaaliga.

Antud mudelil on peamine eesmärk selles, et oleks kõiki hammasrattaid näha ja et oleks võimalik liigutada planetaarülekandeid. (Pilt 7)

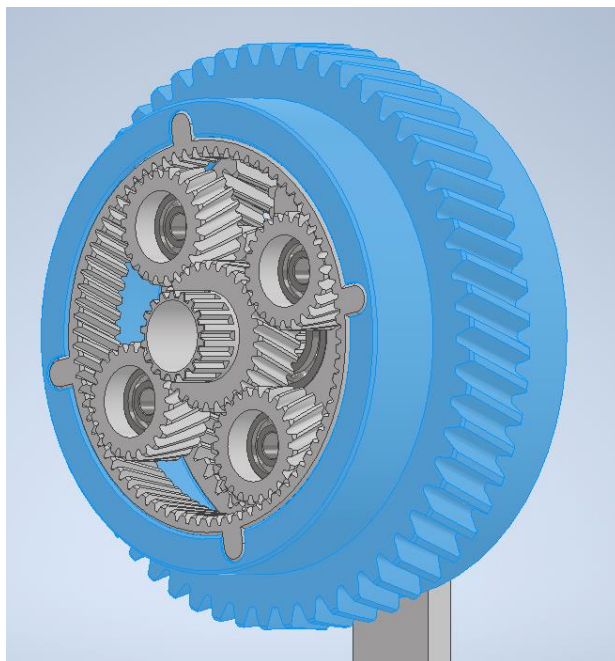


Pilt 7. Mudel täissuuruses

##### 4.6.1. Planetaarülekanded

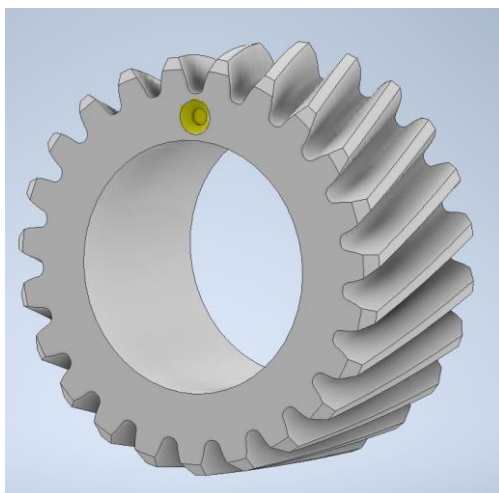
Päris käigukastis on kombineeritud reduktori mõlema planetaarülekande kroonrattad freesitud selle korpuse sisse. Mudeli puhul oli otsustatud teha kroonrattad kombineeritud reduktori korpusest eraldi, kuna tegemist on hammasratastega, mis on 3D printeri jaoks keeruline komponent printimiseks. Tabelist (Tabel 5) oli juba näha, kuidas komponendid peale väljaprinti kahenevad. Kroonratast saab

vajadusel eraldi vahetada ja ei pea üleliigselt PLA materjali kasutama suure reduktori väljaprintimisele. Nii säästab ressursse kui ka aega. (Pilt 8) peal on sinisega märgistatud kombineeritud reduktor ja halli värviga on näha eraldi osana esimest planetaar ülekannet .



Pilt 8. Eraldi reduktori korpusest kroonrattas

Selleks, et oleks näha hammasrataste erineva nurgakiirusega pöörlemist, mis aitab aru saada palju pööret teeb näiteks satelliit hammasrattas võrreldes päikeserattaga, oli tehtud hammasrataste välispindadele väiksed aga mitte sügavad avad. Hiljem saab sinna näiteks pintsliga mingi värvitäppi teha, et säiliks visuaalne pöörlev orientiir. Pildi peal on nimetatud ava eristatud kollasega. (Pilt 9)

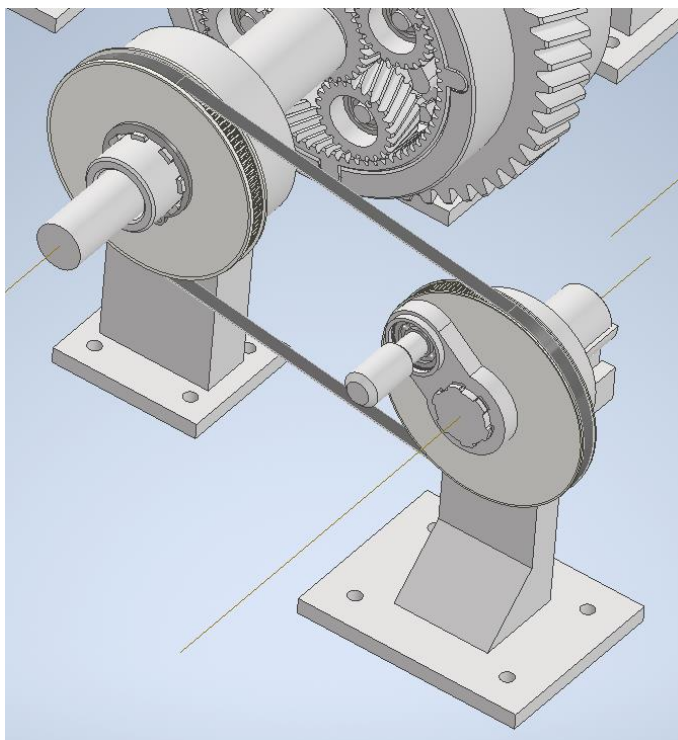


Pilt 9. Visuaalne orientiir satelliithammasrattal

#### 4.6.2. Mootor-generaatorid ja sisepõlemismootor

Selleks et oleks mudelit võimalik opereerida ja käitada kolm käigukasti jõuallikat, oli tehtud mootor-generaatorite MG1 ja MG2 puhul rihmülekandega lahendus ja käepidemega vända kinnitamine sisepõlemismootori võllile.

Kuna mootorid MG1 ja MG2 asuvad otseselt planetaarülekannete ees ja et tudengid saaksid planetaarülekannet käijata ilma oma käega varjamata, otsustati viia ülekanne sealt eemale. Üks rihmaratas asub MG1 võlli peal ja teine sellest võllist eemal, ning on ühendatud hammasrihmaga. Rihma saab pingutada teise rihmaratta kronsteini radiaal suunas eemale viies. Kõik tugijalad on aluse küljes poltidega kinnitatud. Teise rihmaratta all poldi avad pikendatakse, et oleks hammasrihma pingutamiseks reguleerimis võimalusi. Rihmaülekanne mõlema rihmaratta läbimõõdud on identsed umbes 90 mm. Selline suurus on tehtud selleks, et oleks piisavalt suur jõu õlg hammasrataste ringi ajamiseks. Rihmaülekanne ülekanne arv võrdub 1,0 kuna autori arvates kiiruse suurendav või momendi tõstetav ülekanne tekitab võllide nurkkiiruste erinevust võrreldes rihmarattaga mida veetakse ringi. (Pilt 10).



Pilt 10. Hammasrihma ülekanne

#### 4.6.3. Mudeli alus

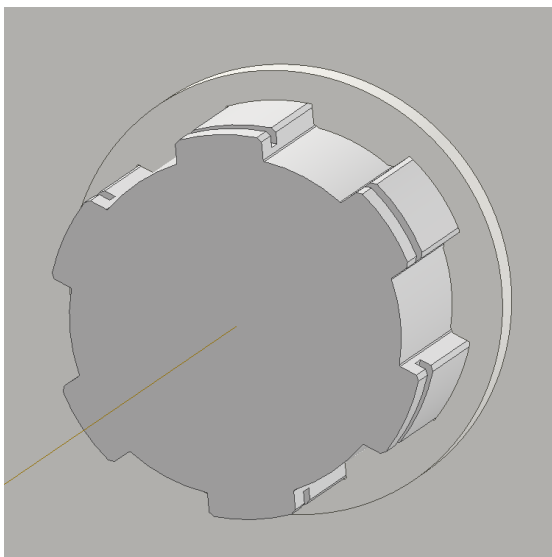
Mudeli aluseks saab kasutada plastmass plaati 500x450 mm, et kõik komponendid ilusti mahuksid ja ei oleks ääre peal, kuna mudel ise võtab ruumi umbes 427x465 mm (Lisa 1). Mudel kinnitub alusega M6 poltidega koos mutritega.

#### 4.6.4. Laagrid ja standardid

Kõik võllid ja tugijalad projekteeritud standartsete SKF kuullaagrite jaoks, et mudel saaks sujuvalt töötada. Hammasrattad ja võllid on toetatud üherealiste kuullaagritega, et ei oleks radiaal- ega aksiaalliikumist ja et komponendid ei kuluks üleliigsete hõõrdumise pärast. Kasutatakse SKF laagri seeriad nagu: 6007, 608, 6005 ja 6003. Need laagrid olid laos olemas.

Laagrid on laagri pesas või võlli peal pingistuga. Selleks, et laagrid ei liiguks aksiaalsuunas on võllide kinnitamiseks kasutatud standardiseeritud lukustusrõngad DIN 471 ja DIN 472 laagri pesade jaoks. Väikestel võllidel on laagrite kinnitamiseks kasutatud rõngad DIN 6799.

Kohad, kus hammasrattas või rihmarattas peavad olema võlliga jäigalt kinnitatud, on kasutatud nuutkinnitust DIN ISO 14. Antud standardil on suured haruldase nuudid, mis sobivad just jämedatele plastikust võllidele. Peenuutide väljaprintimine ei pruugi kvaliteetne olla, mis hiljem raskendab osade kokkupanemist. (Pilt 11)



Pilt 11. DIN 14 standardi järgi tehtud nuudid võllil

## 5. ÕPPESTENDI EDASIARENDUS

Käigukasti mudel on projekteeritud võimalusega paigaldada lisa samm-elektrimootorid. Antud lahendus aitab luua täiusliku mudeli. Elektrimootorite jaoks saab luua programmi tavalise Arduino programmeerimisega.

Elektrimootorite jaoks olid projekteeritud kinnituskronsteinid, kus saab M3 poltidega kinnitada samm-mootorid.

Kinnituskronsteinid on projekteeritud NEMA 17 samm-elektrimootorite korpuse suuruse järgi. Uurides turgu, antud suuruse mudelid sobivad 3D printitud mudeli jaoks kõige paremini. Nende kaal on keskmiselt 100 – 250 g ja korpuse suurus 42,3 x 42,3 mm, mis optimaalselt sobib mudelile. [6]

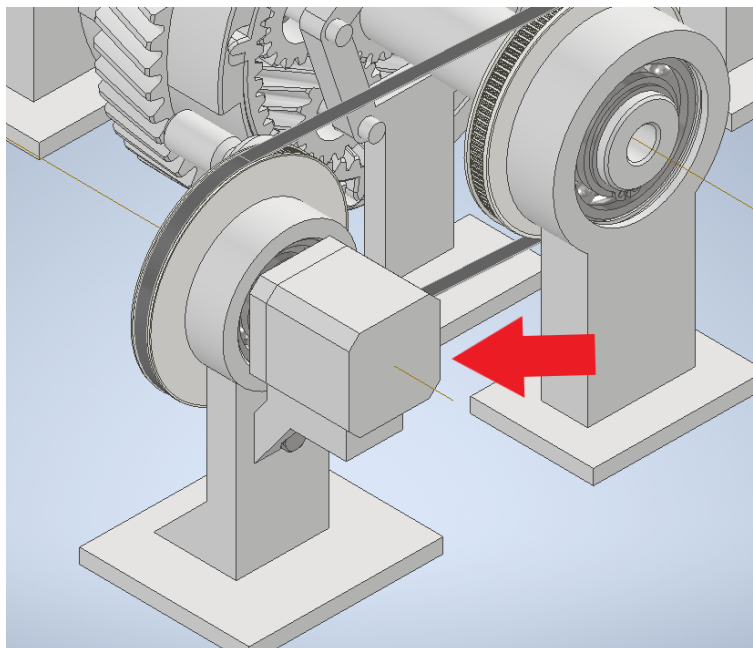
Mootoritel on 5 mm võll, mille külge saab kinnitada tavalise hammasratta ja ühendada mudeli plastmass võlliga. Saab ka oma kinnituse lahendused projekteerida lähtudes kinnituskronsteinidest. [6]

Valides mootori mudeli kõige paremini sobiks bipolaar mootorid. Nendel on 4 juhet ja programmeerida on lihtsam, kuna sees olevad mähised ei ole omavahel seotud. Toodut ka pilt ühest samm-mootori näidisest. (Pilt 12)

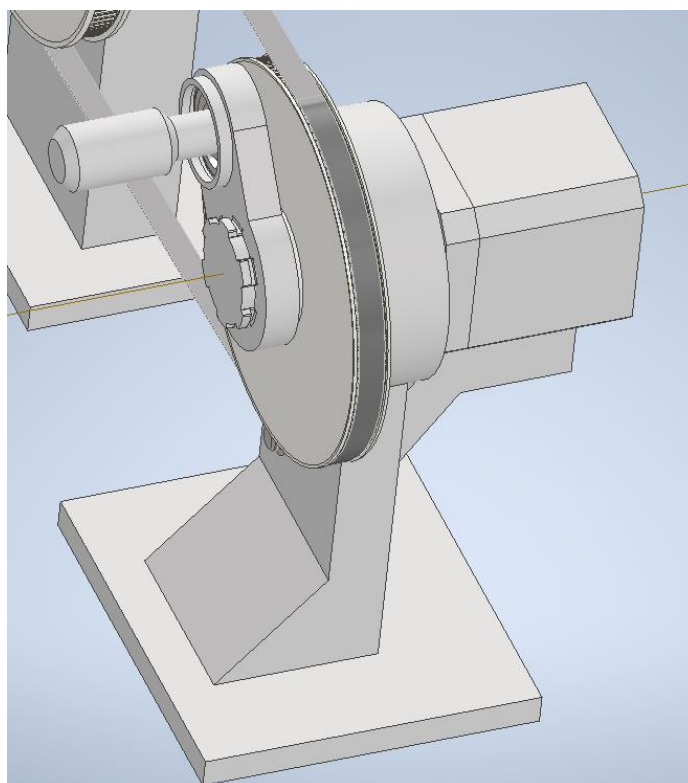


Pilt 12. Samm-mootori näidis

Kinnitub elektrimootor rihmaratta käepideme kinnitusest teisel pool. (Pilt 13),(Pilt 14)



Pilt 13. Elektrimootori paigutus



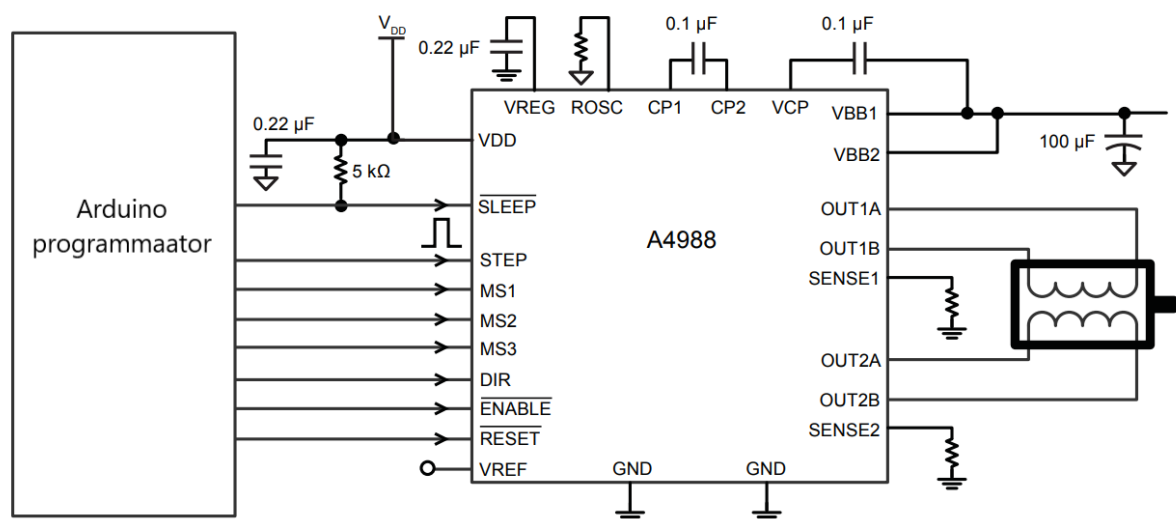
Pilt 14. Samm-elektri mootor külje pealt

Antud samm-elektrimootorite jaoks on vaja lisa kontrolleri. Selle ülesanne on Arduinolt saadud signaalid jagada mootori mähiste vahel õiges järjekorras.

Olemas lihtne mootorite kontrolleri A4899, mida saab osta sellistes elektroonikapoes. Antud kontrolleriil on järgmised juhtimis pinid. STEP pinnile LOW või HIGH signaali järjest saates, teeb elektrimootor sammu. Mida kiiremini roteerub HIGH ja LOW signaalid seda kiiremini pöörleb elektrimootor. DIR jalg vasutab pöörlemis suuna eest. Näiteks kellasuunas pöölemiseks peab saatma HIGH signaali ja vastupidi siis LOW signaali. MS1, MS2 ja MS3 jalgadele erineva 1 ja 0 kombinatsiooni saates saab muuta sammu asted. See tähendab, et kontrolleri on võimeline teha osa sammust ehk oskab teha nii täis sammu kui ka 1/8 sammust. (Pilt 15)

Kontrolleri väljunditest A1, A2, B1 ja B2 saadakse voolu mootori mähisele. Elenevat oli mainitud, et antud tüüpi bipolaarsetel mootoritel on 4 juhet ehk 2 juhet mähisele. A1 ja A2 on ühe mähise otsad. (Pilt 15)

RESET jalgale signaalse saates saab kontrolleri restarti teha, kuid sellise võimalus on ka Arduini programmeerimisel olemas.



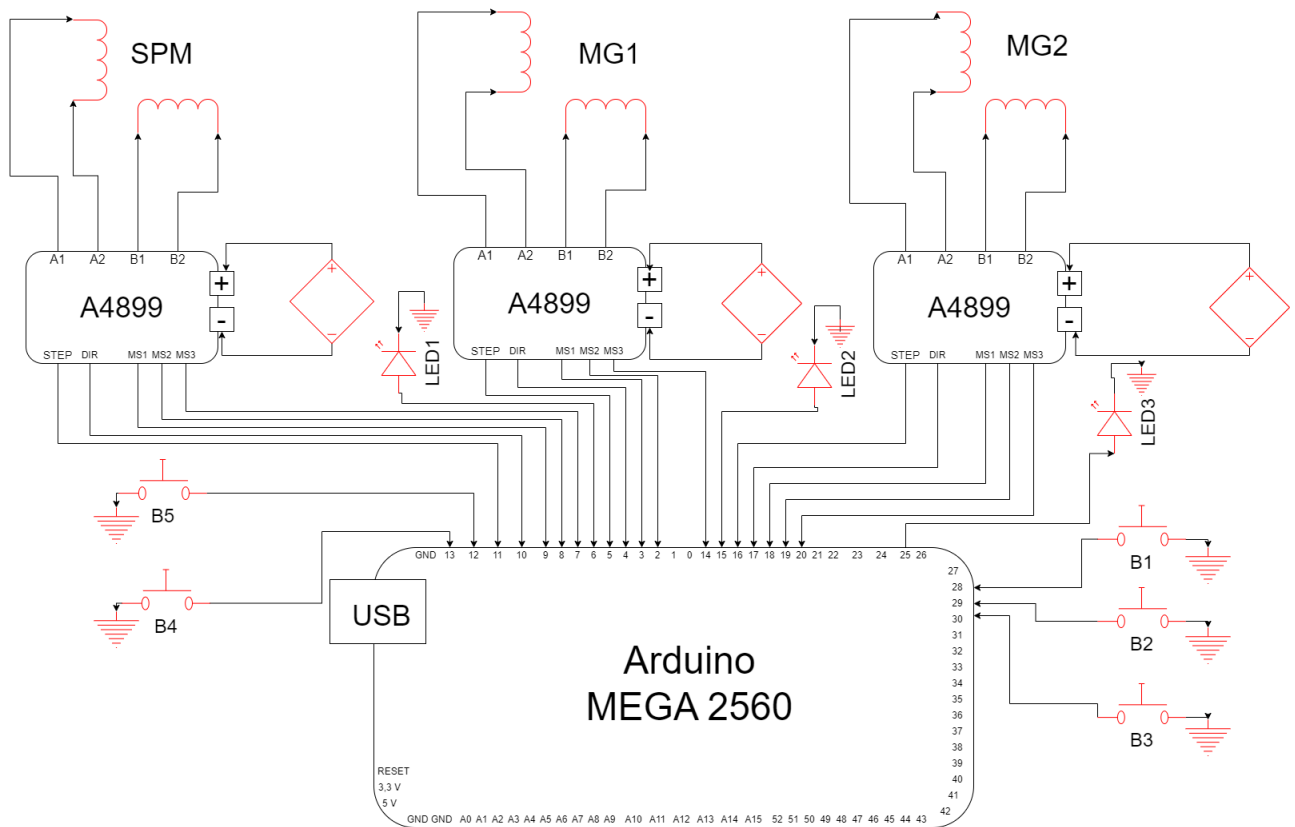
Pilt 15. A4899 kontrolleri skeem

Igale mootorile on oma kontrolleri vaja. Kokku on 3 mootorit: SPM, MG1 ja MG2.

Saab luua 5 erinevat mootorite töötamis režiimi, mis olid toodud (Tõrge! Ei leia viiteallikat.lõigus. Juhtida SPM ja MG2 elektrimootorit, kuna MG1 mootor generaatorit veomootorina ei kasuta.



Selleks, et oleks paremini arusaadav kumb mootoritest töötab, saab nende külge panna led-id, mis hakkavad põlema kui mootorid hakkavad tööd tegema. Mootorite kontrollerite maksimaalne tööpinge on kuni 35 V. Saab toita tavalise 12V laadijaga. Sõltub sellest, mis tööpingega elektrimootorit valida, sest valik on suur alates 3,6 V ja kuni 24 V. All on toodud üks võimalus kuidas juhtimise skeem võib välja näha. (Skeem 4)



Skeem 4. Ühendamise skeem



## 6. MAJANDUSLIKUD ARVUTUSED

Käigukasti PLA materjalist mudeli projekteerimiseks on vaja omada 3D printerit või kasutada teenust 3D printimisega tegeleva ettevõttes. Ostumaterjalidest on vaja järgmisi all olevas tabelis toodud komponente (Tabel 6).

Tabel 6. Ostutoodet

Komponent	Nimetus	Kogus	Hind	Kokku
Üherealised Kuullaagrid	6005-2Z/C3 SKF	2 tk	6,20 €/tk	12,40 €
	6007/C3 SKF	4 tk	6,5 €/tk	26,00 €
	6003/C3 SKF	1 tk	4,3 €/tk	4,30 €
	608-2Z SKF	11 tk	3,7 €/tk	40,70 €
Lukustus rõngad	DIN 471 25 x 1,2	2 tk	0,15 €/tk	0,30 €
	DIN 471 26 x 1,2	2 tk	0,30 €/tk	0,60 €
	DIN 471 35 x 1,5	4 tk	0,5 €/tk	0,20 €
	DIN 471 36 x 1,75	2 tk	0,35 €/tk	0,70 €
	DIN 471 58 x 2	2 tk	0,88 €/tk	1,76 €
	DIN 472 47 x 1,75	2 tk	0,49 €/tk	0,98 €
	DIN 472 62 x	4 tk	0,72 €/tk	2,88 €
	DIN 6799 5 x 0,9	11 tk	0,06 €/tk	0,66 €
Poldid	DIN933 M6 x 25	30 tk	0,30 €/tk	9,00 €

Mutrid	DIN 985 M6	30 tk	0,03 €/tk	0,90 €
Rihmad	PUR 600-T2.5-6 MAD	2 tk	13,10 €/tk	26,20 €
3D printeri plastmass traat	PLA plastik	1 kg	23,90 €/kg	23,90 €
KOKKU				151,48 €

Laagreid ja rihmasid saab osta Alas-kuul AS ettevõttelt. Poldid, mutrid ja lukustusrõngaid võimalik osta Baltic Bolt OÜ-st. Kindlasti saab leida ka odavamad polte ja mutreid, näiteks ehituspoodides saab palju odavamalt osta, kuid siin oli toodud hinnad just ühest poest. PLA traati sellise hinnaga ja suure värvi valikuga saab osta Oomipoest. Kõikide hindadega tabelist (Tabel 6) arvutades tuleb ostutoodete summa 151,48 €. [7], [8]

## KOKKUVÕTE

Lõputöö käigus oli uuritud Lexus hübriid käigukasti tööpõhimõtte. Tehtud selgeks hammasrataste projekteerimine. Esimese pilguga näeb see käigukast üsna keeruline välja. Seega lõputöös oli toodud Lexus RX450h hübriid käigukasti P313 3D mudeli projekteerimise näide. Antud mudel peaks aitama uusi tudengeid hübriid käigukasti tööpõhimõtte aru saamises. Võimalik kõike hammasrataid ringi ajada, et oleks lihtsamini arusaadav käigukasti P313 ülekande arvude tekkimisest. Selle mudeli projekteerimiseks läheb vaja 3D printerit koos plastmass traadiga, paarkümmend kuullaagrit koos nende lukustamiseks vajalikud rõngad. Kõik ostetavad komponendid on lihtsasti saadavad poodides, mis spetsialiseeritud antud valdkonnaga. Aluseks saab kasutada plastmass plaadi laiusega vähemalt 500x400 mm. Kinnitamiseks augud saab akutrelliga väljapuurida. Mudel on võimalikult lihtsa ehitusega ja komponendid projekteeritud selliselt, et oleks võimalik eraldi mingi osa vahetada, mitte tervikuna terve mooduli.

3D printeri väljaprintimisel peab arvestama plastmassi kahanemisega, seega vastavalt sellele CAD mudeli peab projekteerima lisa materjali varuga, et lõpptulemuseks oleks soovitud suuruses osa.

Mudeli saab arendada paigaldades elektrimootorid ja luues programmi nende juhtimiseks. Töös oli toodud näide elektrimootoritest, mida saab kasutada.

## **7. SUMMARY**

During the thesis, the Lexus hybrid was studied in the gearbox. At first glance, this gearbox looks quite difficult, so the Lexus RX450H hybrid in the thesis was an example of designing the 3D model of the gearbox P313. This model should help new students to understand the principle of the gearbox. It is possible to circulate everything to the gears to make it easier to understand the gearbox P313 transfer. To design this model, you will need a 3D printer with a plastic wire, about twenty ball bearings with the rings needed to lock them. All components you buy are easy to send in stores specialized in this area. The plastic plate can be used at least 500x400 mm. The holes can be drilled with a cordless drill. The model is as simple as possible, and the components are designed so that it can be replaced separately, not a whole module.

When printing a 3D printer, the plastic bell must be considered, so the CAD model must be designed according to the supplement of the material to the end of the desired size.

## VIIDATUD ALLIKAD

- [1] European commision, „Emissions in the automotive sector,“ November 2022. [Võrgumaterjal]. Available: [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/environmental-protection/emissions-automotive-sector\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/environmental-protection/emissions-automotive-sector_en). [Kasutatud 19, aprill 2023].
- [2] Transpordiamet, „<https://www.transpordiamet.ee/>,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.transpordiamet.ee/soidukite-statistika>. [Kasutatud 20, aprill 2023].
- [3] Toyota Motor Corporation, „Lexus RX450h GYL 15 New car features,“ märts 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.techdoc-toyota.com/viewpublication>. [Kasutatud veebruar 2023].
- [4] W.L.Cleghorn, Mechanics of machines, New York: Oxford University Press, 2005.
- [5] R. Gomeriger, M. Heizler, R. K. V. Menges, S. Oersterle, T. R. Rapp, C. Scholer, A. Stenzel, A. Stephan ja F. Wieneke, Mehaanikainseneri käsiraamat, Ostfildern: Vollmer GmbH and Co, 2018.
- [6] TRINAMIC Motion Control GmbH & Co. KG, „[www.trinamic.com](http://www.trinamic.com),“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.trinamic.com/products/drives/>. [Kasutatud 27. aprill 2023].
- [7] Dormikor OÜ, „[https://www.oomipood.ee/en/category/plaplastik\\_1.75mm](https://www.oomipood.ee/en/category/plaplastik_1.75mm),“ 25, aprill 2023. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.oomipood.ee/en/category/plaplastik\\_1.75mm](https://www.oomipood.ee/en/category/plaplastik_1.75mm).
- [8] Alas-Kuul AS, Alas-Kuul AS, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.alas-kuul.ee/>. [Kasutatud 20 aprill 2023].

## **LISAD**

Lisa 1. Joonis K\_00\_00\_00 3D\_mudel

Lisa 2. Joonis K\_01\_00\_00

Lisa 3. Joonis K\_03\_00\_00

Lisa 4. Joonis K\_04\_00\_00

Lisa 5. Joonis K\_02\_00\_00

Lisa 6. Joonis K\_01\_01\_01

Lisa 7. Joonis K\_01\_01\_02

Lisa 8. Joonis K\_01\_01\_03

Lisa 9. Joonis K\_01\_01\_04

Lisa 10. Joonis K\_01\_01\_05

Lisa 11. Joonis K\_01\_01\_06

Lisa 12. Joonis K\_01\_01\_07

Lisa 13. Joonis K\_01\_01\_08

Lisa 14. Joonis K\_01\_01\_09

Lisa 15. Joonis K\_01\_01\_10

Lisa 16. Joonis K\_01\_01\_11

Lisa 17. Joonis K\_01\_01\_12

Lisa 18. Joonis K\_02\_01\_01

Lisa 19. Joonis K\_02\_01\_02

Lisa 20. Joonis K\_02\_01\_03

Lisa 21. Joonis K\_02\_01\_04

Lisa 22. Joonis K\_02\_01\_05

Lisa 23. Joonis K\_02\_01\_06

Lisa 24. Joonis K\_02\_01\_07

Lisa 25. Joonis K\_03\_01\_01

Lisa 26. Joonis K\_03\_01\_02

Lisa 27. Joonis K\_03\_01\_03

Lisa 28. Joonis K\_03\_01\_04

Lisa 29. Joonis K\_03\_01\_05

Lisa 30. Joonis K\_04\_01\_01

Lisa 31. Joonis K\_04\_01\_02

Lisa 32. Joonis K\_04\_01\_03

Lisa 33. Joonis K\_04\_01\_04