

3D-tulostettavan kauko-ohjattavan lelun toiminnallisten osien tuotesuunnittelu

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

2023

Aku Niemitalo

Tiivistelmä

Tekijä(t) Aku Niemitalo	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2023
	Sivumäärä 36	
Työn nimi 3D-tulostettavan kauko-ohjattavan lelun toiminnallisten osien tuotesuunnittelu		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), konetekniikan koulutus		
Toimeksiantajaorganisaatio (jos opinnäytetyöllä on toimeksiantaja)		
Tiivistelmä <p>Työssä tutkittiin, onko kuluttajatason 3D-tulostimella mahdollista valmistaa toiminnallisia komponentteja. 3D-tulostimien määrä on kasvanut viimevuosina reilusti ja tulostusmahdollisuudet kasvaneet sen myötä.</p> <p>Työssä tutkittiin kirjallisuutta, internet lähteitä ja tehtiin henkilö haastatteluita. Niiden pohjalta suunniteltiin toiminnallinen tuote, joka 3D-mallinnettiin tulostusta varten ja todettiin testaamalla toimivaksi.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena on kauko-ohjattava hyökkäysvaunun pienoismalli, jonka muoviosat voi valmistaa kuluttajatason 3D-tulostimella. Kuluttajatason 3D-tulostimella voidaan siis valmistaa kohtuullisen kestäviä komponentteja.</p>		
Asiasanat 3D-tulostus, kaksoistasauspyörästö, tela-ajoneuvo		

Abstract

Author(s) Aku Niemitalo	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2023
	Number of Pages 36	
Title of Publication Product design of the functional parts of a 3D-printable remote-controlled toy		
Degree, Field of Study Engineer (UAS), Mechanical Engineering		
Organisation of the client (if the thesis work is commissioned by another party)		
Abstract <p>The study investigated whether it is possible to manufacture functional components using consumer-level 3D printers. The number of 3D printers has increased significantly in recent years, leading to increased printing possibilities.</p> <p>The study involved reviewing literature, online sources, and conducting interviews with individuals. Based on this information, a functional product was designed, 3D modeled for printing, and tested to confirm its functionality.</p> <p>The result of the thesis is a remote-controlled miniature model of an attack vehicle, with its plastic parts capable of being manufactured using a consumer-level 3D printer. Therefore, it is possible to produce reasonably durable components using such printers.</p>		
Keywords 3D-Printing, Dual Differential, tracked vehicle.		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	3D-Tulostus	2
2.1	Menetelmät.....	2
2.1.1	SLA (stereo litho graphy)	3
2.1.2	FDM (filament deposition modeling)	3
2.2	Materiaalit	4
3	Radio-ohjattavien autojen toimintaperiaatteet	6
4	Hyökkäysvaunu T34 PS 231-1.....	7
5	Voimansiirto ja ohjaus.....	9
5.1	Hammaspyörä vaihtoehdot.....	9
5.2	Planeettapyörästö.....	10
5.3	Tasauspyörästö	11
5.4	Kytkin ja jarruohjaus	13
5.5	Kaksoistasauspyörästö ohjaus.....	14
5.6	Laskentakaavat	16
6	Suunnittelu.....	18
6.1	Telat	18
6.2	Rivipyörästö.....	18
6.3	Tukivarret	19
6.4	Vetopyörä	20
6.5	Jousitus	20
6.6	Runko	21
6.7	Koppa.....	22
6.8	Ohjaus ja voimansiirto	23
7	Lopullinen suunniteltu tuote	32
8	Johtopäätökset	34
8.1	Tavoite ja tulokset.....	34
8.2	Työn kuvaus	34
8.3	Palaute tuotteesta.....	34
8.4	Tulosten luotettavuus.....	35
8.5	Jatkokehitys ehdotukset.....	35
	Lähteet	36

1 Johdanto

Minua on aina kiinnostaneet erilaiset tekniset ja toiminnalliset laitteet. Ammattikorkeakoulu tarjoaa minulle mahdollisuuden tutustua 3D-mallintamiseen ja 3D-tulostamiseen. Tulevan ammattini myötä insinöörinä, tulen tarvitsemaan 3D-mallintamista. Aiheeseen tutustumisen jälkeen muodostuu ajatus toteuttaa ja tutkia toiminnallisen kokonaisuuden valmistaminen 3D-tulostusmenetelmillä.

Tavoitteena on suunnitella toiminnallinen tuote, jossa käytetään mahdollisimman paljon 3D-tulostettuja komponentteja. Samalla selvitetään, että onko kuluttajatasen 3D-tulostimilla mahdollista valmistaa kestäviä toiminnallisia komponentteja.

Jokainen 3D-tulostettava komponentti tarvitsee 3D-mallin, minkä pohjalta tulosteen geometria määräytyy. Mutta tästä työssä rajaan pois 3D-tulostuksen, 3D-mallintamisen ja teollisen tason 3D-tulostamisen.

Opinnäytetyön aiheeksi tarkentuu tuotekehitys, jossa valmistetaan 3D-tulostettava kauko-ohjattava pienoismalli. Tuotteen tulee muistuttaa Parolan panssarimuseossa sijaitsevaa T-34 rekisterinumerolla PS 231-1 olevaa panssarivaunua. Kauko-ohjattavan panssarivaunun runko, koppa, pyörät, telat ja vaihteisto tulostetaan 3D-tulostimella. Akselit, laakerit ja sähkökomponentit hankitaan valmiina. 3D-tulostus menetelmäksi valitaan fdm, joka on yksi yleisimmistä 3D-tulostustavoista.

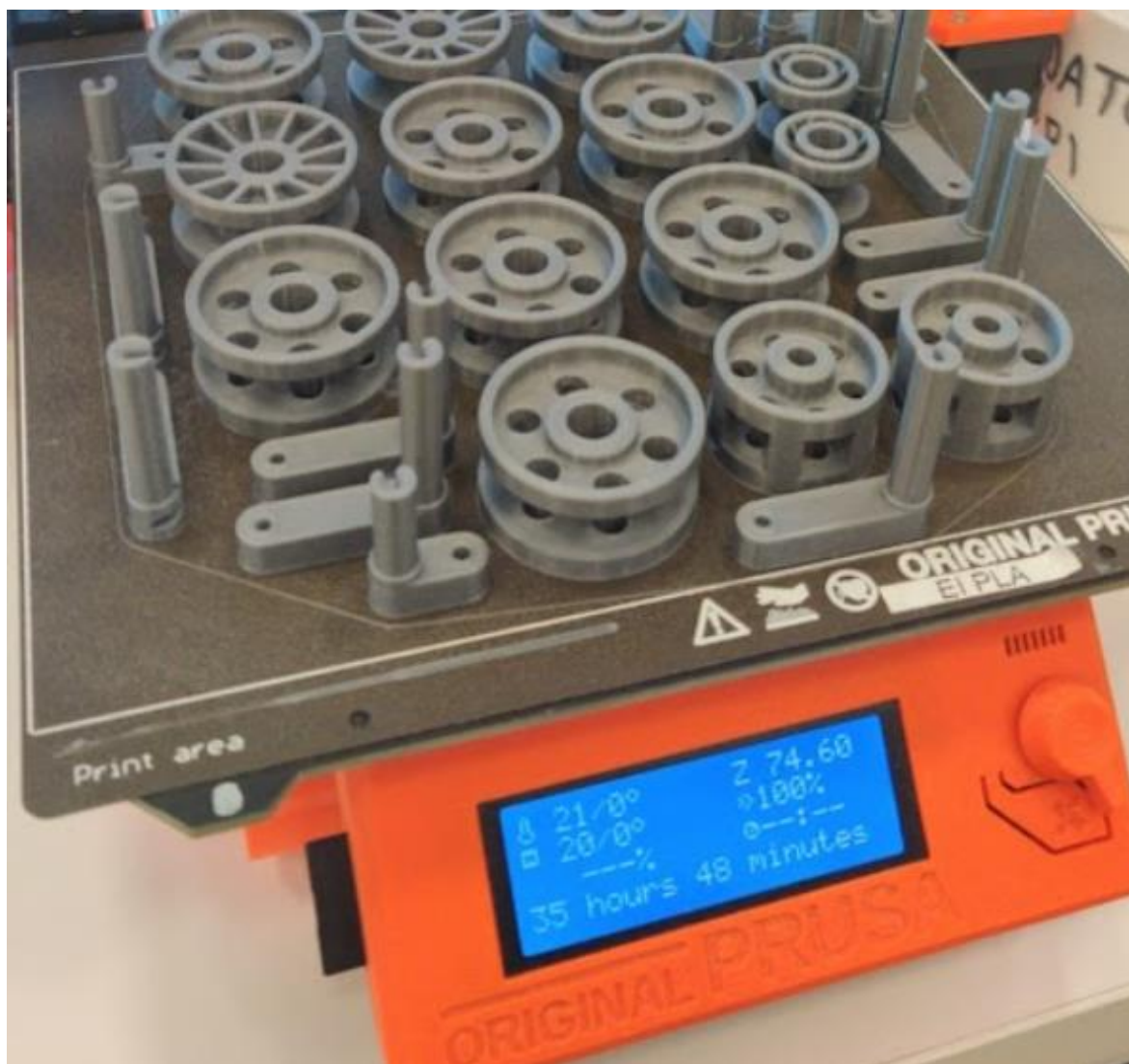
2 3D-Tulostus

2.1 Menetelmät

3D-tulostus on materiaalia lisäävä kappaleiden valmistustekniikka. Materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä mahdollistaa geometrialtaan monimutkaisempien kappaleiden valmistuksen perinteiseen materiaalia poistavaan valmistus menetelmään nähden.

(Bernier ym. 2015, ix.)

3D-tulostusprosessissa materiaalia lisätään kerroksittain. Kerrospaksuus on yleensä alle yhden millimetrin. Tuotantokustannukset pysyvät kohtuullisina yksittäisiä kappaleita tai pieniä tuotantoeriä valmistettaessa. Useamman kappaleen samanaikainen tulostaminen (Kuva 1) mahdollistaa jopa sisäkkäisten erillisten kappaleiden valmistamisen. Näin on mahdollista valmistaa esimerkiksi leluauto valmiiksi koottuna. (Bernier ym. 2015, ix.)



Kuva 1. Usean kappaleen samanaikainen tulostaminen (Kuva: Aku Niemitalo)

2.1.1 SLA (stereo litho graphy)

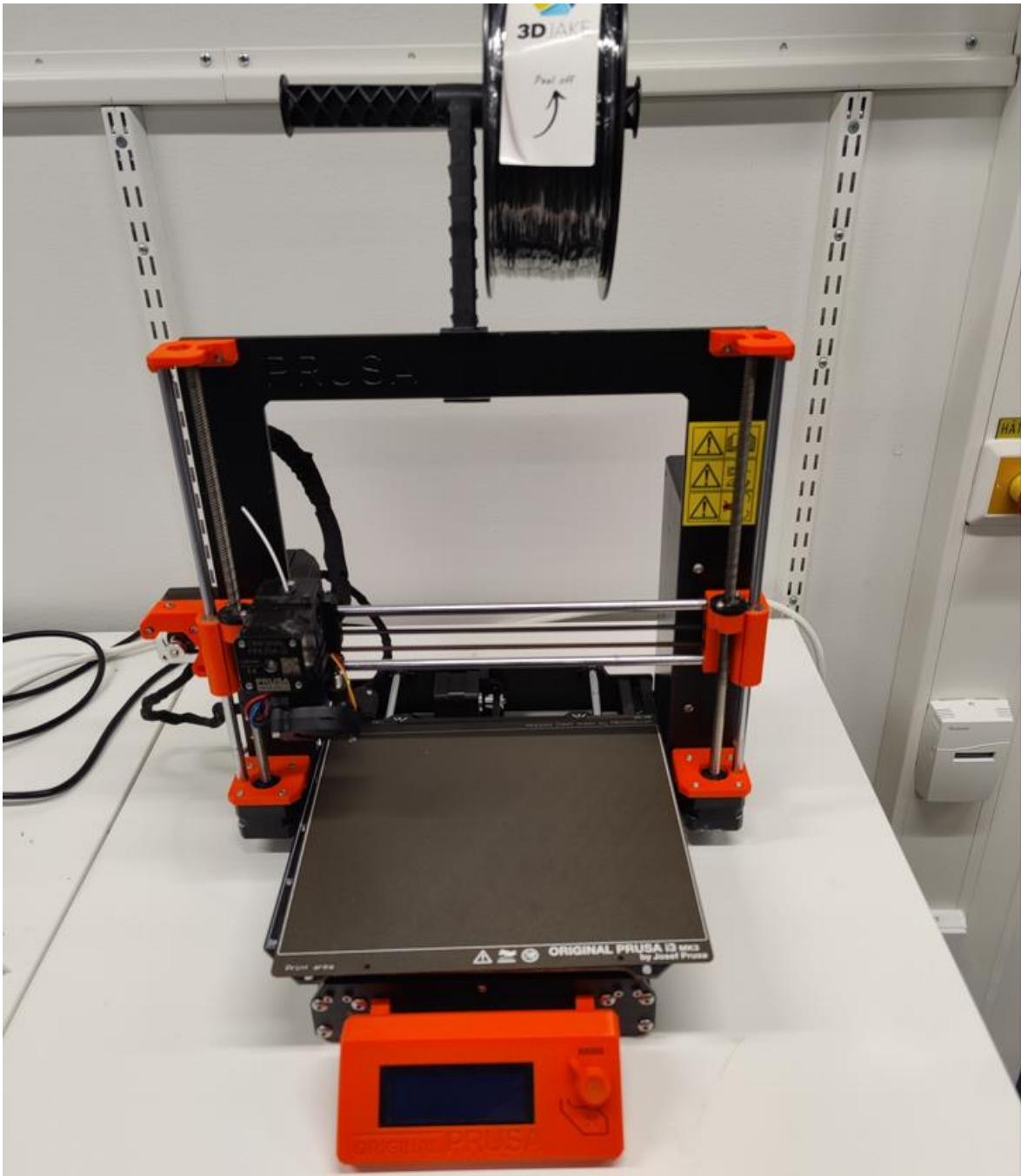
SLA- lyhenne tulee sanoista "stereo litho graphy". Menetelmän keksi Chuck Hull. Stereoliografia oli ensimmäinen patentoitu 3D-tulostus tekniikka. Chuck Hullin kehittämässä menetelmässä kohdistetulla UV-valolla kovetetaan nestemäistä valofotopolymeerihartsia kerros kerrokselta. (Bernier ym. 2015, 4.)

Valolle herkkää hartsia kaadetaan läpinäkyvään säiliöön ja lasersäde, joka on sijoitettu säiliön ylä- tai alapuolelle, ohjataan peilien avulla seuraamaan tietokoneelta lähetettyä liikerataa. Kun hartsikerrokset altistetaan voimakkaalle valolle, ne kovettuvat ja liittyvät yhteen, mikä aiheuttaa niiden muodostavan kiinteän kappaleen. Tulostetut kappaleet on upotettava liuotinkylpyyn, joka puhdistaa ylimääräisen hartsin ja pysäyttää kemiallisen reaktion. Luodut esineet voivat kovettua luonnonvalossa tai ultraviolettikuivaimella. SLA -menetelmällä valmistetut esineet ovat edelleen herkkiä UV-säteilyn vaikutukselle ja voivat vaurioitua ajan myötä halkeilemalla tai kellastumalla. (Bernier ym. 2015, 4.)

2.1.2 FDM (filament deposition modeling)

FDM lyhenne tulee sanoista "filament deposition modeling". FDM - tulostus on yksi yleisimmistä 3D-tulostustekniikoista. FDM-tekniikka keksittiin vuonna 1988, kun Scott Crump päätti valmistaa tyttärelleen lelun käyttäen kuumaliimapistoolia. (Bernier ym. 2015, 3.)

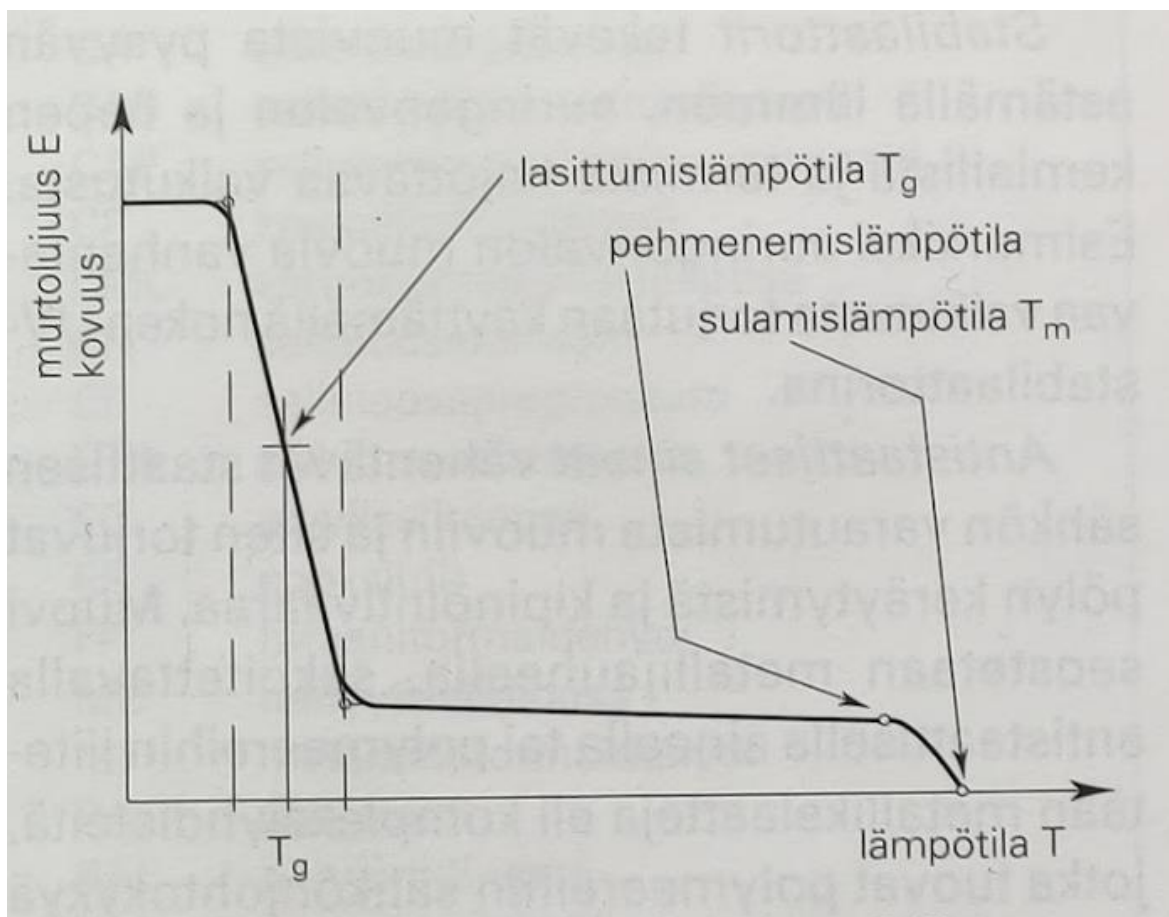
Tulostinmalli (Kuva 2) koostuu edullisista komponenteista, minkä takia tätä tulostustekniikka käyttävien 3D-tulostimien määrä markkinoilla on kasvanut räjähdysmäisesti vuodesta 2009 alkaen. Tulostusmateriaalina tässä tulostusmenetelmässä käytetään termoplastista muovia, joka on prosessoitu poikkileikkaukseltaan pyöreän muotoiseksi nauhaksi. Tätä nauhaa kutsutaan filamentiksi. Tulostusprosessin aikana tulostimen extruuderit työntää filamenttia tulostimen kuumapäähän, jossa filamentti sulaa nestemäiseen olomuotoon ja nestemäinen muovi tulee tulostimen kuumapäästä suuttimen läpi ulos. Tulostuspäätä liikuttaessa nestemäinen muovi jää haluttuun kohtaan ja jäähtyy takaisin kiinteään olomuotoon. (Bernier ym. 2015, 3.)



Kuva 2. FDM tyyppinen Prusa MK3 3D-tulostin (Kuva: Aku Niemitalo)

2.2 Materiaalit

Kestomuovien lujuusominaisuudet riippuvat voimakkaasti lämpötilasta. Muovia voidaan käyttää jäykkänä materiaalina maksimissaan pehmenemislämpötilassa, jonka jälkeen muovin jäykkyys laskee voimakkaasti. Kuvassa 3 nähdään lämpötilan vaikutuksen muovin lujuuden kuvaajaan. (Koivisto ym. 2004, 196.)



Kuva 3. Kestomuovin tärkeät lämpötilat ja lujuuden riippuvuus niistä (Koivisto ym. 2004, 196)

Muovi on kylmänä kovaa, lujaa ja haurasta. Käyttölämpötilassa muovin lujuus- ja sitkeysominaisuudet ovat tasapainossa. (Koivisto ym. 2004, 196.)

Materiaalien datalehtiä tutkimalla voidaan huomata, että PLA muovin pehmenemislämpötila on noin kuudenkymmenen Celsius asteen lämpötilassa (3DJake 2018a). Vastaavasti ABS muovin pehmenemislämpötila on noin sadan asteen lämpötilassa (3DJake 2018b). Lujutta vertailtaessa huomataan, että PLA:n Tensile strength at Yield (myöntöraja) on noin 70MPa (3DJake 2018a). ABS muovin vastaava arvo on noin 40MPa (3DJake 2018b). Joten ABS on lujudeltaan merkittävästi heikompaa, mutta se menettää mekaaniset ominaisuutensa vasta korkeammassa lämpötilassa.

3 Radio-ohjattavien autojen toimintaperiaatteet

Kauko-ohjattava auto on yleensä varustettu sähköisellä voimansiirrolla ja ohjausjärjestelmällä, jotka mahdollistavat liikkumisen eteen- ja taaksepäin sekä kääntymisen ja pysähtymisen. Tässä haastattelussa Penttilä selvittää kauko-ohjattavan auton sähköistä järjestelmää, joka muodostuu useista keskeisistä komponenteista.

Radiot

Radio-ohjaus koostuu lähettimestä ja vastaanottimesta. Lähetintä kutsutaan yleisesti kauko-ohjaimeksi. Kauko-ohjaimen avulla kuljettaja ohjaa kauko-ohjattavaa laitetta. Vastaanotin ottaa kauko-ohjaimen lähettämiä signaaleja vastaan ja välittää käskyt eteenpäin esimerkiksi moottoriohjaimelle. (Penttilä 2023.)

ESC

Moottoriohjain muokkaa akulta tulevan energian moottorille, sekä kauko-ohjaimen vastaanottimelle sopivaan muotoon. Moottorille syötettävä virta muokataan vastaanottimelta tulevan ohjauksen mukaan, jolloin moottorin pyörimisnopeus ja pyörimissuunta saadaan halutuksi. (Penttilä 2023.)

Moottorit

Moottori muuttaa moottoriohjaimelta tulevan sähköenergian liike-energiaksi. RC - autojen moottorit jaotellaan tehon ja kierrosnopeuden mukaan. Moottoreiden KV - luku kertoo moottorin pyörimisnopeuden per syötetty voltti. (Penttilä 2023.)

Akku

Nykyisin kauko-ohjattavien autojen akut ovat Li-Po tyyppisiä. Li-Po akun yhden kennon nimellisjännite on 3,7V ja täyteen ladattuna 4,2V. Yleisimmissä akuissa on kahdesta kolmeen kennoa sarjassa. (Penttilä 2023.)

Servo

Servoa käytetään kääntämään kauko-ohjattavan auton etupyöriä. Servo saa sähköenergiansa ja ohjauksen vastaanottimelta. Yleisesti käytössä olevan servon akselin liike on 180 astetta. (Penttilä 2023.)

4 Hyökkäysvaunu T34 PS 231-1

Parolan panssarimuseossa sijaitseva T-34 vaunu (Kuva 4) on puolustusvoimien rekisterinumerolla Ps 231–1. Vaunu on vuosimallia 1941 ja se on vallattu Seesjärvellä vuonna 1943. T-34 vaunuissa on kytkinjarru ohjaus, jonka kanssa esiintyi kääntymisongelmia. T-34 vaunut poistettiin suomenpuolustusvoimien käytöstä loppuun kuluneina vuonna 1961. (Teräsvalli 2010, 38.)



Kuva 4. T-34 hyökkäysvaunu kuvattuna Parolan panssarimuseossa (Kuva: Aku Niemitalo)

Isoisäni toimi vartiomiehenä ja ajajana kyseisen vaunun valtauksessa. Vihollinen oli hylännyt vaunun sen ajettua miinaan rintamalinjojen välissä. Mannerheimin ristin ritari kersantti Lauri Heino korjasi vaunun ja toimi vaunun johtajana korjaustilanteen jälkeen. (Niemitalo 1991.)

Kuvassa 5 nähdään 76 mm tykillä varustetun T-34 vaunun ominaisuuksia. T-34 vaunusta valmistettiin myös toista versiota, jossa oli 85 mm tykki. (Teräsvalli 2010, 38.)

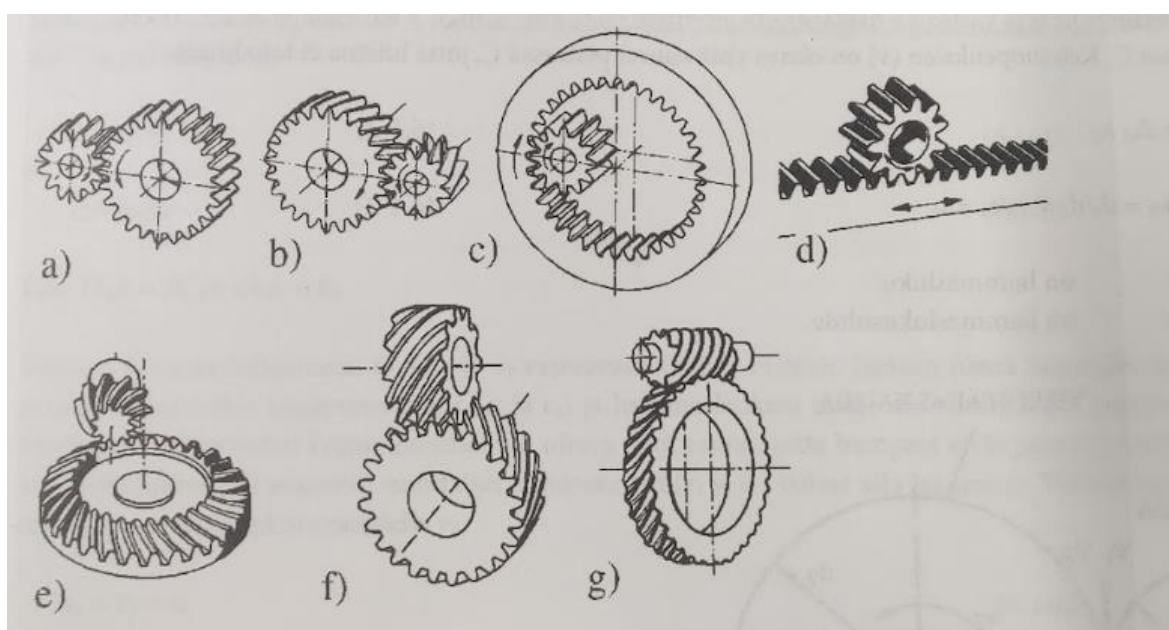
T-34-76			
Paino:	27 tonnia	Aseistus:	tykki kaliiperi 76 mm, tykin ampumatarvik- keita 77 kpl panssarinieläpääsykyky 90° iskukulmalla 500 m:n päästä 69 mm 2 x konekivääri, kaliiperi 7,62 mm
Panssarointi:	20-45 mm		
Moottori:	V-2, 12-sylinterinen, nestejäähdytteinen diesel, teho 500 hv/368 kW		
Nopeus:	55 km/h tiellä	Miehistö:	4 miestä, vaununjoh- taja samalla ampuja, lataaja, ajaja ja alako- nekiväärin ampuja
Toimintamatka:	230 km		

Kuva 5. 76 mm tykillä varustetun T34 vaunun ominaisuuksia (Teräsvalli 2010, 38)

5 Voimansiirto ja ohjaus

5.1 Hammaspyörä vaihtoehdot

Hammaspyörä on koneen tai moottorin akselille asennettava kiekko, joka on ulkokehällään varustettu hammastuksella. Hammastuksen avulla kaksi pyörää sopii toistensa lomiin ja toinen pyörä pyörittää toista vastakkaiseen suuntaan. Pyörien pyörimisnopeudet voivat olla eri suuret, jos pyörien koot ovat erilaiset. Hammaspyörävälityksellä voidaankin muuttaa pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. (Ansaharju 2009, 178.) Hammaspyöriä on ulko- tai sisähammastettuja suora- tai vinohampaisia (kuva 6).

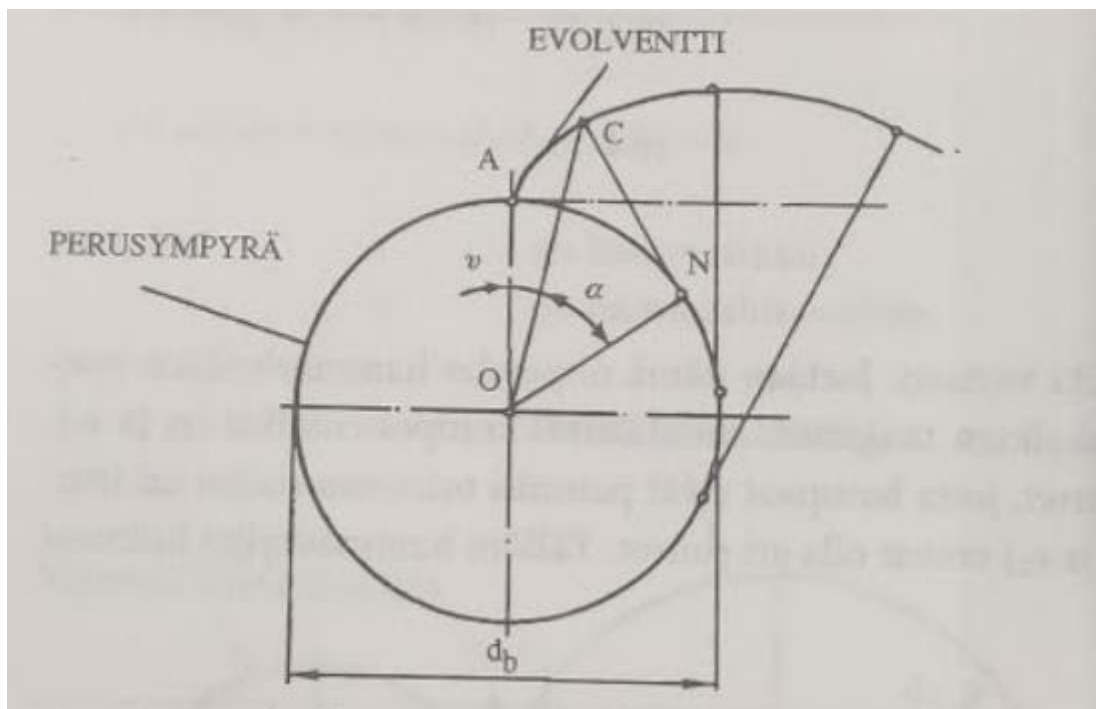


Kuva 6. Erityyppisiä hammaspyöriä (Björk ym. 2014, 329)

Kuvassa 6 nähdään Suorahampainen lieriöpyöräpari(a), Vinohampainen lieriöpyöräpari (b), Sisähammastettu lieriöpyöräpari (c), Hammaspyörä-hammastanko (d), Kartiohammaspyöräpari (e), Ruuvipyöräpari (f) ja Kierukka ja kierukkapyörä (g). (Björk ym. 2014, 329).

Hammaspyörien valmistus tapahtuu yleensä jyrsimällä. Hammaspyöriä valmistetaan erilaisista materiaaleista, kuten muovista, pronssista, valuraudasta, valuterästä tai karkaisusta hiili- tai nuorrutusteräksestä. Hampaat on muotoiltava määrämuotoisesti, jotta ne pysyvät kosketuksissa toisiinsa. Yleisesti käytetään evolventtimuotoa (kuva 7). Hampai-

den välinen kitka olisi hyvä pysyä mahdollisimman pienenä, että hampaat eivät kuluisi. (Ansaharju 2009, 178.)

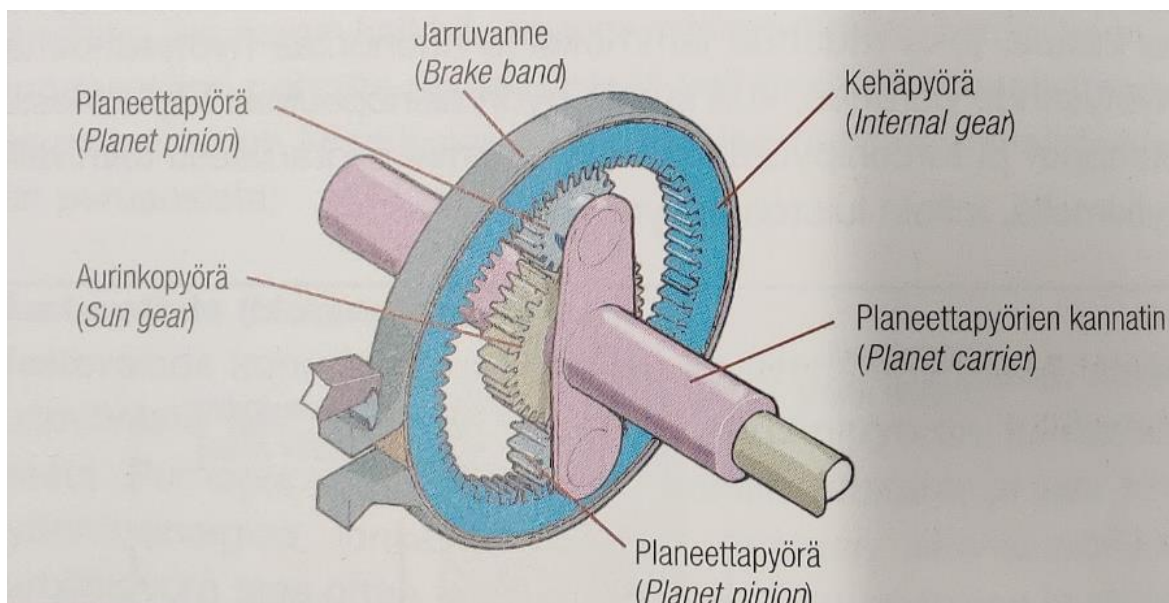


Kuva 7. Evolventtimuoto (björk ym. 2014, 332)

Björk ym. (2014, 332) kuvailee kirjassaan evolventtimuotoa seuraavasti: Avattaessa kiekon kehälle kierrettyä lankaa niin, että lanka pysyy koko ajan kireällä, langan pää piirtää evolventtimuodon (kuva 7).

5.2 Planeettapyörästä

Planeettapyörästä (kuva 8) koostuu aurinkopyörästä, planeettapyörästä, planeettakannattimesta ja kehäpyörästä. Keskellä olevaa ratasta nimitetään aurinkopyöräksi. Aurinkopyörän ympärillä on planeettapyörät, jotka ovat kiinni planeettakannattimessa. Planeettapyörärien ulkopuolella on kehäpyörä. (Nieminen 2005, 179–180.)

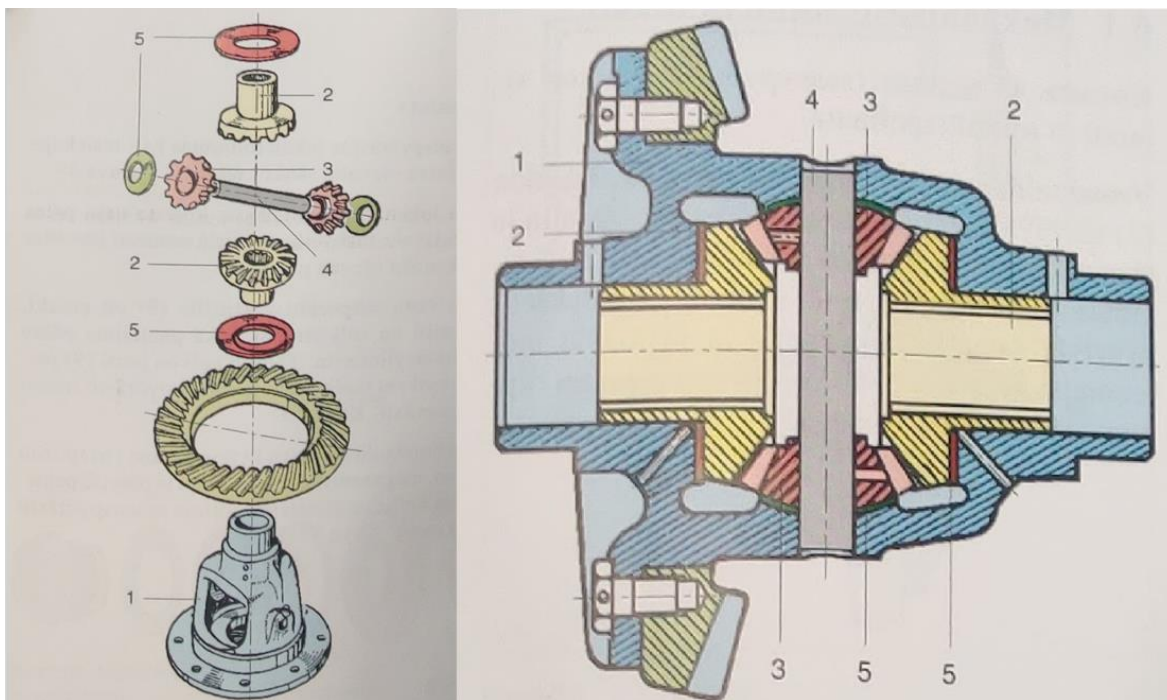


Kuva 8. Planeettapyörästö (Nieminen 2005, 180)

Planeettapyörästöllä saadaan aikaiseksi useita erilaisia välityssuhteita riippuen siitä, että lukitaanko kehäpyörä, aurinkopyörä vai planeetakannatin. Kehäpyörä lukitsemalla saadaan aikaiseksi suurin välityssuhde. Kun planeettapyörästön kaksi osaa lukitaan toisiinsa, saadaan välityssuhteeksi 1. (Torniainen 2006, 45–47.)

5.3 Tasauspyörästö

Tasauspyörästöä (kuva 9) tarvitaan esimerkiksi auton vetävällä akselilla, koska kaarre ajossa ulkokaarteeseen puoleinen pyörä joutuu kulkemaan pidemmän matkan, kuin sisäkaarteeseen puoleinen pyörä. Tasauspyörästö mahdollistaa samalla akselille olevalle kahdelle ulostulolle eri pyörimisnopeudet. (Torniainen 2006, 157.)



Kuva 9. Kartiohammaspyörillä toteutettu tasauspyörästö (Torniainen 2006, 157)

Kuvassa 9 on esitetty kartiohammaspyörillä toteutettu tasauspyörästö, joka koostuu tasauspyörästön kotelosta (1), kahdesta isosta tasauspyörästä (2) ja kahdesta, tai neljästä pienestä tasauspyörästä (3). Tasauspyörästön koteloon on liitetty lautaspöytä, johon tuodaan tasauspyörästöä pyörittävä voima. (Torniainen 2006, 157.)

Biermann ym. (2013) esittämässä konferenssijulkaisussa kerrotaan tutkimuksesta, jossa tutkittiin tasauspyörästöjen parannuksia painon ja koon osalta. Schaeffler KG oli yksi projektiin osallistuneista teollisuuspartnereista ja aloitti jatkotutkimukset projektissa kehitettyjen tasauspyörästöprototyyppien pohjalta. (Biermann 2013, Pokelan 2019, 21 mukaan.)

Schaefflerin jatkotutkimuksien perusteella syntyi planeettapyörästöön perustuva tasauspyörästö (Kuva 10), joka oli toteutettu suorahampaisilla hammaspyörillä. Näin tasauspyörästöstä saatiin pienempi ja kevyempi. (Biermann 2013, Pokelan 2019, 21–22 mukaan.)

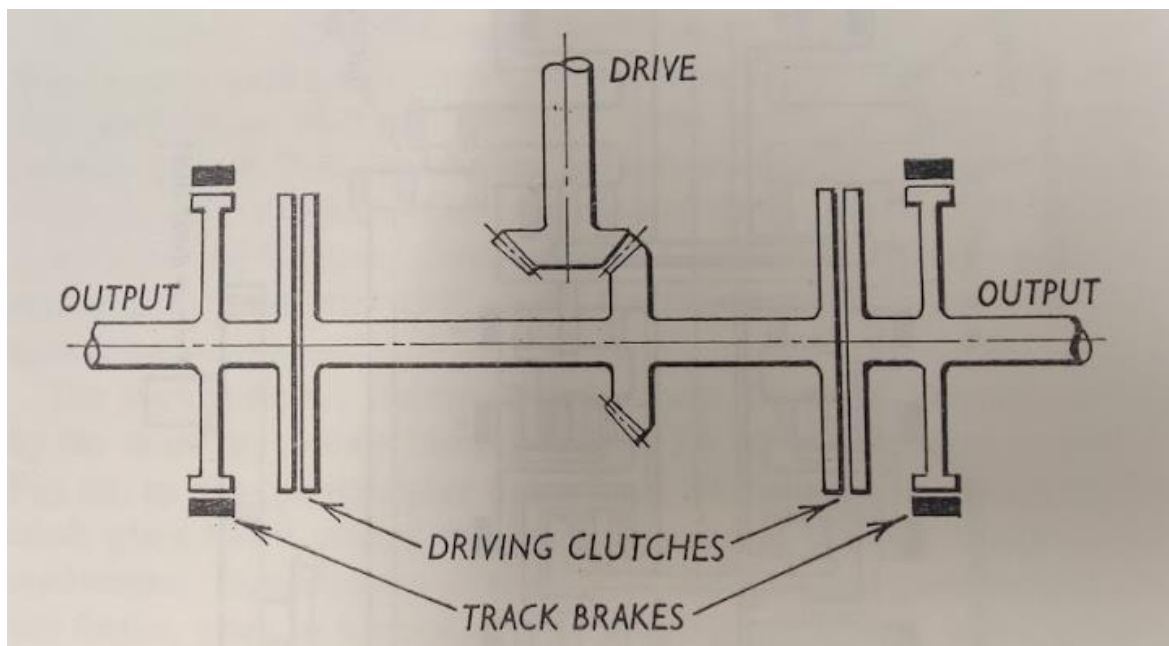


Kuva 10. Schaefflerin jatkotutkimuksena syntyneen kevyen tasauspyörästön variantti suorahampaisilla hammaspyörillä (Biermann 2013, Pokelan 2019, 21 mukaan)

5.4 Kytkin ja jarruohjaus

Ogorkiewicz jakaa kirjassaan tela-alustaisten ajoneuvojen ohjauksen kahteen eri ryhmään toimintaperiaatteen mukaan. Ensimmäisen ryhmän toiminta perustuu tasauspyörästöön ja sen eri versioihin, joissa ajovoima välitetään katkeamattomana molemmille teloille. Toisen ryhmän muodostavat kytkin-ja-jarru ja vaihteelliset ohjaustavat, joissa ajovoimaa ei välitetä molemmille teloille käännettäessä. (Ogorkiewicz 1968, 110.)

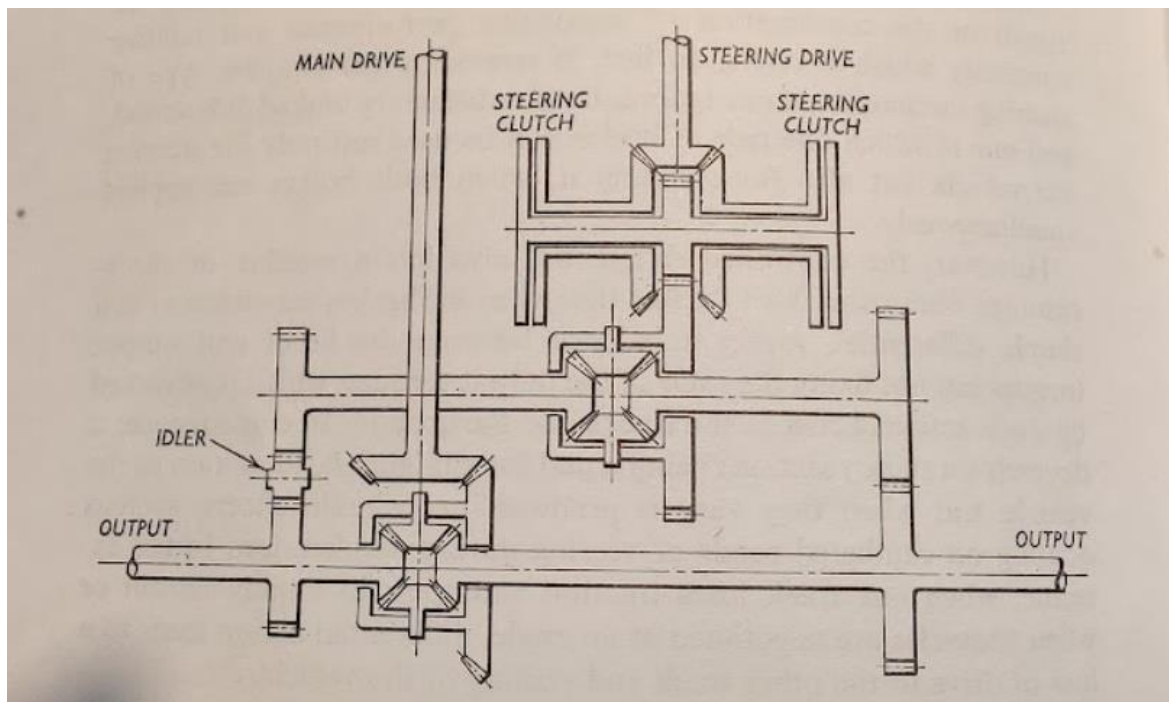
Toisen ryhmän alkupään kytkin- ja jarruohjauksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa (Kuva 11). Käännettäessä vapautetaan sisäkaarteeseen puoleisen telan kytkin, jolloin voima ei enää välity telalle. Jarrulla voidaan tehostaa kääntymistä. (Ogorkiewicz 1968, 120.)



Kuva 11. Kytkin ja jarru ohjaus (Ogorkiewicz 1968, 122)

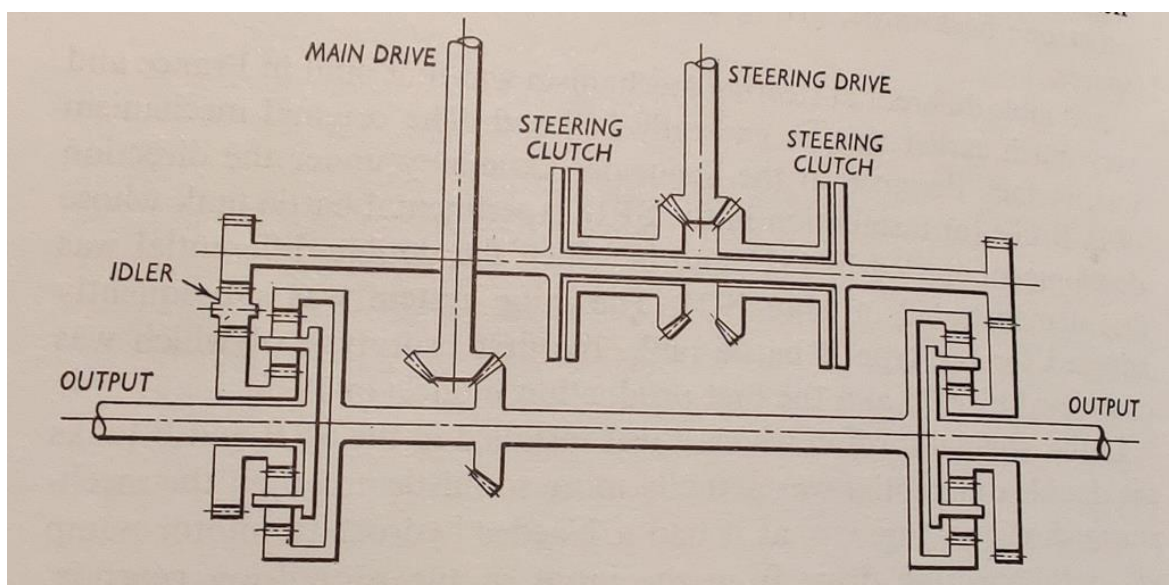
5.5 Kaksoistasauspyörästä ohjaus

Kaksoistasauspyörästä (Kuva 12) koostuu kahdesta rinnan asennetusta tasauspyörästä, joiden ulostuloakselit on liitetty yhteen. Toisen tasauspyörästä ajoakseli saa voimansa vaihdelaatikon päätehoakselilta ja toisen tasauspyörästä ajoakseli saa voimansa vaihdelaatikon ohittavalta ohjausakselilta. Tällä ratkaisulla kääntösäde riippuu käytettävästä vaihteesta. Toisin sanoen jokaisella vaihteella on oma kääntösäteensä. Pienillä vaihteilla kääntösäde on pieni ja isoilla vaihteilla kääntösäde on suurempi. Käännettäessä vaunua vaihteen ollessa vapaalla toinen telaketju pyörii eteenpäin ja toinen telaketju pyörii taaksepäin, jolloin vaunu kääntyy paikallaan. Kaksoistasauspyörästä ohjauksessa energiaa ei kulu jarruihin, vaan hidastuvan telaketjun energia siirtyy kiihtyvälle telaketjulle. (Ogorkiewicz 1968, 114.)



Kuva 12. Kaksoistasauspyörästö (Ogorkiewicz, 1968 114)

Vastaava ohjausvaihteisto (Kuva 13) voidaan valmistaa kahdesta planeettapyörästöstä ja yhdestä tasauspyörästöstä. Ulostuloakseleille voima välittyy planeettapyörästöjen planeetakannattimilta. Vaihteiston päätehoakselilta voima johdetaan planeettapyörästöjen kehäpyörille. Ohjaisvoima johdetaan planeettapyörästöjen aurinkopyörille eri suuntaisena. (Ogorkiewicz 1968, 116.)



Kuva 13. Kaksoistasauspyörästö planeettavaihteilla (Ogorkiewicz, R. 1968 116)

5.6 Laskentakaavat

Vääntösauvan halkaisija saadaan kaavalla 1.

$$\varphi = \frac{32l}{G\pi d^4} \cdot M$$

d = vääntäjousen halkaisija

φ = kiertymäkulma

M = vääntömomentti

l = vääntäjousen pituus

G = liukumoduuli

Kaava 1. Vääntösauvan halkaisija (Valtanen 933)

Kun kehäpyörä on lukittu niin, planeettavaihteen välityssuhde saadaan laskettua kaavalla 2.

$$i = 1 + \frac{z_1}{z_3}$$

i = välityssuhde

z_1 = kehäpyörän hammasluku

z_3 = aurinkopyörän hammasluku

Kaava 2. (Torniainen 2006, 46)

Hammaspyöräparin välityssuhde voidaan laskea kaavalla 3.

$$i = \frac{z_2}{z_1}$$

i = välityssuhde

z = hammaspyörän hammasluku

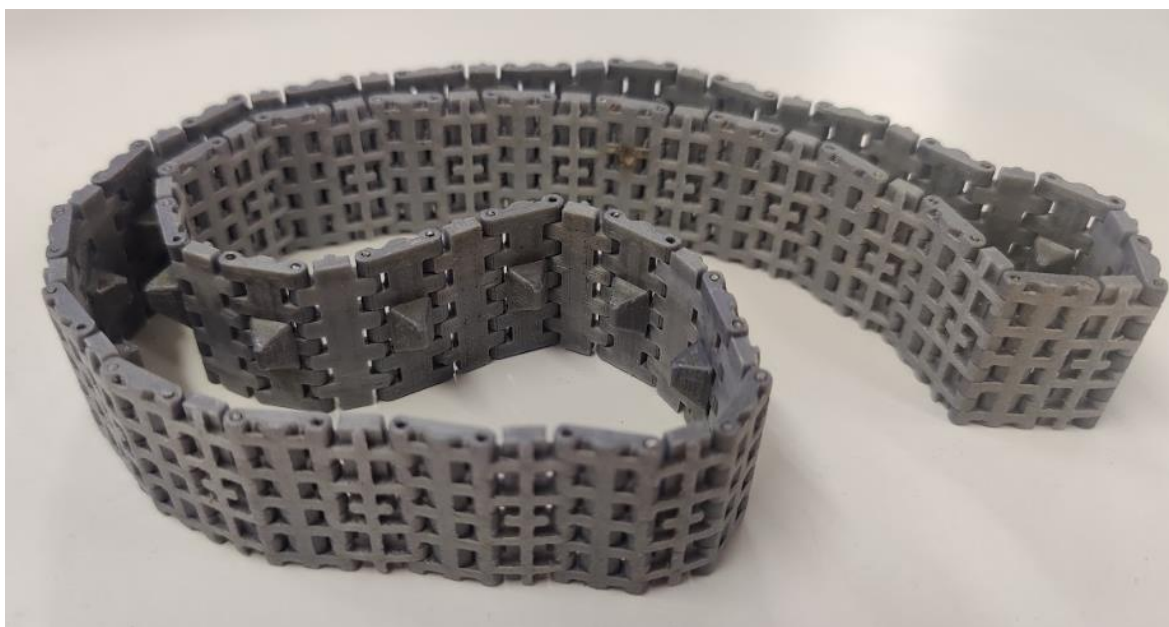
Kaava 3. (Björk ym. 2014, 330)

6 Suunnittelu

6.1 Telat

Telat (kuva 14) suunniteltiin alkuperäisen kaltaisiksi. Teloista jouduttiin suunnittelemaan kaksi eri versiota toimivaan lopputulokseen pääsemiseksi. Ensimmäisen version ongelmat liittyivät telatapin paikallaan pysymiseen. Ensimmäisessä mallissa kaikki telatapin reiät olivat halkaisijaltaan samankokoisia. Tämän takia telatapit eivät pysyneet paikaltaan ja liukuessaan telasta ulos aiheuttivat telan nopeuden takia merkittävää vaaraa.

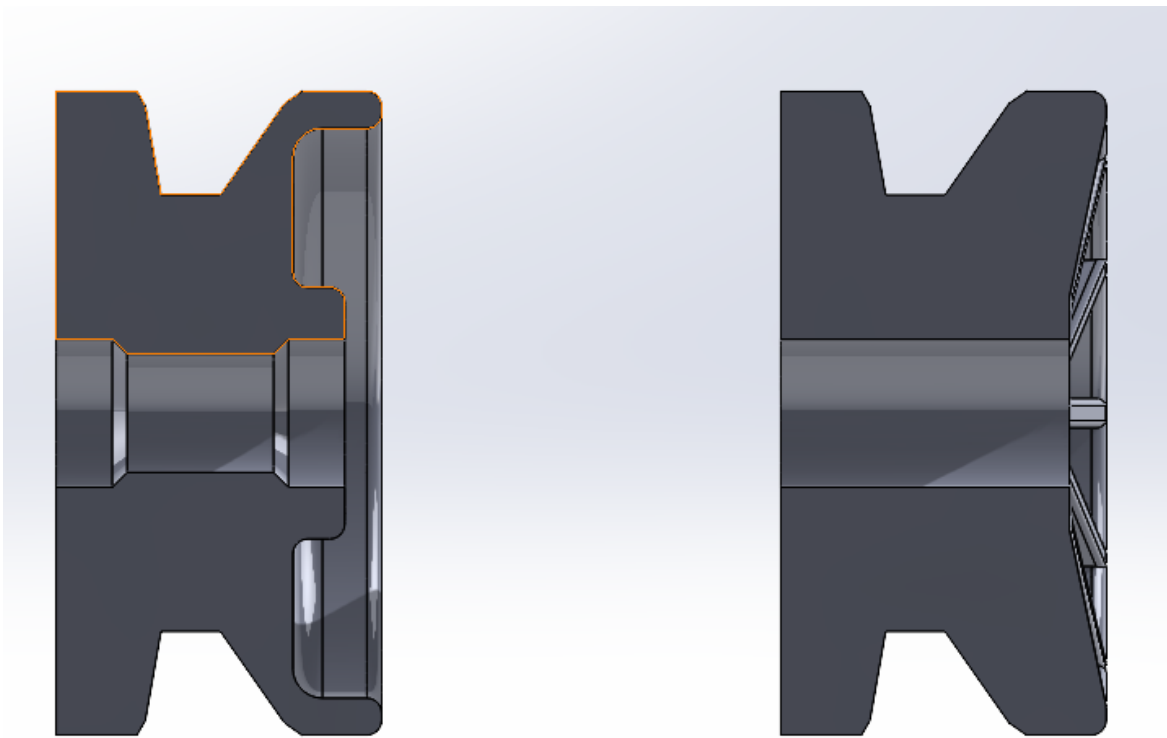
Toisessa versiossa joka toisen telalapun telatapin rei'istä tehtiin suurempia, jolloin telatappi pysyy tiukemmalla sovitteella olevissa telalapuissa paikallaan, ja liike pääsi tapahtumaan väljemmissä rei'issä.



Kuva 14. Telaketju (Kuva: Aku Niemitalo)

6.2 Rivipyörästä

Kuvassa 15 oikealla puolella nähdään rivipyörän ensimmäinen versio, joka oli laakeroitu laipallisilla MF104 kuulalaakereilla. Laakerin laippa rajoitti laakeria menemästä liian syväälle laakerille tarkoitettuun laakeripesään. Laipallisten laakereiden saatavuus oli heikompi ja ne olivat kalliimpia.



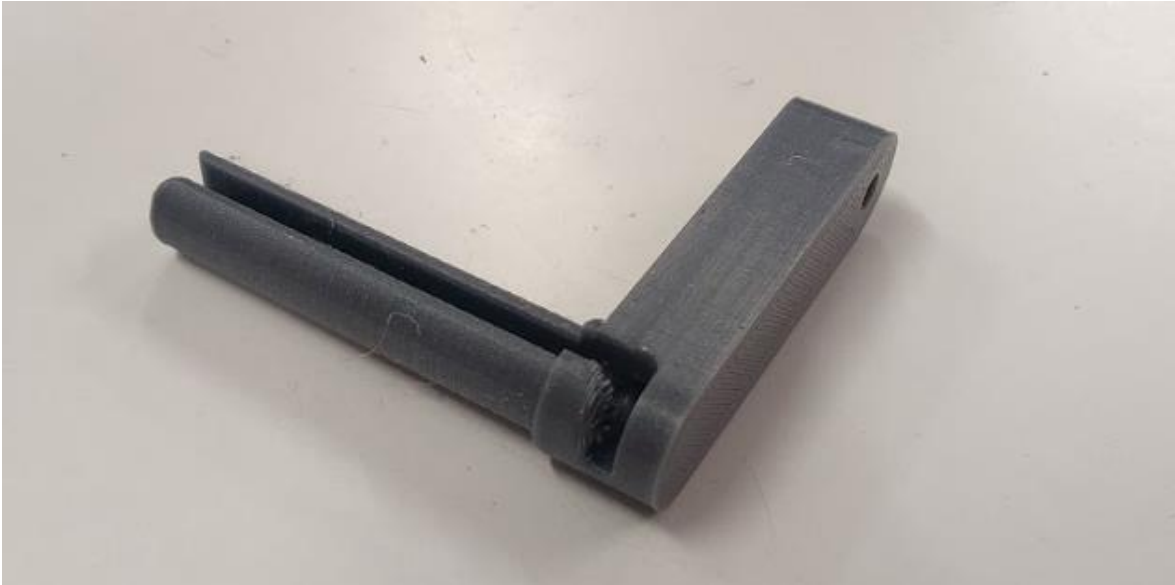
Kuva 15. Poikkileikkaus uudesta ja vanhasta rivipyörän versiosta (Kuva: Aku Niemitalo)

Rivipyörien ja taittopyörien mallia muutettiin niin, että laakereiden taakse tuli olake kuvasa 15 vasemmalla, mikä rajoitti laakereita menemästä liian syvälle, jolloin pystyttiin käyttämään edullisempia MR104ZZ kuulalaakereita. Rivipyörien ja taittopyörien akseleina toimii DIN 9785 standardin mukaiset M4x30 uraruuvit, joilla pyörät kiinnitetään tukivarsiin.

6.3 Tukivarret

Tukivarressa (kuva 16) oli akseliruuvia varten ensin 3.5 mm reikä, johon akseliruuvin pystyi voimaa käyttäen kiertämään suoraan, tai kierteittämään kierteen ruuvia varten. Kierteitetty kierre oli kuitenkin niin löysä, että akseliruuvit lähtivät ajan kanssa avautumaan. Ilman kierteitystä ruuvien linjaus suhteessa tukivarren akseliin oli haastavaa.

Viimeisimmässä versiossa tukivarren 3D-mallissa on akseliruuvien reikään mallinnettu kierre valmiiksi puoleenväliin reikää asti, jolloin akseliruuvi lähtee kierteelle helposti ja tukivarren kierteetön osuus huolehtii akselin paikallaan pysymisestä.



Kuva 16. Rivipyörien tukivarsi (Kuva: Aku Niemitalo)

6.4 Vetopyörä

Telapyörästä vetopyörä mallinnettiin sivuprofiililtaan umpinaiseksi. Koeajojen yhteydessä todettiin suojalumen paakkuuntuvan vetopyörässä oleviin telan vetopiikeille tarkoitettuihin koloihin. Lumen täyttäessä vetopyörän kolot telassa olevat vetopiikit eivät mahtuneet niille tarkoitettuihin koloihin. Pakkaantuneen lumen takia telaketju kiristyi liian kireälle, joka kuormitti vetoakselin laakereita liikaa.

Toisessa versiossa vetopyörään mallinnettiin akselin suuntaiset reiät vetopiikkien kolojen kohdalle. Lisättyjen reikien kautta koloihin joutunut lumi pääsi poistumaan. Ratkaisu todettiin uusissa koeajoissa toimivaksi.

6.5 Jousitus

Jousitus suunniteltiin tukivarsien akseleiden sisäpäähän tulevien vipuvarsien päähän asennettujen vetojousien, tai kuminauhojen avulla toteutettavaksi. Tämä ratkaisu hylättiin kuitenkin 3D-mallinnus vaiheessa, koska se vaati liikaa tilaa vaunun sisältä.

Vähemmän tilaa vieväksi ratkaisuksi osoittautui vääntösauva tyyppinen jousitus, joka mahtui kokonaan pohjarakenteen sisälle. Tukivarren sisään mallinnettiin reikä ja tukivarren akseliin akselin suuntainen ura vääntösauvaa varten. Vääntösauva työnnettiin ensin tukivarren sisään ja käännettiin sitten akselissa olevaan uraan (kuva 17).

Vaunun runkoon mallinnettiin vaunun pituussuuntaiset urat vääntösauvoille. Tällä rakenteella vääntösauva pitää tukivarren paikallaan vaunussa. Vääntösauva valmistettiin pyöreästä jousiteräslangasta.

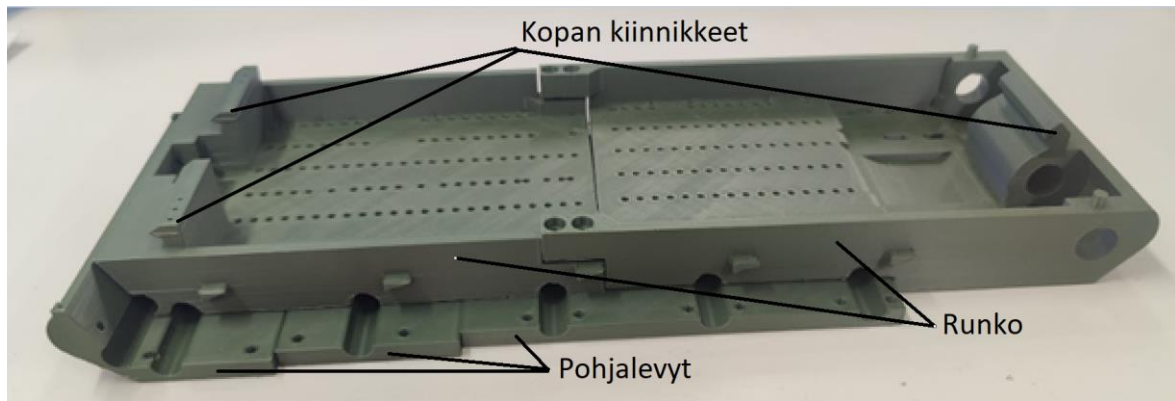


Kuva 17. Vääntösauvajousi paikallan tukivarressa (Kuva: Aku Niemitalo)

Vääntösauva suunniteltiin mahdollisimman pitkäksi, jotta joustosta ei tulisi liian jämäkkä. Vaunun paino on 2 kg, joka jakaantuu kaikkien kymmenen rivipyörän päälle, jolloin yhteen rivipyörään kohdistuva massa on 0,2 kg. Tukivarren akselin ja rivipyörän akselin etäisyys on 38 mm. Vääntösauvan pituus on 58mm ja tavoiteltu jouston määrä 25mm, jolloin kaavalla 1 saadaan vääntösauvan halkaisijaksi laskettua 1.5mm.

6.6 Runko

Runko koostuu pohjalevyistä ja varsinaisesta rungosta (Kuva 18). Rivipyörien ja taittopyörien tukivarret ja vääntösauvat kiinnittyvät pohjalevyn ja rungon väliin. Ensimmäisessä runkoversiossa pohjalevyjä oli kaksi. Takimmaisena pohjalevyn ja rungon väliin tuli kuusi kappaletta vääntösauvoja ja tukivarsia. Kokoonpano vaiheessa oli kuitenkin haasteita saada niin montaa tukivartta pidettyä samanaikaisesti paikallaan, kun pohjalevyä asetettiin paikalleen.



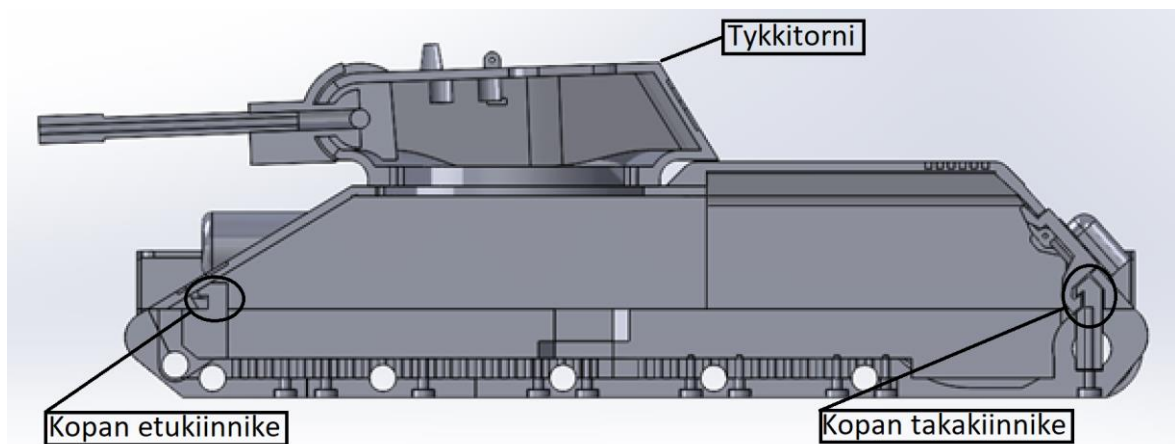
Kuva 18. Runko ja pohjalevyt (Kuva: Aku Niemitalo)

Seuraavassa versiossa pohjalevy jaettiin kolmeen osaan. Tämä helpotti kokoonpanoa, koska yhden pohjalevyn alle ei tullut niin montaa tukivartta.

Koeajon aikana rungossa olevat kopankiinnikkeet murtuivat törmäyksissä. Murtuneen kiinnikkeen korjaamiseksi oli tulostettava uusi runko. Kiinnikkeet ja runko suunniteltiin uudelleen niin, että kiinnikkeet ovat erillisiä osia. Nyt kiinnikkeen murtuessa ei tarvitse tulos-
taa muuta, kuin uusi kiinnike.

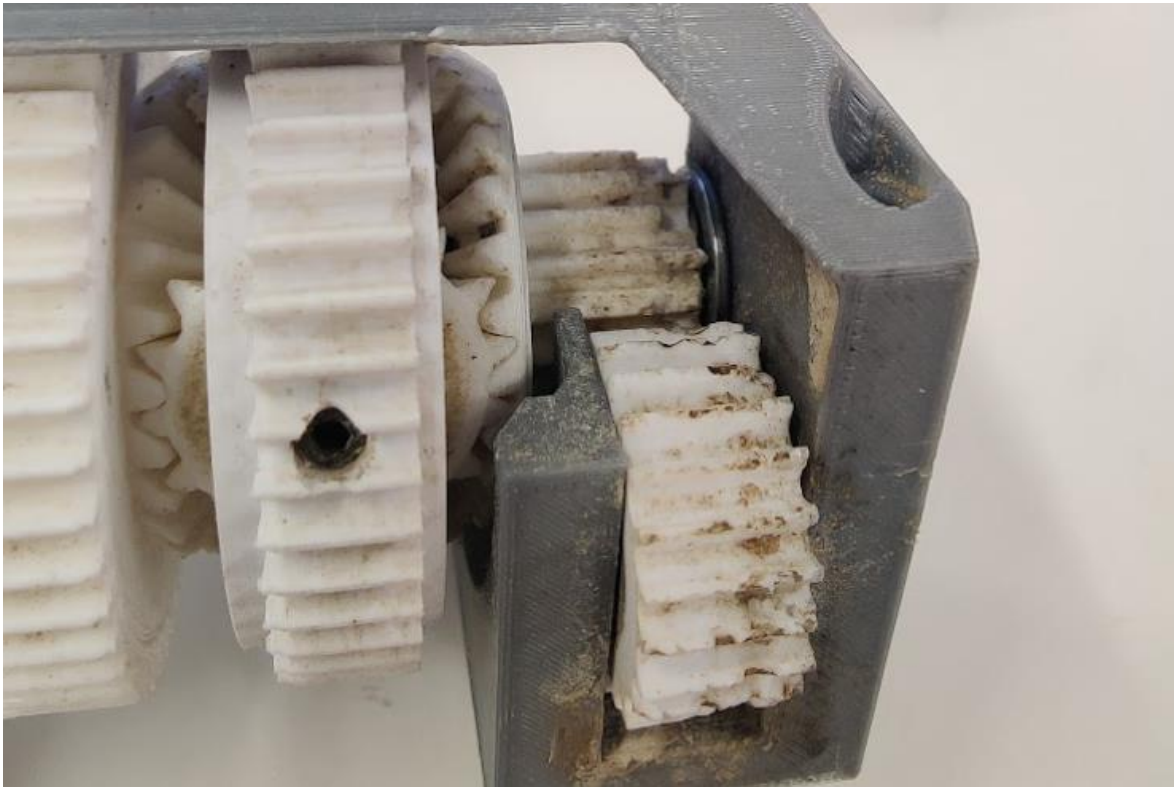
6.7 Koppa

Koppa (kuva 19) kiinnitettiin runkoon ensimmäisessä versiossa ruuveilla. Kiinnitys osoit-
tautui työlääksi ja kiinnitys tapa suunniteltiin uudestaan. Uudessa kiinnitysmekanismissa
rungon etupäässä on "kynnet", joiden alle kopan voi liu'uttaa. Kopan takapäähän suunni-
teltiin vaihteiston huoltoluukun mallinen keinuva nappi, jonka alapäässä on "kynsi" joka
lukittuu rungon takapäässä olevaan vastakappaleeseen, kun koppa painetaan paikalleen.



Kuva19. Poikkileikkaus vaunun rungosta, kopasta ja tykkitornista (Kuva: Aku Niemitalo)

Ensimmäisessä kopan mallissa vaihteiston päällä olevat jäähdytysilmaritilät olivat avoimet. Koeajot osoittivat tämän ratkaisun ongelmalliseksi. Hiekalla ajettaessa telat heittivät hiekkaa ilmaan. Osa hiekasta päätyi avointen ritilöiden läpi vaihteistoon ja aiheutti vauriota vaihteiston hammaspyörille (Kuva 20). Tämän takia ritilät mallinnettiin umpinaisiksi. Vähentynyt jäähdytysilma ei nostanut kopan sisällä olevaa lämpötilaa merkittävästi. Umpinainen kopan rakenne saattaa kuitenkin aiheuttaa ongelmia lämpöisemmissä olosuhteissa. Koeajoissa korkeimmat ulkolämpötilat ovat olleet noin 30 astetta.



Kuva 20. Hiekasta vaurioituneita rattaita (Kuva: Aku Niemitalo)

6.8 Ohjaus ja voimansiirto

Ohjaus ja voimansiirto kävivät läpi monta kehitysversiota, ennen kuin ominaisuuksiltaan ja kestävyydeltään päästiin haluttuun lopputulokseen. Tela-alustaisissa ajoneuvoissa ohjaus toteutetaan jollain tavalla yhteistyössä vaihteiston kanssa, koska telaa ei voi kääntää.

Versio 1

Ensimmäinen versio vaihteistosta (kuva 21) oli kytkin- ja jarrutyypinen. Telojen ja voimansiirron aiheuttaman kitkan ajateltiin aiheuttavan tarpeellisen määrän jarruttavaa voimaa ja vaihteistoon ei suunniteltu erillistä jarrua.

Moottorin jälkeen oli alennusvaihteisto, jonka jälkeen molemmille teloille oli omat planeettapyörästöt. Planeettapyörästöjen jälkeen oli vielä yhdet alennusvaihteet ennen vetoakse-

leita. Kytin oli toteutettu kauko-ohjattavan auton ohjausservolla, joka vapautti planeettapyörästä kehäpyörän lukitsevan lukkolevyn sisäkaarten puoleiselta telalta. Tällä vaihteistolla laskennallinen vaunun huippunopeus oli noin 15km/h.



Kuva 21. Vaihteiston ensimmäinen versio ilman ohjaus komponentteja (Kuva: Aku Niemitalo)

Koeajossa planeettapyörästä planeettapyörät sulivat kitkan vaikutuksesta. Kuvassa 22 voimme nähdä planeettavaihteiston sulaneita hammaspyöriä. Kuvassa oleva tutti auttaa hahmottamaan mittasuhteita. Kun sulaneet hammaspyörät jäätyivät, eikä planeettavaihteisto toiminut, niin välityssuhde muuttui ja vaunun huippunopeus oli noin 60 km/h. Kaikki muut osat vaikuttivat kestäväen kasvaneen huippunopeuden, jonka takia alkuperäiseen tavoitteeseen huippunopeuden suhteen tehtiin muutos.

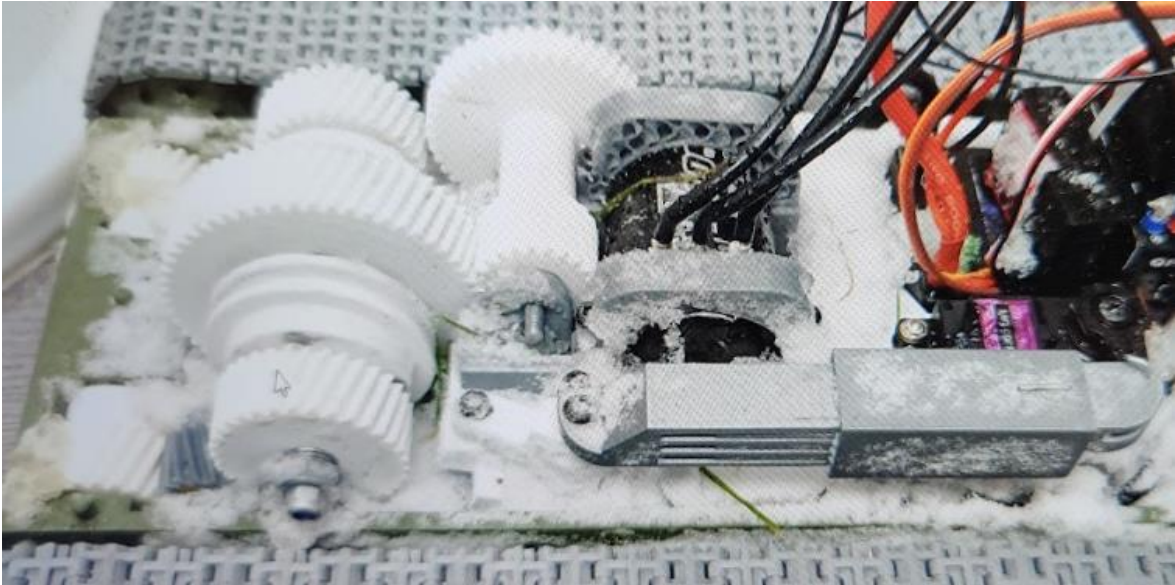


Kuva 22. Sulanut planeettavaihteisto (Kuva: Aku Niemitalo)

Versio 2

Toisessa versiossa vaihteistoa planeettavaihteistot korvattiin tappikytkimillä, jolloin sulavat hammaspyörät eivät enää olleet ongelma. Toinen versio vaihteistosta (kuva 23) oli myös kytkin- ja jarrutyypinen. Moottorin jälkeen oli alennusvaihte, jonka jälkeen molemmille teloille oli oma ”tappikytkin”, jolla pystyttiin vapauttamaan veto telalta.

Ohjaus oli toteutettu servolla, joka vipumekanismin avulla liikutti tappikytkimien liukuholkkeja. Ratkaisu oli ennakko-odotuksista huolimatta yllättävän kestävä, vaikka ajon aikana kääntyminen aiheutti tappikytkimeen mekaanisia rasituksia. Laskettu huippunopeus tällä vaihteistolla oli noin 50 km/h.



Kuva 23. Tappikytkimillä toteutettu kytkin ja jarru vaihteisto lumisen koeajon jälkeen (Kuva: Aku Niemitalo)

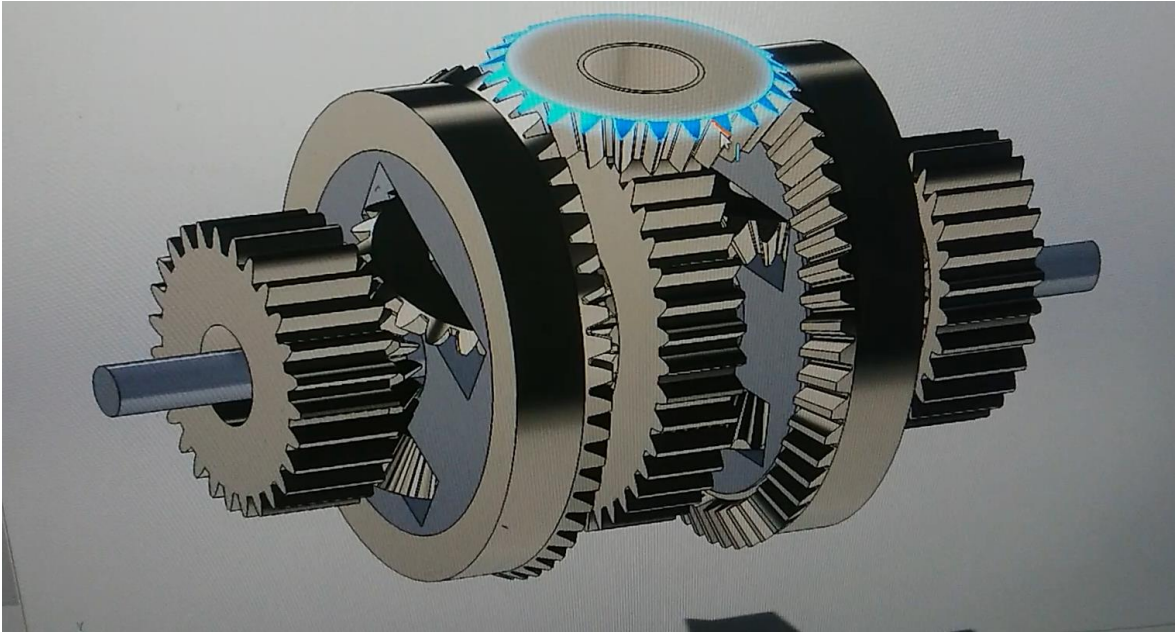
Ongelma tämän vaihteiston kanssa oli kääntyminen alustalla mistä kohdistui paljon kitkaa teloihin. Sisäkaarten puoleisen telan vedon katkaisu ei riittänyt vaunun kääntämiseen, vaan sisäkaarten puoleista telaa olisi pitänyt myös jarruttaa, koska telan ja vaihteiston muodostama kitka ei ollut riittävän suuri. 3D-mallinnus vaiheessa huomattiin, että jarrujen rakentaminen olisi tehnyt vaihteistosta liian suuren, eikä vaihteisto olisi enää mahtunut kopan sisään. Laskettu huippunopeus tällä vaihteistolla oli noin 50 km/h.

Versio 3

Kolmas versio vaihteistosta oli kaksoistasauspyörästä (kuva 24) tyyppinen. Tällä vaihteistotyypillä ei vetoa vapauteta kummaltakaan telalta kääntymistilanteessa, vaan sisäkaarten puoleisen telan nopeutta hidastetaan ja ulkokaarten puoleisen telan nopeutta nopeatetaan kääntömoottorilla. Jolloin kumpikaan tela ei rullaa vapaasti missään tilanteessa ja telojen nopeusero pakottaa vaunun kääntymään.

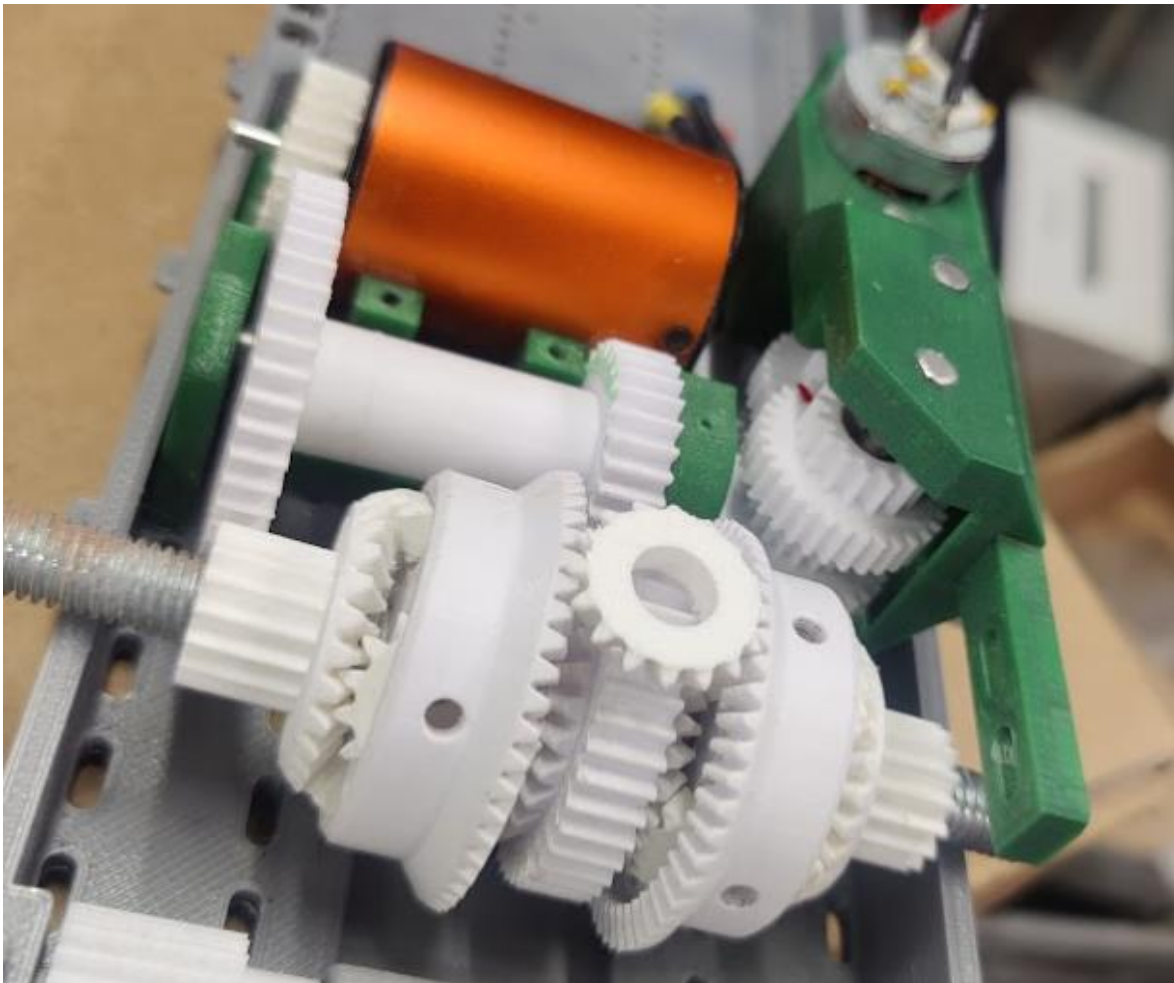
Kaksoistasauspyörästä toteutettiin eri tavalla, kuin Ogorkiewicz kirjassaan sen toiminnan esittää. Samalle akselille sijoitettuna kaksoistasauspyörästäön toimintaperiaate on sama, mutta se mahtuu pienempään tilaan

Vaihteisto koostui ajomoottorista lueteltuna alennusvaihteesta, jonka jälkeen molemmille teloille on oma tasauspyörästä. Ajovoima tulee tasauspyörästäöjen välissä olevalle hammaspyörälle ja ulkolaidoilta voima välittyy alennusvaihteen kautta vetoakseleille. Kääntövoima tulee tasauspyörästäönkotelon ulkolaidoilla oleville kartiohammaspyörille välihammaspyörältä, jolloin tasauspyörästäönkotelot pyörivät eri suuntiin kääntövoimalla.



Kuva 24. Kaksoistasauspyörästö (Kuva: Aku Niemitalo)

Kuvassa 25 näkyy väriltään oranssi ajomoottori ja sen vieressä käänmömoottorin takapää. Käänmömoottori on pystyssä suoramampaisilla rattailla toteutetun käännön alennusvaihteistossa, josta voima välitettiin välirattailla tassaupyörästöjen lautaspyörille. Välirattaat eivät ole havainnekuvassa esillä.



Kuva 25. Vaihteiston havainnekuva (Kuva: Aku Niemitalo)

Kartiohammaspyörät kuitenkin aiheuttivat tasauspyörästöjen koteloihin taivutusmomenttia liikaa. Tätä olisi voinut korjata siirtämällä tasauspyörästöjen koteloiden laakereita kauemmaksi toisistaan, mutta tasauspyörästöakselista hammaspyörineen olisi tullut liian leveä vaunuun.

Tällä vaihteistolla vaunun ohjattavuus parani huomattavasti, mutta tasauspyörien kanssa oli haasteita. Tasauspyörät lämpenivät muutaman minuutin koeajon jälkeen niin paljon, että ne sulivat (kuva 26).

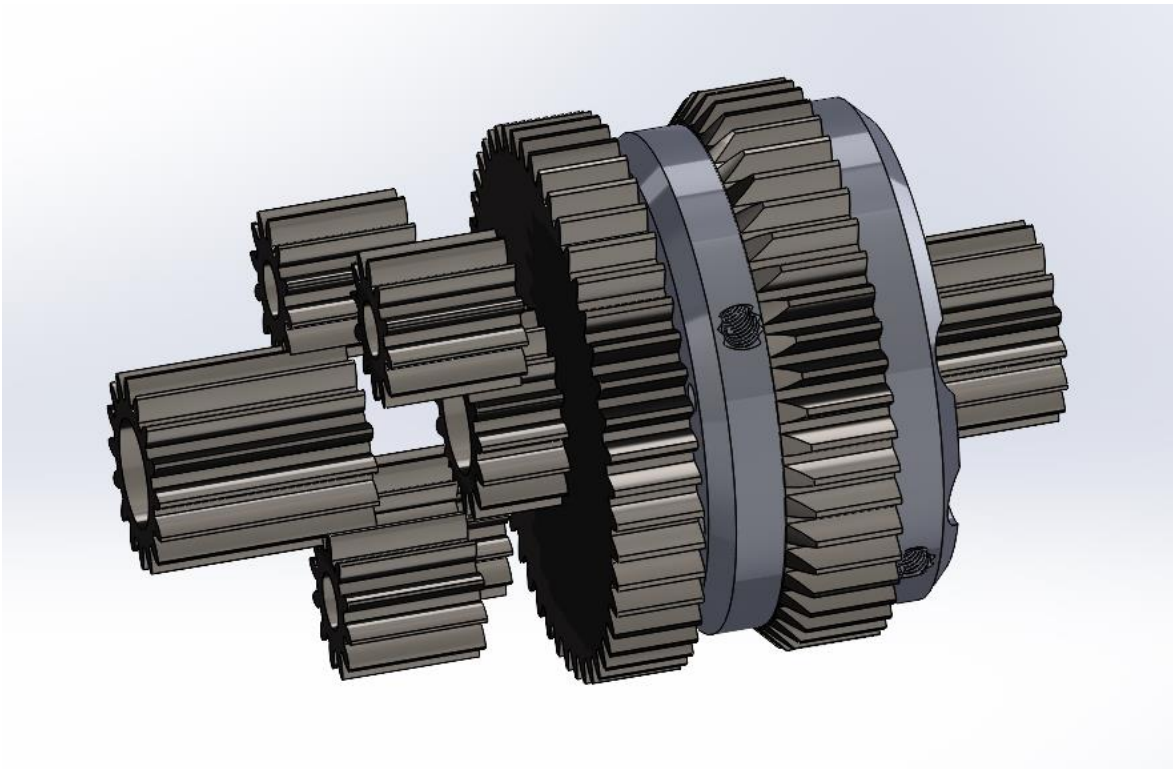


Kuva 26. Sulaneet tasauspyörästäön tasauspyörät (Kuva: Aku Niemitalo)

Versio 4

Seuraavaksi tasauspyörästä toteutettiin kartiohampaisten hammaspyörien sijasta suorahampaisilla hammaspyörillä (kuva 27). Pienien tasauspyörien pienen halkaisijan vuoksi pienet tasauspyörät jouduttiin laakeroimaan liukulaakeri tyyppisesti. Liukulaakerointi aiheutti mahdollisesti suurempaa vierintävastusta, kun kuulalaakerit. Koeajojen perusteella lämpenemisongelmasta ei päästy eroon ja hammaspyörät sulivat.

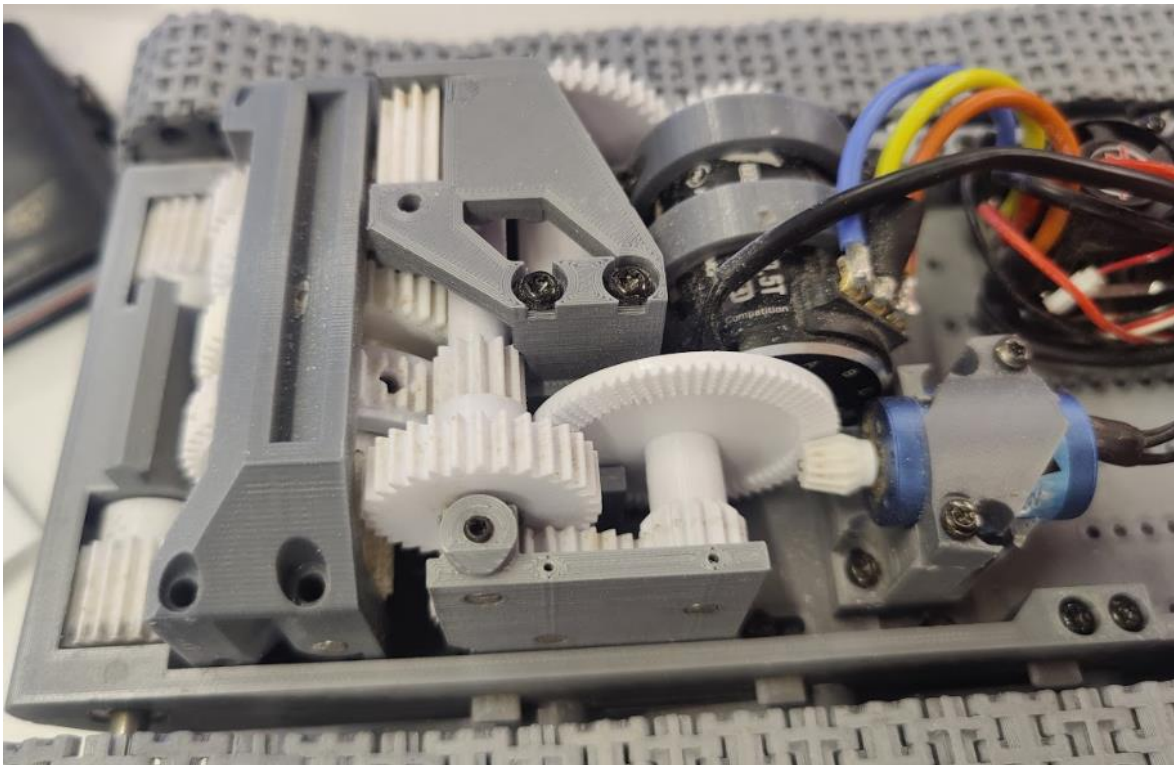
Tasauspyörästäön koteloiden kartiorattaat korvattiin suorahampaisilla rattailla, jolloin hammaskosketus aiheuttaa ainoastaan säteittäisvoimaa tasauspyörästäön koteloille. Toiselle tasauspyörästäölle kääntövoima täytyi tuoda kuitenkin välirattaan kautta, että tasauspyörästäön pyörimissuunnat ovat erisuuntaisia. Kartiorattaiden vaihto suorahampaisiin aiheutti myös ohjausmoottorinalennusvaihteen ja moottorin akseleiden kääntämisen vaakatasoon. Ajomoottori vei jo vaunun leveysuunnassa kuitenkin sen verran tilaa, että ohjausmoottori oli käännettävä vaunun pituussuuntaan. Kääntömoottorin pituussuuntaisen asemoinnin takia moottorin ensiövalitys täytyi tehdä kartiohammaspyörillä.



Kuva 27. Planeettapyörästöön perustuva tasauspyörästö lieriömäisillä hammaspyörillä (Kuva: Aku Niemitalo)

Versio 5

Seuraavassa vaihteisto konstruktiossa (kuva 28) palattiin tasauspyörästön osalta perinteisiin kartion mallisiin hammaspyöriin. Isojen tasauspyörien halkaisijaa kasvatettiin niin paljon, kun tasauspyörästön kotelo mahdollisti, jolloin hammaspyörien hampaisiin kohdistuva pintapaine pieneni. Koeajo osoitti, että tilanne parani. Mutta siltikään hammaspyörien sulamisongelmista ei päästy eroon.



Kuva 28. Viimeisin vaihteisto konstruktio (Kuva: Aku Niemitalo)

Versio 6

Vaihtoehtoina tässä vaiheessa oli suunnitella toiminnaltaan täysin erilainen uusi vaihteisto, tai saada hammaspyörät kestävämpään materiaalin ominaisuuksien kautta. Vaihteiston toiminta ajo ominaisuuksien puolesta oli niin hyvä, että vaihteiston rakenne päätettiin pitää sellaisenaan ja kestävyyttä lähdettiin hakemaan materiaalien ominaisuuksien kautta.

Tasauspyörästä sulavat rattaat päätettiin valmistaa ABS muovista, jolla on korkeampi pehmenemislämpötila. ABS muovista tulostetut tasauspyörästä rattaat osoittautuivat koeajojen perusteella kestäviksi, vaikka lujuus ominaisuudet olivat heikommalla materiaalin käyttölämpötila-alueella.

Koeajoja suoritettiin 2 ja 3 kennoisilla Li-Po akuilla. 2800Kv ja 4300Kv moottoreilla. 3 kennoisella akulla, 4300Kv moottorilla ja täydellä akulla laskennallinen huippunopeus oli noin 80 km/h, jonka vaunu kesti koeajoissa hyvin. 80 km/h nopeus oli ohjattavuuden kannalta niin suuri, että tuotteeseen päädyttiin suosittelemaan 2 kennoista akkua ja 3800Kv moottoria, joilla huippunopeus laskee noin 50 km/h nopeuteen.

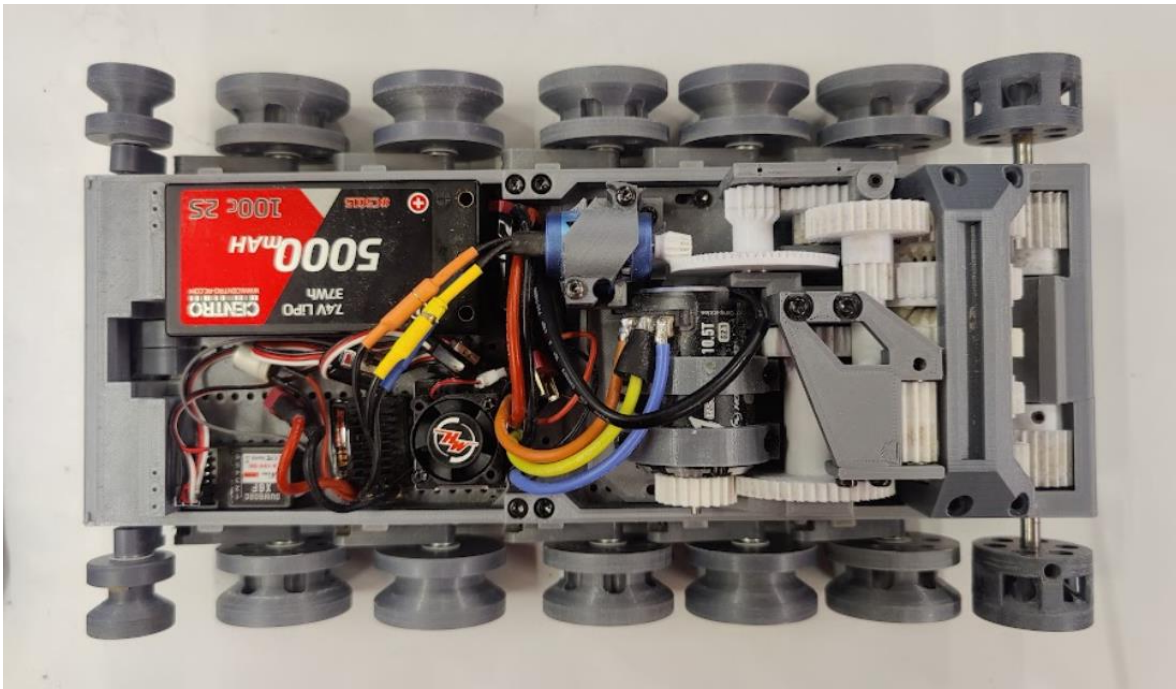
7 Lopullinen suunniteltu tuote

Opinnäytetyössä eri kehitysvaiheiden jälkeen suunnitellusta tuotteesta (kuva 29) saatiin kestävä ja hyvin toimiva. Vaunun ulkomuoto ei muuttunut kehitysvaiheiden edetessä. Kuvassa 30 nähdään panssarivaunun tekniikka sijoitettuna vaunun runkoon. Tekniikasta oli tuotekehityksen aikana monta eri versiota, ennen toimivaa ratkaisua.

Kauko-ohjattava panssarivaunu on mittasuhteeltaan 1/20. Se on pituudeltaan 317 mm ilman tykinputkea. Leveydeltään vaunu on 183 mm ja korkeudeltaan 133 mm. Huippunopeus suositellulla akulla ja moottorilla on noin 50 km/h. Joustovaraa jousituksessa on 12 millimetriä. Vaihteiston välityssuhde on noin $i=5.3$.



Kuva 29. 3D-tulostamalla valmistettu kauko-ohjattava panssarivaunu ilman miehistöluukua (Kuva: Aku Niemitalo)



Kuva 30. Viimeisin versio vaunun tekniikasta (Kuva: Aku Niemitalo)

8 Johtopäätökset

8.1 Tavoite ja tulokset

Tavoitteena oli suunnitella toiminnallinen tuote, jossa käytetään mahdollisimman paljon 3D-tulostettuja komponentteja. Haluttiin myös selvittää, onko kuluttajatasen 3D-tulostimilla mahdollista valmistaa kestäviä ja toiminnallisia komponentteja. Opinnäytetyössä huomattiin, että kuluttajatasen 3D-tulostimella on mahdollista valmistaa kohtalaisen kestäviä toiminnallisia komponentteja.

Kaikkia tässä työssä valmistettuja komponentteja ei ollut mahdollista valmistaa PLA - muovista. Osassa vaihteiston hammaspyöriä PLA - muovi ei kestänyt, koska hammaspyörät sulivat. ABS - muovin lujuusominaisuudet ovat heikommat, kuin PLA – muovin, mutta hammaspyörät saatiin kestävämmän ABS - muovista valmistettuna ABS – muovin korkeamman pehmenemislämpötilan takia. ABS - muovi on tulostettavissa suurimmalla osalla markkinoilla olevista kuluttajatasen 3D-tulostimista.

8.2 Työn kuvaus

Työssä suunniteltiin 3D-tulostettava kauko-ohjattava panssarivaunun pienoismalli. Suunnittelun jälkeen 3D-mallinnettiin 3D-mallit 3D-tulostusta varten. 3D-tulostuksen jälkeen tuote testattiin ja tehtiin mahdolliset muutokset 3D-malliin, jonka jälkeen 3D-tulostettiin uusi muokattu versio. Lopulta koeajojen kautta kauko-ohjattava panssarivaunu todettiin toimivaksi ja valmiiksi tuotteeksi.

Tuotteen ollessa valmis, kuvattiin tuotteen kokoonpanosta ohjevideot, jotka editoitiin julkaisua varten. 3D-mallit ohjevideoineen julkaistiin ”Printables.com” internet sivustolle.

8.3 Palaute tuotteesta

”Printables.com” on 3D-tulostukseen käytettävien 3d-mallien julkaisuun keskittynyt internet sivusto, jonne käyttäjät voivat ladata omia malleja muille jaettavaksi (Průša 2022). Opinnäytetyössä kehitetty tuote julkaistiin edellä mainitulla sivustolla osoitteessa <https://www.printables.com/social/122448-aku-n/models> yhdeksässä eri kokonaisuudessa, joista viimeinen julkaisu julkaistiin 14.1.2022.

Palautteen myötä ilmeni, että Suomen panssarijoukoissa kansallistunnuksena käytetty hakaristi, joka oli mallinnettuna kauko-ohjattavaan panssarivaunuun, oli kuitenkin kielletty symboli joissain maissa. Myöhemmin julkaistiin kopan ja tykkitornin mallit ilman hakaristitunnusta lisäosina.

Tuote on selkeästi kiinnostanut 3D-tulostajia, koska julkaisuja on nyt maaliskuussa 2023 käyty lataamassa yhteensä yli tuhat kertaa. Suunniteltua tuotetta voidaan pitää onnistuneena saadun palautteen perusteella, koska palaute on ollut positiivista.

8.4 Tulosten luotettavuus

Tässä tutkimuksessa käytettiin muoviosien tulostimena Prusa i3 MK3S 3D-tulostinta. Markkinoilla on kuluttajille tarkoitettuja 3D-tulostimia tarjolla hyvin eritasoisia. Käytäntö on osoittanut, että eri valmistajien laitteilla tulostus laaduissa on merkittäviä eroja. Tämä näkyy sekä tulostus jäljessä, mittatarkkuudessa että myös osien kestävydessä. Prusan tulostus laadun ollessa kotikäyttöön tarkoitetuista printtereistä keskitasoa huomattavasti parempi, jäi valitettavasti tutkimatta, voidaanko osia valmistaa riittävällä tarkkuudella ja kestävyydellä myös laadullisesti vaatimattomimmilla kotikäyttöön tarkoitetuilla 3D printtereillä.

8.5 Jatkokehitys ehdotukset

Tulevaisuudessa panssarivaunun kopan malliin voisi lisätä yksityiskohtia esimerkiksi lamput ja radioantennin. Vaihteiston osalta voisi tutkia saisiko siitä pienemmän ilman, että kestävyys kärsii. Esimerkiksi: SLA tulostus menetelmällä sen tarkemman resoluution takia. Jatkuvasti kehittyvät 3D-tulostus materiaalit saattaisivat myös mahdollistaa pienempien hammaspyörien tulostamisen ilman, että niiden kestävyys kärsii.

Lähteet

- 3Djake. 1.9.2018a. 3DJAKE ecoPLA. Niceshops GmbH. Technical Data Sheet. Viitattu 27.3.2023. Saatavissa [https://c-3d.niceshops.com/upload/file/Technical_Data_Sheet\[0\].pdf](https://c-3d.niceshops.com/upload/file/Technical_Data_Sheet[0].pdf)
- 3Djake. 1.9.2018b. 3DJAKE niceABS. Niceshops GmbH. Technical Data Sheet. Viitattu 27.3.2023. Saatavissa https://c-3d.niceshops.com/upload/file/Technical_Data_Sheet.pdf
- Ansaharju, T. 2009. Koneenasennus ja kunnossapito. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit OY
- Bernier, S., Luyt, B. & Reinhard, T. 2015. Make: Design for 3D Printing. San Francisco, CA: Maker Media, inc.
- Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P. & Sanoma Pro OY. 2014. Koneenosien suunnittelu. Helsinki: Sanoma pro OY
- Blom, S., Lahtinen P., Nuutio E., Pekkola K., Pyy S., Rautiainen H., Sampo A., Seppänen P., Suosara. 2001. Koneenelimet ja mekanismit. Helsinki: Edita Oyj
- Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P., Tuomikoski, J. 2004. Konetekniikan Materiaalioppi. Helsinki: Edita Prima OY
- Nieminen, S. 2005. Auton rakenne 1 Moottori ja tehonsiirto. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö
- Niemitalo, E. 1991. Veteraani. Haastattelu xx.xx.1991.
- Ogorkiewicz, R. 1968 Design and development of fighting vehicles. Great Britain London: Macdonald
- Penttilä, M. 2023. Insinööri. Haastattelu 27.2.2023.
- Průša, J. 2022. PrusaPrinters.org is now Printables.com – The Ultimate Database of 3D Models for Everyone!. Viitattu 29.3.2023. Saatavissa https://blog.prusa3d.com/prusaprinters-org-is-now-printables-com-ultimate-database-of-3d-models-for-everyone_66880/
- Schönberg, K. 2021. 3D-tulostuksen teollinen läpimurto saavuttamassa vihdoinkin Suomen – voi jopa tuoda tehtaita takaisin maailmalta. YLE. Viitattu 22.3.2023. Saatavissa <https://yle.fi/a/3-11782958>
- Teräsvalli, T. 2010. Parolan Panssarimuseo. Hämeenlinna: Ilves-Paino Oy

Torniainen, K. 2006. Auto- ja kuljetusalan erikoistumisoppi. Helsinki: Otava

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-Kirjat

