

Samioskari Kekäläinen

**NAPAMOOTTORIN INTEGROINTI  
ERILLISJOUSITETTUUN ALUSTAAN**  
Hydrauliikan ja pneumatiikan rakennesuunnittelu

Diplomityö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Prof. Kalevi Huhtala  
Yliopiston leht. Petteri Multanen  
Lokakuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Samioskari Kekäläinen: Napamoottorin integrointi erillisjousitettuun alustaan:  
Hydrauliikan ja pneumatiikan rakennesuunnittelu  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Lokakuu 2020

---

Tämä työ on osa Tampereen yliopiston automaatiotekniikan diplomi-insinööritutkintoa ja sen toimeksiantaja on Patria Land Oy. Työssä suunnitellaan sähköisen napamoottorin integrointi Patrian tuotteissa käytettävään erillisjousitettuun alustaan. Käytännössä tämä tarkoittaa pyöräntuentaan liittyvän hydrauliikan ja pneumatiikan rakennesuunnittelua eli letkujen, kaapeleiden ja hydropneumaattisen jousielementin suunnittelua. Tuenta suunnitellaan ainoastaan etuvasemmalle pyöräntuennalle siten, että sitä monistamalla saadaan toteutettua kokonainen panssariajoneuvon alusta.

Suunnittelussa on pyritty noudattamaan Patrian tuotteistamisprosessia. Lisäksi työssä luodaan katsaus Patrian kilpailijoiden vastaaviin ratkaisuihin ja tekniikan alan kehitykseen. Suunnittelu tehdään Siemens NX -3D-suunniteluohjelmistolla. Samalla osana työtä tehdään letkujen 3D-mallinnusohje *deformable partina* Patrian sisäiseen käyttöön.

Konsepti pohjautuu ajoneuvolle ja konseptille määriteltyihin vaatimuksiin, jotka perustuvat tuotteistamisprosessin osana järjestetyissä katselmuksissa esille nousseisiin tekijöihin, Patrian vaatimuksiin sekä erilaisiin teknisiin spesifikaatioihin ja standardeihin. Vaatimusten perusteella konseptiin valittiin sähköinen napamoottori, jota muokattiin AMV:hen sopivaksi, ja jonka ympärille pyöräntuenta suunniteltiin. Lisäksi pyöräntuentaan konseptoitui Patrialle uudenlainen hydropneumaattinen jousielementti, joka sijoitetaan lähes vaakatasoon apurungon sisälle. Tämän jälkeen mallinnettuun pyöräntuentaan suunniteltiin letku- ja kaapelirakenne, jonka tavoitteena on olla mahdollisimman käyttövarma ja luotettava sekä täyttää konseptin vaatimukset.

Napamoottori vaatii toimiakseen yhteensä viisi letkua ja viisi kaapelia. Letkut ovat: kaksi jäähdytysnesteletkua, yksi sisään- ja toinen ulosvirtaukselle, yksi jarrunesteletku, yksi renkaantäyttöjärjestelmän letku ja yksi multitube-letku napamoottorin pneumaattiselle vaihteensiirrolle. Lisäksi moottori vaatii kolme korkeajännitekaapelia sekä kaksi datakaapelia antureille. Johtimet reititetään siten, että ne kulkevat mahdollisimman suojassa ja taipumisen kannalta edullisia reittejä. Liittimet valitaan letkuihin sopiviksi ja niiden sekä johtimien materiaalit, niin että ne täyttävät ajoneuvon vaatimukset ja ovat mahdollisimman kestäviä.

Napamoottorin integroinnin komponenttien hinta on arviolta hieman yli 13 000 € per pyöräntuenta eli 8x8-alustassa kustannukset nousevat hieman yli 100 000 euroon. Summaa on mahdollista saada pienemmäksi valmistusmäärää kasvattamalla, jos konsepti saadaan tuotteistettua. Jotta siihen pisteeseen päästään, on edettävä tuotteistamisprosessissa eteenpäin ja konseptia on testattava paljon sekä monipuolisesti. Lisäksi tuotteistamista varten konseptia pitäisi laajentaa koskemaan myös apurungon sisällä olevia järjestelmän komponentteja. Tämän työn osalta jatkokehitystä riittää etenkin napamoottorin osalta. Moottoria voisi muokata yhdessä valmistajan kanssa vastaamaan vielä paremmin Patrian tarpeita. Samalla napamoottoria kannattaa päivittää vastaamaan uusimpia prototyyppisiä, joissa liitäntöjä on integroitu, mikä vähentää johtimien määrää, helpottaa napamoottorin integrointia ja tekee rakenteesta kestävämmän.

Moottorin integrointi onnistui ja testaamalla siitä on mahdollista kehittää vielä parempi. Lisäksi hydropneumaattisen jousen sijoittelu tässä diplomityössä esitetyllä tavalla vaikuttaa mahdolliselta, vaikka siinä onkin omat haasteensa. Kustannusten kasvu on edelleen sähköisten napamoottoreiden suurin haaste. Tulevaisuudessa teknologian vielä kehittyessä kustannuserotkin pienenevät ja napamoottoreiden tuomat edut korostuvat, kun asiakkaiden ympäristövaatimukset entisestään tiukentuvat. Kaiken kaikkiaan sähköinen napamoottori on varteenotettava vaihtoehto Patrian tuotteiden voimanlähteeksi.

Avainsanat: Napamoottori, erillisjousitus, pyöräntuenta, hydrauliikka, pneumatiikka, letkun reititys, hydropneumaattinen jousi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Samioskari Kekäläinen: Integration of hub motor into independent suspension chassis:  
Structure design of hydraulics and pneumatics  
Master's Thesis  
Tampere University  
Master's Degree Programme in Automation Engineering  
October 2020

---

This thesis is part of Tampere University's Master of Science Degree in Automation Engineering and it has been commissioned by Patria Land Oy. Integration of electric hub motor into independent suspension chassis used in Patria's products is designed in this thesis. Practically hydraulics and pneumatics structure of the wheel suspension is designed, which means designing hoses, cables and hydropneumatic spring element. Wheel suspension is modelled only for front left suspension so that by copying the design whole armoured vehicle chassis can be assembled.

Patria's productization process is followed in the designing process. In addition, state of the art in this branch of defence industry is studied. Design is made using Siemens NX -computer-aided-design-programme. Simultaneously as part of this thesis instructions for 3D-modelling hoses using deformable part -command are made for Patria.

Concept is based on requirements for the vehicle and the concept. Those requirements are based on requirements developed in reviews held as part of Patria's productization process, Patria's own requirements and different technical specifications and standards. Electric hub motor was selected according to these requirements. The motor was then modified to fit into Patria AMV, and wheel suspension was designed around modified motor. Also, novel hydropneumatic spring element, which is placed almost horizontally inside sub chassis, was conceptualized.

After the wheel suspension was modelled, hose and cable structure was designed into wheel suspension. The goal of the conduit structure is to be as dependable and reliable as possible while also fulfilling the requirements of this concept. Hub motor requires in all 5 hoses and 5 cables. Cables are: 2 coolant hoses, one for inflow and other for outflow, 1 brake fluid hose, 1 CTIS-hose and 1 multitube-hose for pneumatic gearshift. In addition, electric hub motor requires 3 high voltage cables and 2 data cables for sensors. Conduits are routed so that routes are well protected and as smooth as possible. Fittings are selected according to their conduits, and fitting and conduit materials are selected so that they fulfil vehicle requirements and are as durable as they can be.

Approximated costs of the components of the hub motor integration are a little over 13 000 € per wheel suspension. This means that in 8x8-chassis costs rise to around 100 000 €. The figure can be decreased by increasing the production volume of the theoretical vehicle. So that the concept can be productized, Patria's productization process must be taken further and the concept needs to be tested throughout. In addition, design must be expanded inside the chassis so that the vehicle could be made into final product. In the scope of this thesis especially hub motor must be developed further, if final product is desired. Motor could be modified in coordination with the manufacturer to fit better into Patria's needs. It should also be updated to correlate with latest hub motor prototypes where connections are integrated so that there are less conduits. This helps with the integration of the hub motor and enables more durable conduit structure.

Integration of the electric hub motor into Patria's wheel suspension was quite successful and it can be improved even more by practical testing. In addition, assembling hydropneumatic spring almost horizontally seems plausible even though it contains some challenges. Rise of the costs compared to traditional powertrain is still the main challenge that hinders the generalization of electric hub motors. However, in the future, when technology advances cost difference should decrease, and benefits of hub motors should come into limelight when customer's environmental requirements become more and more demanding. All in all, electric hub motor is noteworthy option for power unit of Patria's products.

Keywords: Hub motor, independent suspension, wheel suspension, hydraulics, pneumatics, hose routing, hydropneumatic spring

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö laadittiin osana Tampereen yliopiston automaatiotekniikan diplomi-insinööritutkintoa. Sen toimeksiantaja on Patria Land Oy, jonka napamoottoreihin liittyvien opinnäytetöiden sarjaa tämä työ osaltaan jatkaa. Työ tehtiin marraskuun 2019 ja loka-kuun 2020 välillä pääosin Patrian toimitiloissa Hämeenlinnassa sekä etänä Vantaalla COVID19-pandemian vuoksi. Etätöiden ansiosta osa työstä valmistui myös mökillä Liedossa.

Ensimmäisenä haluan kiittää esimiestäni Juha Pääskyvuorta mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta ja erittäin asiantuntevasta ohjauksesta. Toiseksi haluan kiittää diplomityön ohjaajiani professori Kalevi Huhtalaa ja yliopiston lehtori Petteri Multasta ripeästä ja rakentavasta palautteesta sekä vinkeistä työn rakenteen suhteen. Lisäksi haluan kiittää koko ajoneuvosuunnitteluryhmää avusta diplomityön etenemisessä ja katselmusten pidossa. Erityiskiitokset myös Tommi Mattilalle avusta letkusuunnittelussa ja Henry Toloselle kustannusanalyysissä avustamisesta. Kiitos myös Juho Koskelalle napamoottoreita koskevista materiaaleista, jotka olivat korvaamaton apu tämän työn teossa. Kiitokset kuuluvat kaikille muillekin, jotka Patria Landilla ovat edesauttaneet tämän työn valmistumisessa.

Viimeisenä vaan ei todellakaan vähäisimpänä haluan kiittää rakasta avopuolisoani Vilmaa korvaamattomasta tuesta, kannustuksesta ja ruokahuollosta koko tämän prosessin ajan. Lisäksi vielä iso kiitos perheelleni ja isovanhemmilleni tuesta ja kannustuksesta läpi koko 20 vuoden koulupolkuni. Kiitos kuuluu myös kaikille ystäväilleni, joiden kanssa olen viettänyt teekkarielämää sekä Suomessa että maailmalla. Erityiskiitokset Kopla, Delta, Autekin Vanhat, Albiinosudet, TaKoRU, Goshigang ja muut Sungkyunkwan Universityn Sunkut.

Vantaalla, 27.10.2020

Samioskari Kekäläinen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Työn perusteet .....	1
1.2 Työn kohde .....	2
1.3 Lähtötilanne .....	3
1.4 Patrian tuotteistamisprosessi .....	4
1.5 Työssä käytettävät työkalut .....	6
2. STATE OF ART .....	7
2.1 Hägglunds Vehicle SEP .....	7
2.2 QinetiQ HED 6x6 .....	9
2.3 AHED 8x8 .....	11
2.4 Giat DPE 6x6 .....	13
2.5 Rheinmetall Gefas .....	13
2.6 QinetiQ ARV .....	14
3. AJONEUVON VAATIMUKSET .....	16
4. PYÖRÄNTUENNAN SUUNNITTELU .....	21
4.1 Sähköinen napamoottori .....	21
4.2 Hydropneumaattisen jousen suunnittelu .....	26
4.3 Muiden komponenttien suunnittelu .....	31
5. ALIJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELU .....	34
5.1 Letkukokoonpanojen suunnittelu .....	36
5.1.1 Jarrujärjestelmä .....	40
5.1.2 Jäähdytysjärjestelmä .....	41
5.1.3 Pneumatiikan letkut .....	46
5.2 Napamoottorin kaapeleiden suunnittelu .....	50
5.2.1 Korkeajännitekaapelit .....	50
5.2.2 Datakaapelit .....	51
5.3 Piirikaaviot .....	53
6. TULOSTEN ARVIOINTI .....	55
6.1 Reitityksen onnistuminen .....	56
6.2 Vaatimusten täytyminen .....	68
6.3 Kustannusanalyysi .....	73
7. JATKOTOIMENPITEET .....	76
8. YHTEENVETO .....	79
LÄHTEET .....	80

# KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Työn kohde Patria AMV XP -panssariajoneuvo [2].</i>	2
<b>Kuva 2.</b>	<i>Patria AMV:n voimansiirtorakenne [4].</i>	3
<b>Kuva 3.</b>	<i>Lähtötilannetta karkeasti vastaava pyöräntuenta [5].</i>	4
<b>Kuva 4.</b>	<i>Patrian tuotteistamisprosessi [6].</i>	5
<b>Kuva 5.</b>	<i>SEP 6x6 -demonstraattori [9].</i>	8
<b>Kuva 6.</b>	<i>SEP:n Magnetic systems technology -napamoottori, muokattu lähteestä [7].</i>	9
<b>Kuva 7.</b>	<i>HED 6x6 [11].</i>	10
<b>Kuva 8.</b>	<i>QinetiQ:n HDU testipenkissä [12].</i>	11
<b>Kuva 9.</b>	<i>AHED 8x8 [13].</i>	12
<b>Kuva 10.</b>	<i>AHED 8x8 pyöräntuenta [14].</i>	12
<b>Kuva 11.</b>	<i>Giat DPE 6x6 sähköhybridi demonstraattori [8].</i>	13
<b>Kuva 12.</b>	<i>Gefasin voimansiirron rakenne, muokattu lähteestä [8].</i>	14
<b>Kuva 13.</b>	<i>QinetiQ:n "State of the art" -napamoottorimalli [16].</i>	15
<b>Kuva 14.</b>	<i>QinetiQ HDU-100 ripustuksen puoleinen liitinpinta.</i>	22
<b>Kuva 15.</b>	<i>QinetiQ HDU-100 renkaan puoleinen liitinpinta.</i>	23
<b>Kuva 16.</b>	<i>Siemens NX-sovelluksella muokattu QinetiQ HDU-100 -napamoottori.</i>	24
<b>Kuva 17.</b>	<i>Hydropneumaattisen jousen rakenne, muokattu lähteestä [22].</i>	26
<b>Kuva 18.</b>	<i>Pyöräntuennan 3D-malli nimellisasennossa komponentteineen.</i>	30
<b>Kuva 19.</b>	<i>Konseptia varten suunnitellun olka-akselin 3D-malli.</i>	32
<b>Kuva 20.</b>	<i>Hydrauliletkun rakenne, muokattu lähteestä [29].</i>	37
<b>Kuva 21.</b>	<i>Multitube-letkun poikkileikkaus [49].</i>	48
<b>Kuva 22.</b>	<i>Napamoottorin integroinnin hydraulikaavio.</i>	53
<b>Kuva 23.</b>	<i>Napamoottorin integroinnin paineilmakaavio.</i>	54

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

A-AV	engl. Anti-Aircraft Vehicle, ilmatorjuntapanssarivaunu
AHED	engl. Advanced Hybrid Electric Wheel Drive, yhdysvaltalainen hybridipanssariajoneuvokonsepti
AMB	Ambulanssi
AMV	engl. Armoured Modular Vehicle, Patrian 8x8 modulaarinen panssariajoneuvo
AMV XP	AMV Extra Payload, Extra Performance and Extra Protection, AMV:n päivitetty versio
APC	engl. Armoured Personnel Carrier, miehistönkuljetuspanssarivaunu
ARV	engl. Armored Reconnaissance Vehicle, Yhdysvaltain merivoimien tutkimuskeskuksen napamoottoroidun RV:n kehitysohjelma
CTIS	engl. Central Tire Inflation System, Pyörännapaan integroitu renkaan täyttöjärjestelmä
CV	engl. Command Vehicle, Komentopanssarivaunu
DIN	saks. Deutsches Institut für Normung, saksalainen kansallinen standardointi organisaatio
DIN Metric	DIN-standardin mukainen kierre
DPE	ransk. Démonstrateur Propulsion Electronique, ranskalainen sähköhybridipanssariajoneuvokonsepti
E3.cable	elektroniikkasuunnitteluohjelmisto
ED	engl. ED Seal Profil Ring
EMC	engl. Electromagnetic compatibility, Sähkömagneettinen yhteensopivuus
EWV	engl. Electronic Warfare Vehicle, elektronisen sodankäynnin vaunu
FKM	Fluoroelastomeeri
FRES	engl. Future Rapid Effect System, Britannian puolustusministeriön panssariajoneuvo-ohjelma
Gefas	saks. Geschütztes Fahrzeug System, saksalainen sähköhybridipanssariajoneuvokonsepti
HDU	engl. Hub Drive Unit, Pyörännapaan integroitu voimayksikkö
HED	engl. Hybrid Electric Drive, sähköhybridivoimalinjakonsepti
IFV	engl. Infantry Fighting Vehicle, rynnäkköpanssarivaunu
Mathcad	Teknisen laskennan ohjelmisto
MIL-STD	engl. United States Military Standard
MST	engl. Magnetic Systems Technology, brittiläinen sähkömoottorivalmistaja
MS Word	Tekstinkäsittelyohjelma
NATO	engl. North Atlantic Treaty Organization
NBR	engl. Nitrile butadiene rubber eli nitrilikumi
NX12	3D-suunnitteluohjelmisto
O-Lok	Liitintyyppi
ORFS	engl. O-ring Face Seal
PDR	engl. Preliminary Design Review, Alustava suunnittelukatselmus
PTFE	Polytetrafluorieteeni, polymeeri tunnetumpi kauppanimellä Teflon
PVC	Polyvinyylikloridi
QinetiQ	Brittiläinen puolustusalan tutkimuskeskusten verkosto
RV	engl. Reconnaissance Vehicle, tiedustelupanssarivaunu
SEP	ruots. Splitterskyddad Enhets Plattform, ruotsalainen hybridipanssariajoneuvokonsepti
SFR	engl. System Functional Review, Järjestelmän toiminnallinen katselmus
SSR	engl. System Requirement Review, Järjestelmävaatimuskatselmus

STANAG	engl. Standardisation Agreement
TD	engl. Tank Destroyer, Panssarintorjuntavaunu
TMSV	engl. Turreted Mortar System Vehicle, Kranaatinheitinjärjestelmätornilla varustettu vaunu
Unit of mobility	QinetiQ:n kehittämä älykäs pyöräasema
URR	engl. User Requirement Review, Käyttäjän vaatimuskatselmus
WSC	engl. Wheel Station Controller
<i>A</i>	hydropneumaattisen jousen männän pinta-ala, [m <sup>2</sup> ]
<i>c<sub>p</sub></i>	jäähdytysnesteen ominaislämpökapasiteetti, [J/(kg*K)]
<i>d</i>	hydropneumaattisen jousen männän halkaisija, [m]
<i>d<sub>letku</sub></i>	letkun halkaisija, [m]
<i>F<sub>nom</sub></i>	jousen tuottama voima nimellisasennossa, [N]
<i>G</i>	painovoima, [N]
<i>g</i>	normaaliputoamiskiikkyvyys, [m/s <sup>2</sup> ]
<i>K</i>	adiabaattivakio
<i>L</i>	jäähdytysnesteletkun pituus, [m]
<i>L<sub>max</sub></i>	jousen maksimipituus, [m]
<i>L<sub>min</sub></i>	jousen minimipituus, [m]
<i>L<sub>nom</sub></i>	jousen nimellispituus, [m]
<i>M</i>	pyöränkuorman tuottama momentti, [Nm]
<i>ṁ</i>	massavirta, [kg/s]
<i>m<sub>akseli</sub></i>	ajoneuvon akselimassa, [kg]
<i>m<sub>jousitettu</sub></i>	jousta kuormittava massa, [kg]
<i>m<sub>jousittamaton</sub></i>	ajoneuvon jousittamaton massa, joka ei kuormita jousta, [kg]
<i>p<sub>0</sub></i>	kaasun alkupaine, [Pa]
<i>P<sub>hukka</sub></i>	lämpöhukkateho, [Pa]
<i>p<sub>i</sub></i>	kaasun loppupaine, [Pa]
<i>p<sub>max</sub></i>	hydropneumaattisen jousen kaasutilavuuden maksimipaine, [Pa]
<i>p<sub>nom</sub></i>	hydropneumaattisen jousen kaasutilavuuden nimellispaine, [Pa]
<i>Q<sub>max</sub></i>	maksimitilavuusvirta napamoottorin läpi, [m <sup>3</sup> /s]
<i>Re</i>	Reynoldsin luku
<i>Re<sub>kr</sub></i>	kriittinen Reynoldsin luku
<i>r<sub>letku</sub></i>	jäähdytysnesteletkun säde, [m]
<i>s</i>	hydropneumaattisen jousen liikematka minimipituudesta nimellis-asentoon, [m]
<i>S<sub>nom</sub></i>	jousivoiman momenttivarsi nimellisasennossa, [m]
<i>T<sub>in</sub></i>	jäähdytysnesteen ylin sallittu lämpötila sisäänvirtauksessa, [°C]
<i>T<sub>out</sub></i>	jäähdytysnesteen ylin sallittu lämpötila ulosvirtauksessa, [°C]
<i>v</i>	jäähdytysnesteen virtausnopeus letkussa, [m/s]
<i>V<sub>0</sub></i>	kaasun alkutilavuus, [m <sup>3</sup> ]
<i>V<sub>i</sub></i>	kaasun lopputilavuus, [m <sup>3</sup> ]
<i>X</i>	pyöränkuorman vipuvarsi, [m]
<i>x</i>	hydropneumaattisen jousen kaasutilavuuden minimikorkeus, [m]
$\Delta p_{\text{kertavastushäviö}}$	kertavastusten aiheuttama painehäviö jäähdytysjärjestelmässä, [Pa]
$\Delta p_{\text{kitka}}$	kitkavastusten aiheuttama painehäviö jäähdytysjärjestelmässä, [Pa]
$\Delta p_{\text{kokonaishäviö}}$	kokonaispainehäviö jäähdytysjärjestelmässä, [Pa]
$\Delta p_{\text{liitin}}$	letkuliittimen aiheuttama painehäviö jäähdytysjärjestelmässä, [Pa]
$\Delta p_{\text{moottori}}$	napamoottorin aiheuttama painehäviö jäähdytysjärjestelmässä, [Pa]
$\Delta p_{\text{mutka}}$	letkumutkan aiheuttama painehäviö jäähdytysjärjestelmässä, [Pa]
$\Delta p_{\text{ulos}}$	ulosvirtauksen aiheuttama painehäviö jäähdytysjärjestelmässä, [Pa]
$\zeta_{\infty}$	90° liittimen Hooperin toinen kertavastuskerroin
$\zeta_1$	90° liittimen Hooperin ensimmäinen kertavastuskerroin
$\zeta_{90}$	90° liittimen yhdistetty kertavastuskerroin



$\zeta_{\text{mutka}}$	letkumutkan aiheuttama kertavastuskerroin
$\zeta_{\text{ulos}}$	ulosvirtauksen kertavastuskerroin
$\lambda$	jäähdytysnesteen kitkavastuskerroin
$\nu_{90}$	jäähdytysnesteen viskositeetti 90°C lämpötilassa, [m <sup>2</sup> /s]
$\rho_{\text{jneste}}$	jäähdytysnesteen tiheys 90°C lämpötilassa, [kg/m <sup>3</sup> ]
°	aste
”	tuuma
A	ampeeri
€	euro
km/h	kilometriä tunnissa
kW	kilowatti
V	voltti

# 1. JOHDANTO

Tässä luvussa esitellään työn perusteet, kuten toimeksiantaja, työn rajaus, aihe, lähtötilanne sekä työssä käytettävät menetelmät, työkalut ja sovellukset. Lisäksi Patrian tuotteistamisprosessi esitellään yleisesti työhön liittyviltä osin.

## 1.1 Työn perusteet

Työn tarkoituksena on suunnitella hydrauliiikan ja pneumatiikan osalta sähköisen napamoottorin integrointi Patrian tuotteissa käytettävään erillisjousitettuun alustaan. Käytännössä työssä suunnitellaan hydrauliiikka ja pneumatiikka napamoottorilla toteutettuun pyöräntuentaan. Erityisesti työssä keskitytään käyttövarman ja luotettavan letku- ja liitinrakenteen kehittämiseen. Tavoitteena on suunnitella siitä mahdollisimman kestävä ja samalla selvittää, mitkä tekijät johtimien kestoon vaikuttavat. Konsepti tehdään etuvasemmalle pyöräntuennalle, jota on tarkoitus pystyä monistamaan samanlaisena ajoneuvon molemmille puolille ja kaikille akseleille.

Tämä diplomityö tehdään osana Tampereen yliopiston automaatiotekniikan maisteritutkintoa ja sen toimeksiantaja on Patria Land Oy. Toimeksiantajan kannalta tavoitteena on jatkaa Patrian aiemmin teettämien opinnäytetöiden aloittamaa selvitystä sähköisten napamoottoreiden käytön mahdollisuudesta ja vaatimuksista Patrian tuotteissa tulevaisuudessa. Lisäksi työn ohessa Patrian järjestelmät ja prosessit tulevat selväksi, mikä auttaa merkittävästi hydrauliikkasuunnittelijan töihin perehtymisessä.

Työ noudattaa Patrian tuotteistamisprosessia mahdollisuuksien mukaan. Prosessia ei voida kuitenkaan noudattaa täydellisesti, koska konseptia ei ainakaan vielä tässä vaiheessa viedä käytännön tasolle valmiiksi tuotteeksi asti. Konsepti rajataan teoriatasolle rakenteen suunnitteluun pyörännavan ja apurungon välille eli apurungon sisäisiä komponentteja ei tarvitse huomioida. Siksi apurungon sisällä tapahtuvaa käyttövoiman tuottoa ei tarvitse tässä työssä käsitellä, vaan se rajataan konseptin ulkopuolelle.

Osana tätä diplomityötä laaditaan myös Patrian sisäiseen käyttöön ohje joustavan letkun ja kaapelin mallintamiseen niin sanottuna *deformable partina* NX12-3D-suunnitteluohjelmistoa käyttäen. *Deformable part* mukautuu NX-kokoonpanossa muiden komponenttien

liikkeisiin, kuten fyysinen letkukin, ja tarjoaa siten hyvät simulaatiomahdollisuudet letkulinjojen suunnitteluun. Lisäksi *deformable partina* mallinnettua letkua voidaan käyttää useassa eri kokoonpanossa, vaikka se esiintyisi niissä eri muodossa tai jopa eri mittaisena.

## 1.2 Työn kohde

Työn kohde on Patrian panssaroitu pyöräajoneuvo, jonka pääasiallinen käyttö on rauhanturvaaminen ja kriisinhallinta [1]. Kohdetta vastaava Patria AMV XP -panssariajoneuvo (Armoured Modular Vehicle) on esitelty Kuvassa 1 Ruotsin puolustusvoimien varustuksessa.

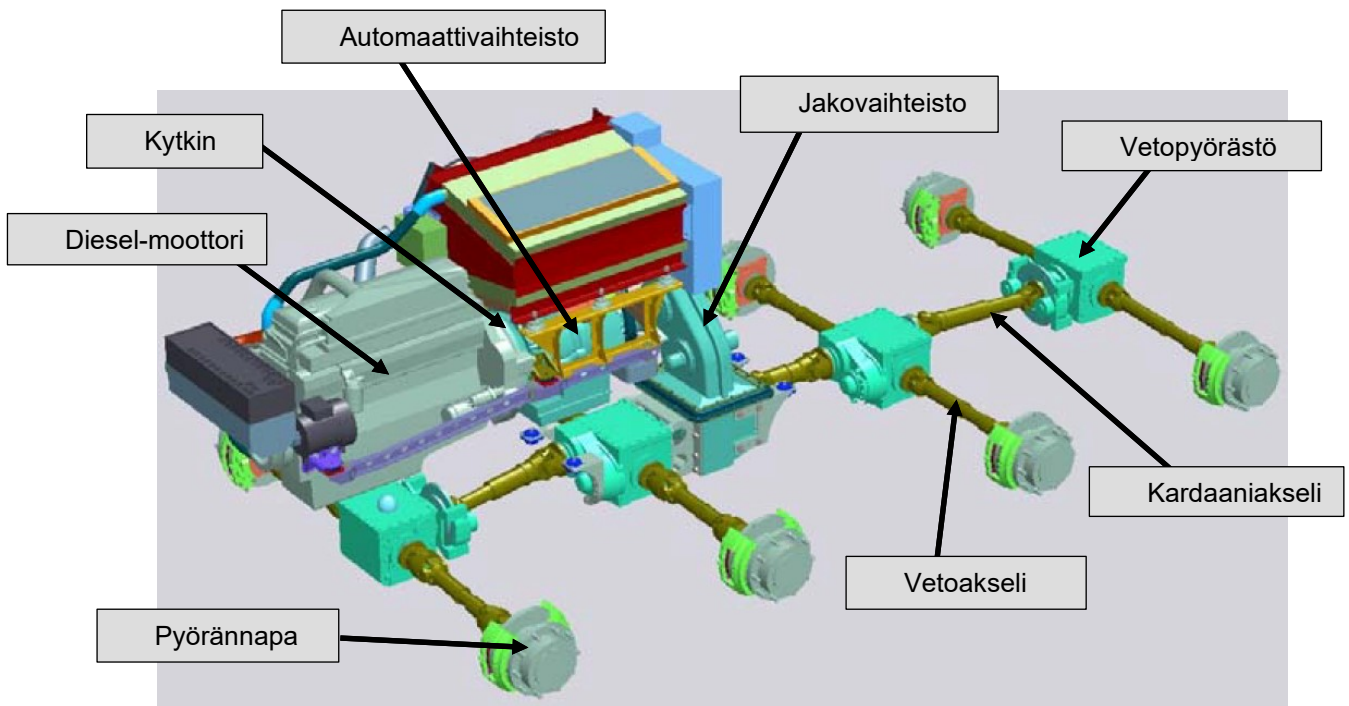


**Kuva 1.** Työn kohde Patria AMV XP -panssariajoneuvo [2].

Ajoneuvoa käytetään joka puolella maailmaa vuoden ympäri puolustus- ja kriisinhallintaoperaatioissa. Operaatioiden yhtäjaksoinen kesto voi olla jopa 72 tuntia ja sen aikaiset ajokilometrit 600 km, joten komponenttien on kestävä luotettavasti kovaakin käyttöä sekä äärimmäisiä ja vaihtuvia olosuhteita. [3] Käyttöolosuhte ja -ympäristö vaatimukset on esitelty vaatimusluettelossa luvussa 3.

### 1.3 Lähtötilanne

Tällä hetkellä Patria käyttää kaikissa pyöräajoneuvoissaan tavanomaista mekaanista vetotapaa, jossa veto välitetään dieselmoottorilta kytkimen, automaattivaihteiston, jakovaihteiston ja kardaniakseleiden kautta vetopyörästäöille ja siitä vetoakseleiden välityksellä pyörännavoille. [1] AMV:ssä käytössä olevaa mekaanista voimansiirtorakennetta on havainnollistettu Kuvassa 2. Harmaa dieselmoottori on kuvassa vasemmalla ja automaattivaihteisto sijaitsee punaisen jäädytynyksikön alla. Moottorin ja vaihteiston välissä näkyy kytkimen kotelo. Vaihteiston perässä on jakovaihteisto, josta voima välitetään alas kardaniakseleille ja vetopyörästäöille. Vetoakselit välittävät vedon vetopyörästäöiltä lopulta pyörännavoille.

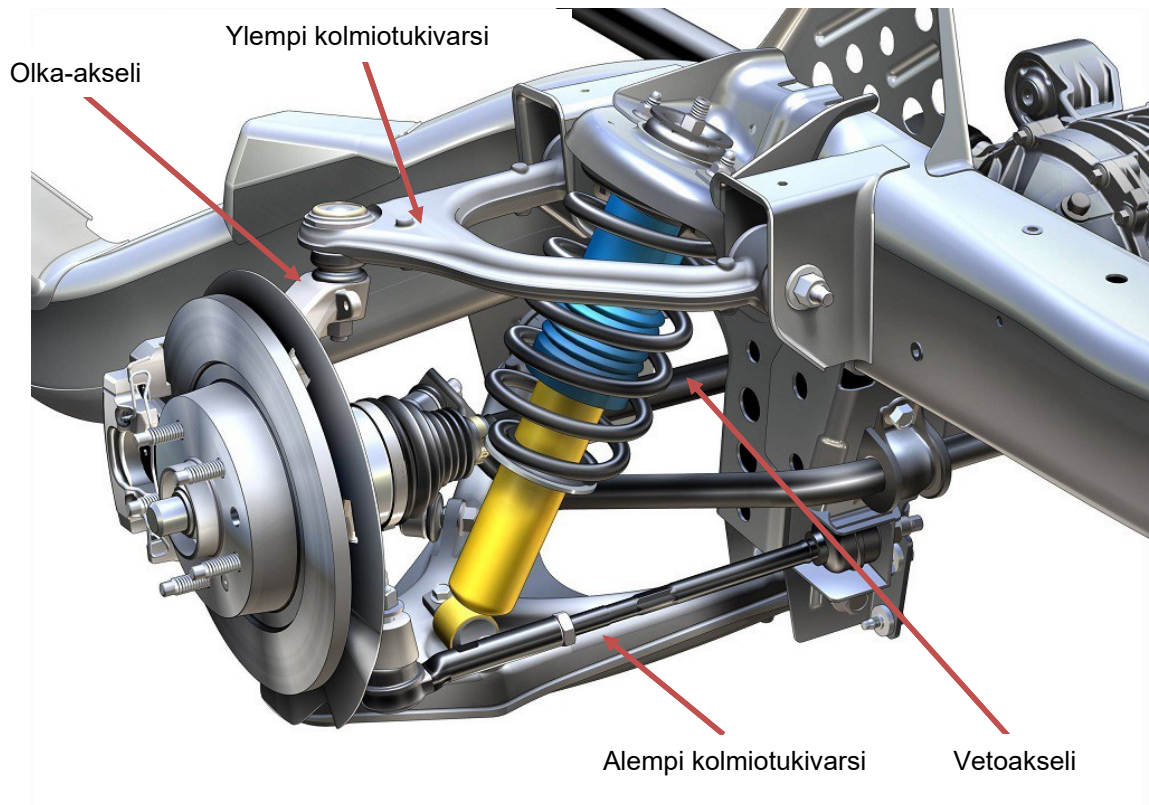


**Kuva 2.** Patria AMV:n voimansiirtorakenne [4].

Toteuttamalla voimansiirto sähköisillä napamoottoreilla on mahdollista päästä eroon kaikista Kuvaan 2 nimetyistä komponenteista rungon sisältä, jolloin tilaa säästyy muun muassa akuille, generaattorille tai erilaisille jousitusratkaisuille. Tämän työn rajauksen näkökulmasta etenkin vetoakseleiden poistuminen on merkittävää, sillä se vapauttaa pyöräntuennan ympäristöstä tilaa työssä suunniteltaville letkuille ja kaapeleille sekä uudelle jousitusrakenteelle.

Työssä käytetään Patrian pyöräajoneuvoissa käytettävää kaksoiskolmiotukivarsipyöräntuuntaa, mutta työn osana suunniteltava jousituselementtien

sijoittelu poikkeaa nykyisestä ratkaisusta, jossa hydropneumaattinen jousielementti on sijoitettu pystyasentoon. Tavanomainen kaksois-kolmiotukivarsipyöräntuenta on esitelty Kuvassa 3. Kaksois-kolmiotukivarsituennassa sekä alempi että ylempi kolmiotukivarsi on kiinnitetty kolmion kannan nurkista ajoneuvon runkoon ja kolmion kärjet ovat pallonivelillä kiinni olka-akselissa. Jousielementin alapää kiinnittyy alempaan tukivarteen ja yläpää ajoneuvon runkoon. Ohjaavilla akseleilla pyörää kääntävä raidetanko kiinnittyy olka-akselissa kiinni olevaan ohjausakseliin ja vaatii myös luonnollisesti oman tilansa.



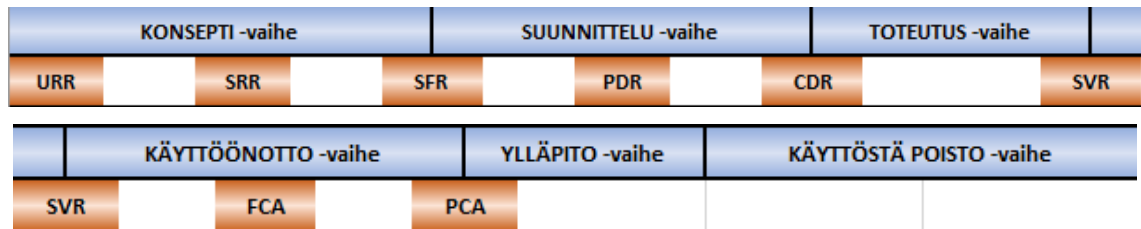
**Kuva 3.** Lähtötilannetta karkeasti vastaava pyöräntuenta [5].

Kuva eroaa AMV:n pyöräntuennasta siten, että kuvassa on kierrejousi hydropneumaattisen jousielementin sijasta. Lisäksi AMV:n pyöräntuenta on kuvassa olevaa henkilöauton tuentaa järeämpi, mutta muuten peruseriaate on sama. Myös vetoakselin nivelineen varaama tila ilmenee hyvin Kuvasta 3.

## 1.4 Patrian tuotteistamisprosessi

Patrian tuotteistamisprosessiin kuuluu kuusi vaihetta ja seitsemän katselmusta. Tämän työn rajauksen sisään mahtuu kaksi ensimmäistä vaihetta ja ainakin osittain neljä ensimmäistä katselmusta. Työhön sisältyvät vaiheet ovat konsepti- ja suunnitteluvaihe ja katselmukset URR (User Requirement Review), SSR (System Requirement Review), SFR

(System Functional Review) ja PDR (Preliminary Review). Tuotteistamisprosessin vaiheet niihin kuuluvine katselmuksineen on esitetty Kuvassa 4.



**Kuva 4.** Patrian tuotteistamisprosessi [6].

Ensimmäisessä eli URR-katselmuksessa määritellään tuotteen operatiiviset tai käyttäjätason toiminnalliset vaatimukset sekä luotu konsepti. Tavoitteena on varmistua, että asiakkaan ja loppukäyttäjän vaatimukset ja tarpeet on ymmärretty oikein, jotta tuotteen kehitys lähtee oikeaan suuntaan. Kun tekninen konsepti on luotu, seuraavassa SSR-katselmuksessa tarkistetaan järjestelmävaatimukset sekä tuotteen konsepti- ja arkkitehtuurisuunnitelma. Näin varmistutaan, että ne ovat riittävän tarkat suunnittelutyön ja alijärjestelmien spesifioinnin aloittamiseksi. [6] Tämän diplomityön kolmannen luvun vaatimustalista ja sen määrittäminen sisältyy käytännössä kokonaisuudessaan konseptivaiheeseen ja sisältää sen molemmat katselmuksia.

Järjestelmävaatimusten ollessa selvillä voidaan edetä suunnitteluvaiheeseen, jonka ensimmäinen katselmus on SFR. Siinä varmistetaan, että alijärjestelmä- ja komponentti-vaatimukset on määritetty, rajapinnat on spesifioitu ja järjestelmäanalyysien tulokset ovat käytettävissä suunnittelun lähtötietona. Lisäksi tarkistetaan, että valinnat noudattavat budjettia ja mahdollistavat vaatimusten täyttämisen. SFR:n jälkeen tuotteessa käytettävät komponentit pitäisi olla selvillä ja tekninen konsepti todennettu demonstraattoritein. [6] Käytännössä tämän työn käytännön suunnitteluvaihe sisältyy SFR:ään.

Viimeinen tämän työn laajuuteen kuuluva tuotteistamisprosessin mukainen katselmus on PDR. Siinä varmistetaan, että suunnittelukohteesta on määritetty kriittiset vaatimukset ja varmistettu niiden täyttymisen perusteet, ulkoiset rajapinnat ja käytettävät komponentit. Tässä vaiheessa tuotteistamisprosessia komponenttien ja suunnitteluratkaisujen soveltuvuus on varmistettu analyysin tai kokein. Lisäksi PDR-katselmusta varten järjestelmien osien testit vaatimusten mukaisessa ympäristössä on aloitettu. [6] Tässä työssä tulosten arviointi kuuluu PDR-katselmuksen piiriin, mutta koska tämä työ rajataan vain analyysitasolle käytännön testejä ei päästä suorittamaan, vaikka ne tavallisesti PDR-katselmukseen kuuluisivatkin. Tavallisesti tuotteistamisprosessi jatkuisi Kuvan 4 mukaisesti laajemmin testeihin ja lisäkatselmusten mukaan kohti toteutusvaihetta, jonka



jälkeen valmis tuote julkaistaan markkinoille. Tuotteen ollessa markkinoilla ja asiakkaan käytössä edetään ylläpitovaihetta, kunnes tuote tulee elinkaarensa päähän ja päädytään käytöstä poisto -vaiheeseen. [6]

## **1.5 Työssä käytettävät työkalut**

Työ on kirjoitettu Tampereen yliopiston opinnäytetyöpohjalle. Työtä varten tehdyt laskelmat laskettiin Mathcad -teknisen laskennan ohjelmistoa käyttämällä ja 3D-malli laadittiin Siemens NX12 -3D-suunnitteluohjelmistolla. Hydraulii- ja paineilmakaaviot laadittiin E3.cable-ohjelmistolla. Osana työtä laadittu suunnitteluohje kirjoitettiin Microsoft Word -tekstinkäsittelyohjelmalla ja julkaistiin neljässä osassa Patrian omissa järjestelmissä.

## 2. STATE OF ART

Sähköisten napamoottoreiden käyttö panssariajoneuvoissa tulee suurella todennäköisyydellä lisääntymään tulevaisuudessa, mutta ennusteista huolimatta vuoteen 2020 mennessä yksikään valmistaja ei ole tuonut täyssähkö- tai edes sähköhybridipanssariajoneuvoa markkinoille. Väitettä tukevat kuitenkin useat suuret panssariajoneuvoihin liittyvät kehitysohjelmat sekä eri valmistajien tekemät demonstraattorit. Sähkömoottoreiden käyttöä sotilasajoneuvoissa on tutkittu jo 90-luvulta lähtien ja niiden käytöllä on saavutettavissa selkeitä hyötyjä. Tässä työssä tutkittava pyöräkohtaisin napamoottorein toteutettu sarjahybridirakenne on suosituin hybridivoimalinjarakenne eri valmistajien sotilasajoneuvoprototyypeissä. [7], [8] Seuraavissa alaluvuissa on esitelty tässä työssä suunniteltavaa konseptia vastaavia ratkaisuja eri valmistajilta.

### 2.1 Hägglunds Vehicle SEP

Ruotsalainen Hägglunds aloitti oman hybridipanssariajoneuvoprojektinsa jo vuonna 1996 osana SEP-ohjelmaa (Splitterskyddad enhetsplattform). Sen tuloksena syntyi sekä tela- että pyöräalustaiset demonstraattorit, joista etenkin pyöräalustainen SEP 6x6 on kiinnostava tämän työn kannalta. Perusrakenteeltaan se on AMV:n tapaan modulaarinen ja sen huippunopeus on noin 100km/h. Kokonaispainoltaan 20 tonnin painoluokkaan osuva SEP 6x6 on esitelty Kuvassa 5. [9]





**Kuva 5.** SEP 6x6 -demonstraattori [9].

SEP 6x6 -prototyypissä käytettiin brittiläisen *Magnetic systems technologyn* (MST) kaksinopeuksisia napamootoreita, jotka tuottavat 100 kW huipputehon. MST:n napamootori on esitelty Kuvassa 6. Pyöräntuenta on toteutettu AMV:n tapaan kaksois-kolmiotuki-  
varsilla, mutta vääntövarsijouselementti on kiinnitetty ylempään tukivarteen. SEP:n ren-  
gaskoko on tavanomaista kokoa suurempi 405/70-R24. [9]



**Kuva 6.** SEP:n Magnetic systems technology -napamoottori, muokattu lähteestä [7].

MST:n teknisesti edistyksellisessä napamoottorissa kaikki liitännät on toteutettu yhdellä paksulla johtimella ja erikoisvalmistetun jarrun on integroitu toimilaitteineen moottorin yhteyteen. Edistyksellisyydestään huolimatta Ruotsi lakkautti kehitysprojektin vuonna 2008 liian kalliina Ruotsin puolustusvoimille ja päätti valita Patria AMV:n uudeksi panssaroituksi pyöräajoneuvokseen [9], [10].

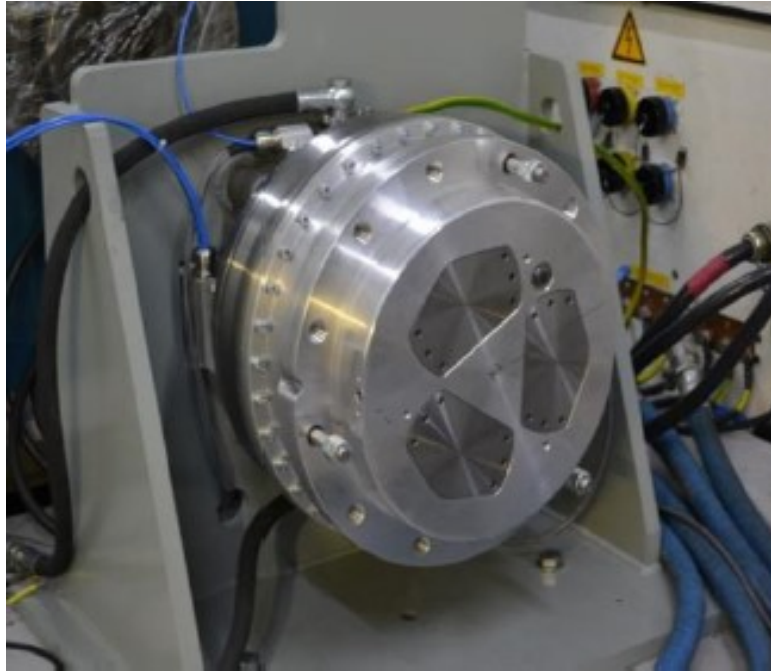
## 2.2 QinetiQ HED 6x6

Brittiläinen yksityistetty puolustusalan tutkimuskeskusten verkosto QinetiQ on myös tutkinut napamoottoreiden käyttöä panssariajoneuvoissa. 90-luvun lopusta lähtien kehitetty QinetiQ:n ensimmäisen napamoottorein varustetun panssariajoneuvoprototyypin HED 6x6:n (*Hybrid Electric Drive*) keskeinen tavoite oli integroida sähköinen napamoottori 20 tuuman standardivanteeseen sopivaksi. Samalla napamoottorin ja ajoneuvon tuli kuitenkin täyttää korkeat paino-, kustannus-, vääntömomentti-, teho- ja nopeusvaatimukset. Haasteena oli mahduttaa kestmagneettimoottori, kolminopeuksinen planeettavaihdenvaihteisto ja nestejäähdytteinen levyjarru pyörännapaan. Kuvassa 7 näkyvän ajoneuvon maksimipyöräkuormaksi muotoutui 3,75 tonnia ja huippunopeustavoitteeksi 120 km/h. [11], [12]



**Kuva 7. HED 6x6 [11].**

Lopulta HED-prototyypin vaihteistosta tuli kaksinopeuksinen napamoottorin koon optimoimiseksi, sillä tavoitteisiin päästiin myös ilman kolmatta nopeutta [11]. Kaapeloinnillaan HEDin napamoottorikonsepti on hyvin samanlainen tässä työssä luotavaan konseptiin nähden, sillä tässä konseptissa päädyttiin käyttämään juuri QinetiQ:n suunnittelemaa napamoottoreita. HEDissä sähkö johdetaan tämän konseptin tavoin napamoottorille kolmella korkeajännitekaapelilla, vaihteensiirto tapahtuu pneumaattisilla toimilaitteilla, jotka toimivat letkujen välityksellä, ja moottorin napaan kiinnitetään CTIS-järjestelmän letku. [12] Valitettavasti kaapeleiden reiteistä ja kiinnityksistä ei ole saatavilla tietoa. On myös varsin todennäköistä, että johdinrakennetta ei ole suunniteltu huolellisesti tai ainakaan kovin kestäväksi lähinnä napamoottoria esittelevää demonstraattoria varten. HEDissä käytetty napamoottori on esitetty Kuvassa 8.



**Kuva 8.** *QinetiQ:n HDU testipenkissä [12].*

Tästä konseptista poiketen HED-ajoneuvossa ei ole lainkaan perinteistä olka-akselia, koska pallonivelet, ohjausakselit ja muut pyöränripustuksen komponentit on pultattu suoraan napamoottoriin. Näin ajoneuvon jousittamatonta massaa saadaan pienennettyä ja rakennetta yksinkertaistettua. QinetiQ:n konseptissa napamoottorein toteutettu voimansiirto nähdään niin sanottuna "unit of mobility":na eli pyöräasemana, joka ohjaa aktiivisesti jousitusta, pyörimisnopeutta ja vääntöä olosuhteisiin sopiviksi. Napamoottoria täydentää pitkäliikkeinen jousitus, joka tukee moottorin suorituskykyä. [11], [12]

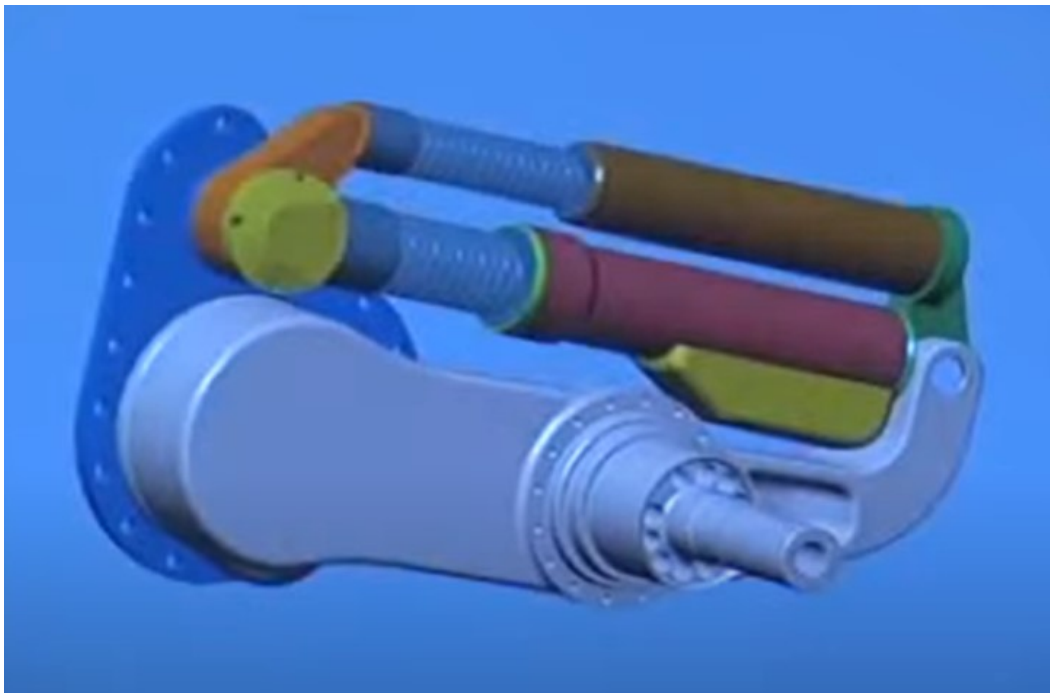
### **2.3 AHED 8x8**

Yhdysvaltalainen 2000-luvulla osana FRES-ohjelmaa (Future Rapid Effect System) kehitetty Advanced Hybrid Electric Wheel Drive 8x8 eli AHED-panssariajoneuvodemonstraattori hyödyntää kahdeksaa kolmannen sukupolven Magnet Motorin sähköistä napamoottoria, jotka tuottavat 625 kW:n hetkellisen tehon. [8] AHED on esitelty Kuvassa 9.



**Kuva 9.** AHED 8x8 [13].

Ajoneuvossa on säädettävän kaasujousin toteutettu erillisjousitettu alusta ja sen huippunopeus pelkällä akkujen tuottamalla sähköllä on 30 km/h. [12] AHEDin on tarkoitus sijoittua 20 tonnin painoluokkaan [13]. Kuvassa 10 on esitelty hahmotelma AHED 8x8:n pyöräntuennasta, joka eroaa varsin merkittävästi AMV:n tuennasta.



**Kuva 10.** AHED 8x8 pyöräntuenta [14].

Kuvasta 10 ilmenee, että AHEDin napamoottorit on integroitu ajoneuvon alustaan omalla akselillaan ja pyöräntuenta on toteutettu erillisjousitettuna pitkittäistukivarsituentana. Napamoottorin vaatimat sähkökaapelit ja jäähdytysletkut on integroitu napamoottorin akselin ja pitkittäistukivarren sisälle suojaan. [8]



## 2.4 Giat DPE 6x6

Ranskalainen Giat Industries alkoi kehittää omaa sähköhybrididemonstraattoriaan 20 tonnin luokkaan vuonna 2003 [8]. Projektin seurauksena syntynyt Giat DPE 6x6 (Démonstrateur Propulsion Electronique) on esitelty Kuvassa 11.

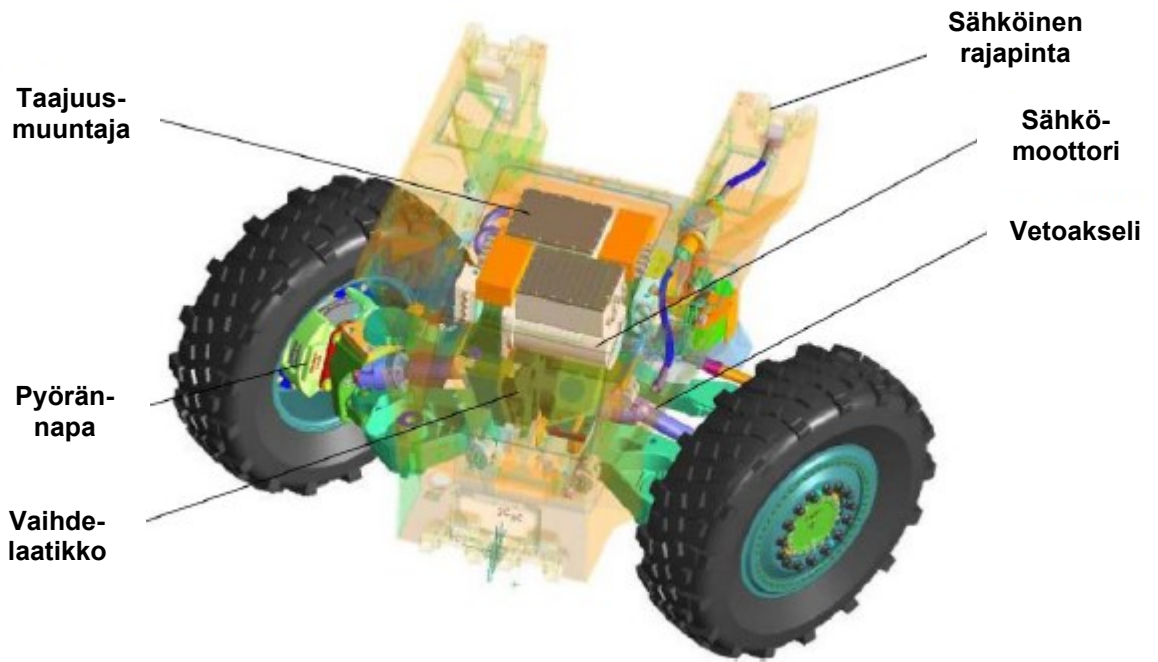


*Kuva 11. Giat DPE 6x6 sähköhybridi demonstraattori [8].*

Giat käyttää AHEDin tapaan Magnet Motorin L3-napamoottoreita ja hydropneumaattisia jousielementtejä, mutta pyöräntuennan toteutus eroaa hieman AHEDin vastaavasta. Toinen ja kolmas akseli käyttävät pitkittäistukivarsituentaa, kun taas ohjaava ykkösakseli hyödyntää kaksois-kolmiotukivarsituentaa. Näin ollen Giatin napamoottorin integrointitapa on yhdistelmä AHEDin ja QinetiQ:n toteutuksia. Projekti ei kuitenkaan edennyt prototyyppiä pidemmälle komponenttien korkeiden kustannusten takia. [8]

## 2.5 Rheinmetall Gefas

Saksalaisen Rheinmetallin sähköhybridikonseptin toteutus edustaa vaihtoehtoista toteutusta ja on siksi tämän työn kannalta kiinnostava. 2000-luvulla kehitetty Rheinmetall Gefas (Geschütztes Fahrzeug System) on modulaarinen sähköhybridipanssariajoneuvo, josta on kolme erilaista konfiguraatiota: 4x4, 6x6 ja 20 tonnin luokkaan sijoittuva 8x8. Poikkeuksellista konseptissa on, että napakohtaiset moottorit on asennettu akselimo- duulille ajoneuvon alustaan ja voima välitetään pyörille tavanomaisten vetoakseleiden kautta. Jokaisella akselilla on kaksi induktiomoottoria, yksi kummallekin pyörälle, ja molemmille oma vaihteisto. [7], [8] Voimansiirron rakenne selviää Kuvasta 12.



*Kuva 12. Gefasin voimansiirron rakenne, muokattu lähteestä [8].*

Kuvassa 12 näkyy hyvin, kuinka sähkömoottorit ja vaihteistot on sijoitettu alustaan ja pyörännapojen ja vaihteiston välissä on vetoakselit. Näin moottorit saadaan alustan suojaan ja niiden integrointi helpottuu, kun kaapeloinnille ja letkuille on enemmän tilaa, eikä niiden tarvitse liikkua jouston mukaan. Toisaalta pyöräntuenta on tavanomainen kaksoiskolmiotukivarsituenta, eikä hybridikonfiguraatio vapauta sieltä tai rungosta sisältä tilaa uusille ratkaisuille. Rheinmetallin konseptissa on myös huomion arvoista, että sähkömoottorit ovat muista poiketen induktiomootoreita kestopagneettimoottorin sijaan. [8]

## 2.6 QinetiQ ARV

Vuonna 2018 QinetiQ valittiin mukaan Yhdysvaltain merivoimien tutkimuskeskuksen ARV-ohjelmaan (Armored Reconnaissance Vehicle) kehittämään sähköisinä napamoottorein varustettu panssariajoneuvo. Ajoneuvossa on tarkoitus käyttää QinetiQ:n jo HE-Dissä testattua "Unit of mobility" -ideaa jatkokehittettynä, joka mahdollistaa jousituksen pitkän liikevaran ja napamoottorin asentamisen 20" standardivanteen sisään. [15], [16] Ajoneuvossa käytettävä kestopagneettimoottori on esitelty Kuvassa 13.



**Kuva 13.** QinetiQ:n “State of the art” -napamoottorimalli [16].

ARV-ohjelmaan kehitettävässä ajoneuvossa käytetään QinetiQ:n uusinta napamoottori-konseptia, johon on integroitu nestejäähdytys, levyjarru sekä kolminopeuksinen vaihteisto. Kaikki napamoottorin vaatimat letkut ja kaapelit on niputettu kahteen vahvistettuun ja suojattuun johtimeen, jotka on liitetty napamoottorin kuoren sisään suojaan. Johtimet sisältävät ainakin letkut nestejäähdytykselle ja pneumaattiselle vaihteensiirrolle sekä korkeajännitekaapelit sähkövirralle. Pyörän aseman säädin, WSC (Wheel Station Controller), ohjaa kutakin napamoottoria näiden johtimien avulla. [16]



### 3. AJONEUVON VAATIMUKSET

Vaatimukset napamoottorin integroinnille erillisjousitettuun alustaan on esitetty Taulukossa 1. Vaatimukset perustuvat AMV XP:n ominaisuuksiin, Patrian tälle työlle asettamiin lähtökohtiin ja katselmuksien aikana ilmenneisiin vaatimuksiin sekä NATO:n (North Atlantic Treaty Organization) STANAG (Standardisation Agreement) ja Yhdysvaltain MIL-STD -standardeihin (United States Military Standard). Työn perustana käytettävän ajoneuvon vaatimukset tulevat työn toimeksiantajalta eli Patria Land Oy:ltä ja ne perustuvat pitkälti Patria AMV XP -ajoneuvon ominaisuuksiin. Samoin käyttäjän vaatimukseen listatut ajoneuvon fyysisiin mittoihin ja ominaisuuksiin liittyvät vaatimukset pohjautuvat AMV XP:hen.

Ajoneuville asetetut vaatimukset on jaettu kolmeen eri kohdealueeseen: 1. Käyttäjän vaatimukset, 2. Ajoneuvon vaatimukset ja 3. Komponenttivaatimukset. Tarkennuskohtaan on tarvittaessa tarkennettu vaatimusta ja merkitty lähde, johon vaatimus perustuu, jos se ei ilmene itse vaatimuksesta.

**Taulukko 1. Konseptin vaatimukset.**

Vaatimusten kohde	Vaatus	Tarkennus
<b>1. Käyttäjän vaatimukset</b>	1.1 Ajoneuvon huippunopeus on oltava vähintään 100 km/h.	[1]
	1.2 Järjestelmä on mitoitettava 8000 kg:n akselipainolle.	[17]
	1.3 Alustan maavaran on oltava nimellisasennossa vähintään 430 ± 15 mm ajoneuvon keskilinjalla.	[URR]
	1.4 Jokaisessa navassa on oltava veto.	Työssä suunnitellaan rakenne yhdelle pyörän navalle, jota voidaan monistaa [17].
	1.5 Jokaisen akselin pitää olla ohjattavissa.	[1]
	1.6 Rengaskoon on oltava 14R20.	[18]
	1.7 Järjestelmän on oltava toimintakykyinen -46°C...+49°C lämpötiloissa.	1.7.1 (STANAG 2895 A1, A2, A3, B1, B2, B3, C0, C1, C2) [18]

	1.8 Alustan on kyettävä toimimaan standardin STANAG 2895 mukaisissa sääolosuhteissa.	1.8.1 Sääluokat A2, A3, B1, B2, C0, C1, and C2 [18]
	1.9 Alusta on oltava varastoitavissa standardin STANAG 2895 mukaisissa sääolosuhteissa ilman haittavaikutuksia alustaan.	1.9.1 Sääluokat A1, A2, A3, B1, B2, C0, C1, and C2 [18]
	1.10 Ajoneuvon sähköisten järjestelmien on täytettävä STANAG 2601 -standardin vaatimukset.	[URR]
	1.11 Ajoneuvon on oltava uintikykyinen.	1.11.1 Napamoottori sekä siihen liittyvät letkut ja liittimet oltava vesitiiviitä [1]. 1.11.2 Hydropneumaattisen jousen on kestävä upotusta [1].
	1.12 Ajoneuvon huoltoväli on oltava vähintään neljä vuotta.	1.12.1 Suurempia normaalkäytön ulkopuolisia huoltoja (mm. komponenttien vaihdot) ei saa olla useammin kuin 4 vuoden välein [URR]. 1.12.2 Napamoottorin integrointiin liittyvien komponenttien huoltovälin oltava vähintään 4 vuotta (mm. letkut, liittimet ja kaapelit) [URR].
	1.13 Järjestelmän ei tule vaatia merkittäviä toimenpiteitä viiden vuoden varastoinnin aikana.	[3]
	1.14 Napamoottorin huoltovälin oltava vähintään vuosi.	[19]
	1.15 Normaalit käyttöhuollot on kyettävä tekemään ajoneuvon omilla työkaluilla.	[URR]
	1.16 Alustarakenteen on mahdollistettava useammat eri ajoneuvotyytit.	1.16.1 APC, IFV, TD, TMSV, CV, RV, AMB, ATMGV, A-AV, EWV [1].
	1.17 Ajoneuvon on kestävä dokumentin D511951 keskimääräisen käyttöprofiilin mukaista käyttöä.	[3]

	1.18 Kaikkien alijärjestelmien on toimittava suunnitellusti IEC 61000-4-2-standardin tason neljä mukaisen elektrostaattisen varauksen testissä.	[18]										
	1.19 Ajoneuvon EMC-ominaisuuksien (Electromagnetic compatibility) eli sähkömagneettisen yhteensopivuuden on täytettävä MIL-STD-461E-standardin mukaisten testien raja-arvot:	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="1121 371 1281 510">1.19.1</td> <td data-bbox="1281 371 1530 510">RE102 Sähkömagneettiset säteilypäästöt</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1121 510 1281 647">1.19.2</td> <td data-bbox="1281 510 1530 647">RS103 Immunity sähkömagneettiselle säteilylle</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1121 647 1281 786">1.19.3</td> <td data-bbox="1281 647 1530 786">CE102 Johdetut sähkömagneettiset päästöt</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1121 786 1281 972">1.19.4</td> <td data-bbox="1281 786 1530 972">CS101, CS114, CS115, CS116 Immunity johdetulle sähkömagneettisille</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1121 972 1281 1066">1.19.5</td> <td data-bbox="1281 972 1530 1066">Säädös (EC) No 661/2009 [18].</td> </tr> </table>	1.19.1	RE102 Sähkömagneettiset säteilypäästöt	1.19.2	RS103 Immunity sähkömagneettiselle säteilylle	1.19.3	CE102 Johdetut sähkömagneettiset päästöt	1.19.4	CS101, CS114, CS115, CS116 Immunity johdetulle sähkömagneettisille	1.19.5	Säädös (EC) No 661/2009 [18].
1.19.1	RE102 Sähkömagneettiset säteilypäästöt											
1.19.2	RS103 Immunity sähkömagneettiselle säteilylle											
1.19.3	CE102 Johdetut sähkömagneettiset päästöt											
1.19.4	CS101, CS114, CS115, CS116 Immunity johdetulle sähkömagneettisille											
1.19.5	Säädös (EC) No 661/2009 [18].											
	1.20 Ajoneuvon on täytettävä direktiivin 2007/46/EC mukaiset tyyppihyväksynnot.	1.20.1 Säädös (EU) No 1229/2012, Kategorian N3G ajoneuvoille (maastoajoneuvo, symboli G) [URR].										
	1.21 Ajoneuvon materiaalien pitää olla kierrätettävissä mahdollisimman hyvin.	[URR]										
	1.22 Ajoneuvon on täytettävä vähintään Euro VI raskaan ajoneuvon päästönormit.	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="1121 1391 1281 1485">1.22.1</td> <td data-bbox="1281 1391 1530 1485">Säädös (EC) No 595/2009.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1121 1485 1281 1624">1.22.2</td> <td data-bbox="1281 1485 1530 1624">Kansallisella poikkeuksella Euro III tai V riittää, [URR].</td> </tr> </table>	1.22.1	Säädös (EC) No 595/2009.	1.22.2	Kansallisella poikkeuksella Euro III tai V riittää, [URR].						
1.22.1	Säädös (EC) No 595/2009.											
1.22.2	Kansallisella poikkeuksella Euro III tai V riittää, [URR].											
	1.23 Melutasojen on täytettävä direktiivin 70/157/ETY vaatimukset.	[URR]										
	1.24 Häiriötilanteen sattuessa ajoneuvon käytön on säilyttävä turvallisenä ja ajoneuvon toimintakykyisenä.	1.24.1 Letku- tai kaapelirikko ei saa lamauttaa koko ajoneuvoa [URR].										
	1.25 Mahdollinen letkurikko ei saa aiheuttaa henkilö- tai ympäristövahinkoa.	[URR]										

	1.26 Järjestelmistä on toimitettava kaaviot sekä toiminta- ja rakennekuvaukset.	[17]
<b>2. Ajoneuvon vaatimukset</b>	2.1 Joustoliikkeen on oltava vähintään 250 mm sisäänpäin ja 200 mm ulospäin pyöräaseman nimellisasettoon verrattuna.	2.1.1 Kokonaisjoustoliikkeen tulee noin 450 mm [URR].
	2.2 Rakenteen on sallittava kaarteiden sisäpuoleisella pyörällä vähintään 34° pyörien maksimikäntökulman.	[URR]
	2.3 Rakenne pitää olla monistetavissa jokaiselle pyörälle.	[17]
	2.4 Jarrumomentin on riitettävä 0,8 G:n hidastuvuuden saavuttamiseen.	2.4.1 Otetaan huomioon painonsiirto.
	2.5 Napojen yhteenlaskettu veto-voima oltava riittävä 0,8 G:n vetovoiman saavuttamiseen.	[17]
	2.6 Napakohtainen vetovoima oltava kaksinkertainen kohdassa 2.5 määritettyyn keskimääräiseen arvoon nähden.	2.6.1 Näin saavutetaan hyvä mäennousukyky.
		2.6.2 Otetaan huomioon painonsiirto [17].
<b>3. Komponentti-vaatimukset</b>	3.1 Napamoottorin tehon on oltava 60–90 kW per napamoottori jatkuvana tehona.	[17]
	3.2 Napamoottorin hukkalämpöteho ei saa ylittää 11,5 kW:a.	[19]
	3.3 Napamoottorin on tuettava CTIS-järjestelmää.	[1], [17]
	3.4 Kaapelivaurion sattuessa napamoottorin on siirryttävä turvalliseen tilaan.	[SRR]
	3.5 Jäähdytysnesteenä käytettävä propyleeniglykolin ja veden seosta.	3.5.1 50:50 tilavuussuhde [SRR].
	3.6 Jäähdytysnesteen lämpötila ei saa ylittää 80 °C imuvirtauksessa, eikä 105 °C moottorilta ulosvirtauksessa.	[SRR]
	3.7 Jousitus tulee olla hydropneumaattinen suoraan alatukivarteen	[17]

	kiinnitetty jousielementti, joka on kiinnitetty apurungon sisälle.	
	3.8 Nimellisasennossa jousen kaasutilavuuden paineen on oltava 60 bar.	[SRR]
	3.9 Jousen kaasutilavuuden maksimipaine ei saa ylittää 400 baaria.	[SRR]
	3.10 Käyttöjarrun toimilaitteen tulee olla hydraulinen.	[1]
	3.11 Letkuille ja sähkökaapeleille on jätävä riittävä tila.	[SRR], [17]
	3.12 Letku- ja kaapelilinjat on linjattava mahdollisimman suojaan ja reitien pitää mahdollistaa korkea kestoikä.	[SRR]
	3.13 Letkujen on oltava heijastamaton materiaalia.	3.13.1 Letkut eivät saa heijastaa valoa tai lämpösäteilyä [SRR].
	3.14 Letkujen ja kaapelien on kestettävä vähintään keskimääräisen käyttöprofiilin mukaista käyttöä yhden huoltovälin ajan.	3.14.1 Neljän vuoden huoltovälitavoite [SRR].

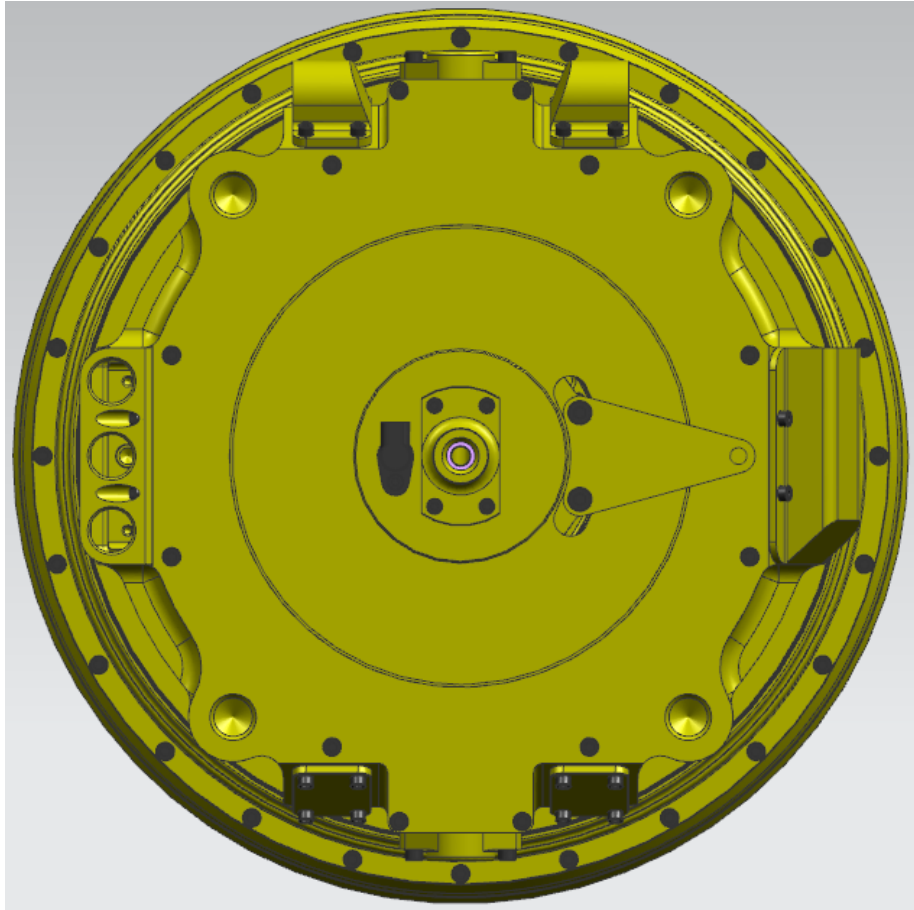
## 4. PYÖRÄNTUENNAN SUUNNITTELU

Pyöräntuenta on suunniteltava ennen kuin siihen voidaan integroida napamoottori ja varsinaiseen hydraulikkasuunnitteluun voidaan siirtyä. Työssä käytettävä pyöräntuenta perustuu karkeasti yksinkertaistettuun Patria AMV:n pyöräntuentaan. Patrian aitoja komponentteja ei voida tässä julkisessa työssä esittää, koska ne kuuluvat Patrian ydinosaimisen piiriin, eikä niitä haluta julkiseen jakoon. Lisäksi pyöräntuennan geometrian tarkempi suunnittelu jää työn rajauksen ulkopuolelle. Pyöräntuenta noudattelee silti suuntaa antavasti kiinnityspisteiltään ja kulmiltaan AMV XP:tä, jotta työstä saadaan järkeviä ja toimeksiantajalle hyödyllisiä tuloksia.

Täysin uusia tätä konseptia varten suunniteltavia osia ovat hydropneumaattinen jousolementti, erilaiset letkusuojuimet sekä napamoottorille sopiva olka-akseli. Napamoottorin valinta ja valittuun napamoottoriin vaadittavat muokkaukset käsitellään myös seuraavassa alaluvussa.

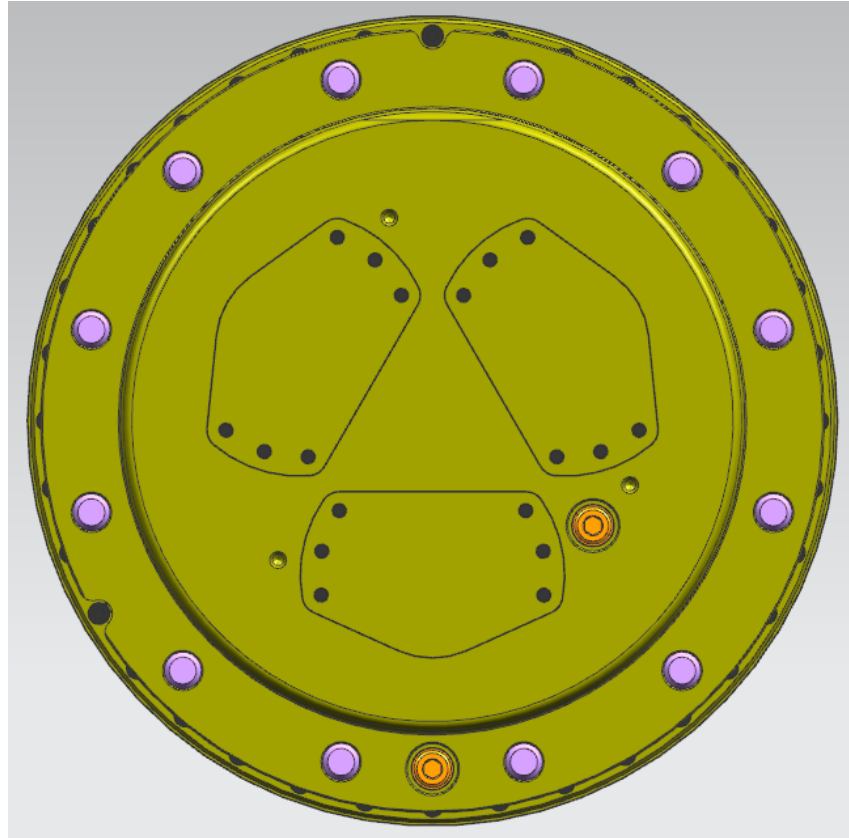
### 4.1 Sähköinen napamoottori

Patrian ajoneuvoon integroitavaksi napamoottoriksi valitaan prototyyppiasteella oleva QinetiQ HDU-100 sähköinen napamoottori. Tämä työ toimii jatkona toimeksiantajan aiemmin teettämälle diplomityölle, jossa napamoottorivaihtoehdot rajattiin QinetiQ HDU-40:n ja HDU-100:n välille [20]. Näistä kahdesta suurempi ja tehokkaampi HDU-100 täyttää paremmin ajoneuvolle asetetut massa- ja suorituskykyvaatimukset. [12], [19] Valittu napamoottori 3D-mallin muodossa on esitelty liitinpintoineen Kuvissa 14 ja 15.



**Kuva 14.** QinetiQ HDU-100 ripustuksen puoleinen liitinpinta.

Kuvassa 14 on HDU-100 napamoottorin apurungon puoleinen rajapinta. Moottorin keskellä olevan kehän takana on jarruelementti, jolle ei kuitenkaan ole saatavissa tilava-  
rausta ja käyttövipua tarkempia ominaisuuksia. [19], [21] Seuraavassa kuvassa näkyy napamoottorin toisen puolen rajapinta.

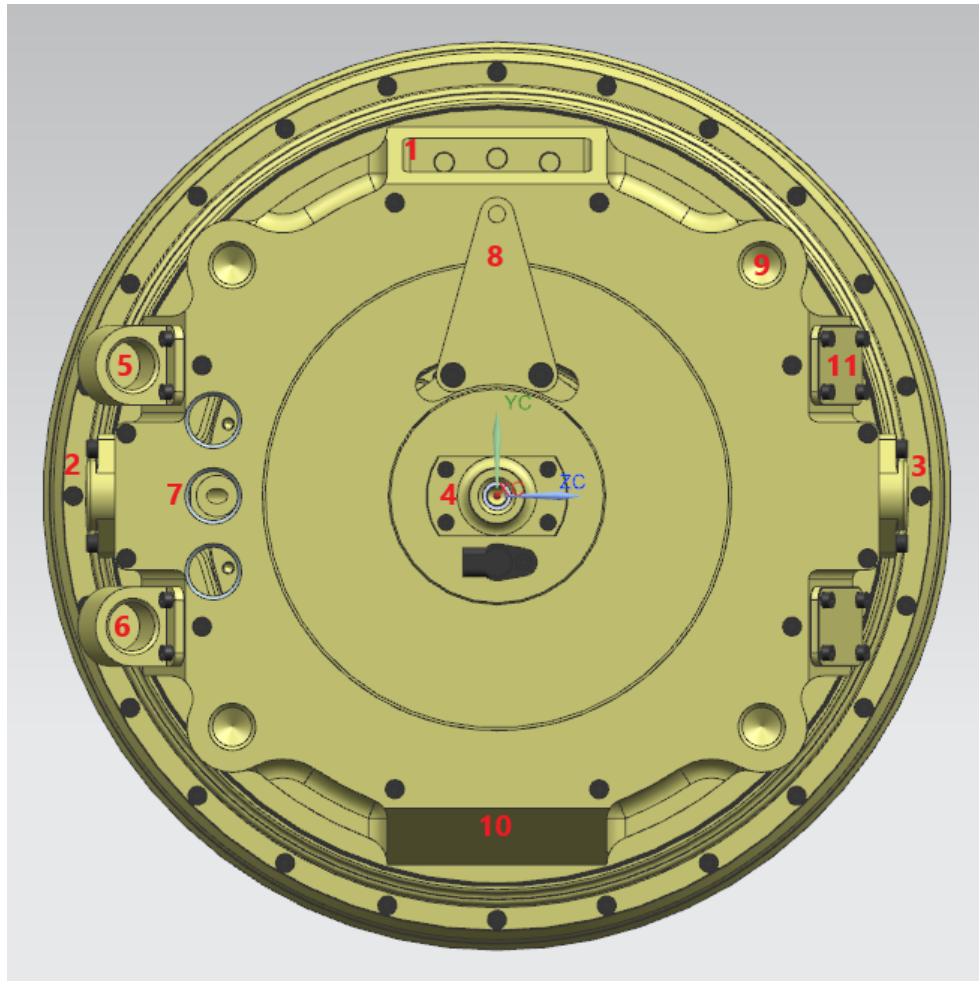


**Kuva 15.** QinetiQ HDU-100 renkaan puoleinen liitinpinta.

Kuvassa 15 napamoottorin renkaan puolen rajapinnassa keskellä alhaalla näkyy oranssi öljytilavuuden tyhjennysliitin ja siitä hieman yläoikealle täyttöpörtti. CTIS-järjestelmän ulostuloportti näkyy kuvassa keskimmäisen kehän yläreunan keskellä olevassa viisteessä. Moottori kiinnitetään vanteeseen sen kehällä olevilla kahdellatoista M22 x 1,5 vaarnaruuvilla. [21]

Napamoottorin muokkaaminen Patrian ja muidenkin asiakkaiden tarpeisiin on mahdollista etenkin, koska valittu napamoottori on vasta prototyyppiasteella tuotekehityksessä [12]. Ensimmäisenä muokkauksena napamoottoria pitää kiertää perusasennostaan 90° liitinpinnastaan vastapäivään, jotta jarrun toimilaite saadaan tilavampaan paikkaan pois olka- ja ohjausakseiden tieltä. Samalla sähkökaapeleiden paikkaa joudutaan muokkaamaan, koska muuten alatukivarsi kiinnityspisteineen tulee niiden tielle. Kierron seurauksena Kuvassa 15 keskellä alhaalla näkyvä moottorin öljytilavuuden tyhjennysportin paikka siirtyy alhaalta navan oikeaan reunaan, joten moottorin öljynvaihto hankaloituu hieman. Kierrosta seuraava merkittävämpi haitta on napamoottorin symmetrian menetyks, jonka vuoksi napamoottorista joudutaan muokkaamaan peilikuvaversio ajoneuvon toiselle puolelle. Tätä konseptia varten spesifioitu napamoottori esitellään Kuvassa 16. Kuvaan on myös numeroitu moottoriin tulevat liitännät ja muut huomion arvoiset kohdat.





**Kuva 16.** Siemens NX-sovelluksella muokattu QinetiQ HDU-100 -napamoottori.

Kuten Kuvasta 16 voidaan havaita sähkökaapeleiden (7) uudeksi paikaksi valikoitui laippapinnan vasen reuna, koska ylä- ja alareunan liitännämahdollisuuksia rajoittavat tukivarret ja oikeassa reunassa eteen tulee ohjausvarsi. Lisäksi napamoottorin keskellä on jarru, joten kaapeleita ei voi kiinnittää siihen. Uusi paikka on myös looginen, sillä datakaapelit lähtevät jo vasemmasta reunasta, joten siirron ansiosta kaikki kaapelit saadaan samalle puolelle ja mahdollisesti jopa samaan nippuun. Korkeajännitekaapeleiden suojaukseen on nyt kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta ne eivät tuota häiriötä lähellä kulkeville datakaapeleille. Samalla datakaapeleiden (5 & 6) liitännän suuntaa muokataan siten, että kaapelit lähtevät tukivarsien suuntaisesti kohti apurunkoa sen sijaan, että toinen niistä lähtisi ylös ja toinen alaspäin, kuten QinetiQ:n alkuperäisessä prototyypissä. Moottorin liitännät on listattu Taulukkoon 2.

**Taulukko 2. Napamoottorin liitännät [21].**

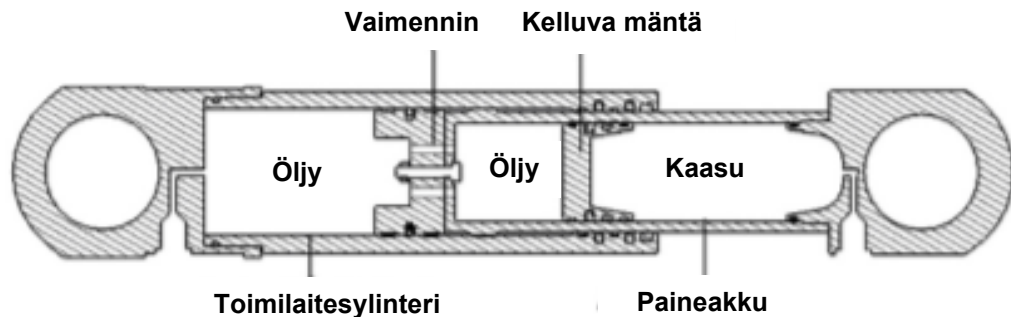
<b>Nro.</b>	<b>Liitin</b>	<b>Muut huomiot</b>
1	Vaihteensiirron pneumatiikan sisäänmeno.	Kaikki kolme normaalisti suojassa yhden kannen alla, josta yksi läpivienti ulos.
2	Jäähdytysnesteen ulostulo.	
3	Jäähdytysnesteen sisäänmeno.	
4	CTIS-sisäänmeno.	Optio.
5	Data-kaapelin liitäntä.	Resolveri.
6	Data-kaapelin liitäntä.	Moottorin käämien ja öljyn lämpötila.
7	Voimakaapeleiden liitännät.	kolmivaiheinen moottori, joten kolme voimakaapelia.
8	Jarrun käyttövipu.	Sekä käyttö- että seisontajarru.
9	Napamoottorin kiinnitysreiät.	M24 x 4.
10	Voimakaapeleiden vanha paikka.	Peitetty kannella.
11	Varaukset datakaapeleiden liitännöille.	Voidaan ottaa käyttöön esimerkiksi ajoneuvon toisella puolella.

Tätä työtä varten vaihteensiirron paineilmaliitännöiden kansi on poistettu, jotta paineilma-liittimet voidaan valita ja esittää tarkemmin. Suojakansi näkyy Kuvassa 14 moottorin oikeassa reunassa. Tarkemmin Taulukossa 2 esitellyt liitännät ja komponentit käsitellään luvussa 5.

## 4.2 Hydropneumaattisen jousen suunnittelu

Tässä alaluvussa käsitellään konseptin pyöräntuennassa käytettävän hydropneumaattisen jousen suunnittelua. Suunnittelu sisältää jousielementin karkean mitoituksen ja yksinkertaisen 3D-mallin, joka toimii pääasiassa tilavarauksena johdinsuunnittelua varten. Samalla selvitetään, onko hydropneumaattisen jousen asemointi AMV:n pyöräntuentaan lähes vaakatasoon käytettävissä olevan tilan osalta mahdollista.

Pneumaattisen jousen ja hydraulisen vaimennuksen vahvuuksia yhdistelevällä hydropneumaattisella jousituksella saavutetaan monia etuja tavallisiin kierrejousiin nähden. Näitä ovat etenkin maastokykäisessä panssariajoneuvossa tärkeät hyvä maastoliikkuvuus ja liikenopeus sekä korin stabilisointi, joka osaltaan mahdollistaa erilaisten asejärjestelmien käytön jopa liikkeestä. [22] Tyypillinen nykyaikaisen hydropneumaattisen jousen rakenne yksinkertaistettuna on esitetty Kuvassa 17.



**Kuva 17.** Hydropneumaattisen jousen rakenne, muokattu lähteestä [22].

Nimensä mukaisesti hydropneumaattinen jousielementti koostuu sekä hydraulisesta että pneumaattisesta osasta. Jousen toisessa päässä olevan paineakun kokoonpuristuva kaasu toimii jousena ja toisen päässä käytännössä lähes kokoonpuristumaton öljy toimilaitesylinterinä eli vaimentimena. Öljy ja kaasu erotetaan toisistaan kelluvalla männällä. Lisäksi hydropneumaattinen vaimenninelementti sisältää kaasutilavuuden täyttö- ja säätöventtiilin sekä tiivisteet. Tavallisesti, kuten myös tässä työssä, hydropneumaattisen jousen öljy on tavanomaista iskunvaimenninöljyä ja kaasuna käytetään typpeä. Ajossa mäntä liikkuu jousielementin sisällä pyöräntuennan kuormitusten ja maaston muotojen

mukaan. Kelluvan männän asema määrittää kaasujousen jäykkyyden. [22] Jos kaasutilavuus pienenee tai kaasun lähtöpainetta kasvatetaan säätöventtiilin avulla, jousen jäykkyys kasvaa ja päin vastoin. [23]

Tämä konsepti eroaa Patrian tavallisesti käyttämästä jousituksesta siten, että jousielementtien sijoittelussa hyödynnetään sähköisen voimansiirron ansiosta apurungon sisään syntyvää tilaa. Kun veto- ja kardaaniakseleita ei tarvita, hydropneumaattiset jouset voidaan sijoitella lähes vaakatasoon siten, että osa jousesta on apurungon sisällä. Jousen alapää kiinnittyy tavallisesti alatukivarteeseen ja yläpään kiinnitys on apurungon sisällä. Rakenteen etuna on, että jouset saadaan parempaan suojaan osittain rungon sisään. Erityisen tärkeää tämä on panssariajoneuvojen kohdalla, koska niillä ajetaan paljon maastossa ja komponenttien ballistisella suojallakin on merkitystä ajoneuvon suorituskykyä tarkasteltaessa. Myös painopisteen ja ilmanvastuksen kannalta ratkaisu on edullinen, vaikkakin raskaan ja kulmikkaan panssariajoneuvon kohdalla niiden merkitys on hyvin marginaalinen.

Vaatimuksista saadaan lähtöarvot hydropneumaattisen jousen mitoittamiseen. Luvun 3 vaatimuslistan kohdat 3.8 ja 3.9 määrittävät kaasutilavuuden nimellis- ja maksimipaineet. Lisäksi kohdan 2.1 joustovaatimus ja jousielementin kiinnityspisteet määrittelevät iskunpituuden, joka voidaan mitata rakenteen 3D-mallista. Ajoneuvon akselimassa, jonka arvioidaan jakautuvan tasan molemmille pyörille, puolestaan saadaan vaatimuksesta 1.2. Jousielementin mitoittamiseen käytetään jousista kuormittavaa massaa, joka saadaan yhdelle jouselle vähentämällä akselimassan puolikkaasta jousittamaton massa. Jousittamattomaan massa lasketaan ne pyöräntuennan komponentit, jotka eivät lepää tuennan jousituksen päällä. Näitä ovat muun muassa pyörännapa, renkaat, vanteet ja olka-akselit. [24] 3D-malliin ja komponenttien taulukkoarvoihin perustuvat arviot konseptin jousittamattomasta massasta on esitetty taulukossa 3. Samaa taulukkoa on lisätty referenssinä AMV:n tavanomaisen pyöräntuennan jousittamattomat massat.

**Taulukko 3.** Konseptin jousittamaton massa verrattuna tavanomaiseen pyöräntuentaan [12], [20].

Komponentti	Standardi (kg)	HDU-100 (kg)
Rengas & vanne 20x10 "	176	170
Napa-asennelma	201	250
½ Alatukivarsi	22	32
½ Ylätukivarsi	11	12
Ohjausvarsi	3	3
½ Jousielementti	25	17,5
½ Raidetanko	3,5	3,5
½ Vetoakseli	14	-
½ Letkut	0,5	1,5
½ Kaapelit	-	0,5
Yhteensä	456	490

Massojen määrittämiseen on käytetty karkeaa arviota, jonka mukaan apurunkoon kiinnittyvien komponenttien massasta puolet on jousittamatonta ja puolet jousitettua. Lisäksi napamoottoria varten muokattu vanne on arviolta hieman standardivannetta kevyempi, koska vanteen keskiosaa ei tarvita napamoottorin täyttäessä sen tilan. Jousielementin massa-arvioissa on käytetty AMV:n hydropneumaattisen jousen massaa ja tämän työn jousielementtiä muistuttavan jousen massoja. Edellisestä taulukosta voidaan huomata, että sähköinen napamoottori lisää jousittamatonta massaa hieman yli 7 %. Ero ei ole kovin merkittävä, kun ottaa huomioon, että tämän työn konseptin pyöräntuennan komponentit ovat kooltaan hieman ylimitoitettuja. Todellisuudessa siis massojen välinen ero on jopa hieman arvioitua pienempi.

Hydropneumaattisen jousen mitoituksessa käytettävä jousitettu paino  $m_{jousitettu}$  saadaan kaavalla (1):

$$m_{jousitettu} = \frac{m_{akseli}}{2} - m_{jousittamaton}. \quad (1)$$

Kaavassa (1)  $m_{akseli}$  on konseptin akselipaino ja  $m_{jousittamaton}$  jousittamaton paino. Nimellisasennossa jousituksen ja pyöräntuennan on tarkoitus pitää ajoneuvo vaaditussa ajo- korkeudessa. Jousen siis tulee tuottaa pyöränkuormaa vastaava voima, jotta nimellisasento säilyy. Koska jousen kaasutilavuuden painetaso nimellisasennossa on lukittu vaatimuksella 3.8 sekä jousitettu massa ja sitä kautta myös pyöränkuorma on vakio, vaaditun männän halkaisijan voidaan johtaa riippuvan jousen asennosta eli kiinnityspisteistä. Hydropneumaattisen jousen männän pinta-ala  $A$  saadaan kaavalla (2):

$$A = \frac{F_{nom}}{P_{nom}}. \quad (2)$$

Kaavassa (2)  $F_{nom}$  on jousen nimellisasennossa tuottama voima ja  $p_{nom}$  vaadittu nimelispaine. Pyöränkuorman nimellisasennossa tuottama momentti  $M$ , johon jousen tuottaman voiman  $F$  täytyy ylittää, saadaan kaavasta (3):

$$M = X \times m_{jousitettu} \times g. \quad (3)$$

Kaavassa (3)  $X$  on renkaan vipuvarsi, joka saadaan 3D-mallista mittaamalla, ja  $g$  normaaliputoamiskiiltovyvyys. Voima  $F_{nom}$ , joka vaaditaan, jotta hydropneumaattinen jousi voisi tuottaa nimellisasennossa pyöräkuorman tuottamaa momenttia vastaavan momentin, saadaan kaavasta (4).

$$F_{nom} = \frac{M}{S_{nom}} \quad (4)$$

Kaavassa (4)  $S_{nom}$  on jousivoiman momenttivarsi nimellisasennossa. Yhdistetään kaavat (2) ja (4):

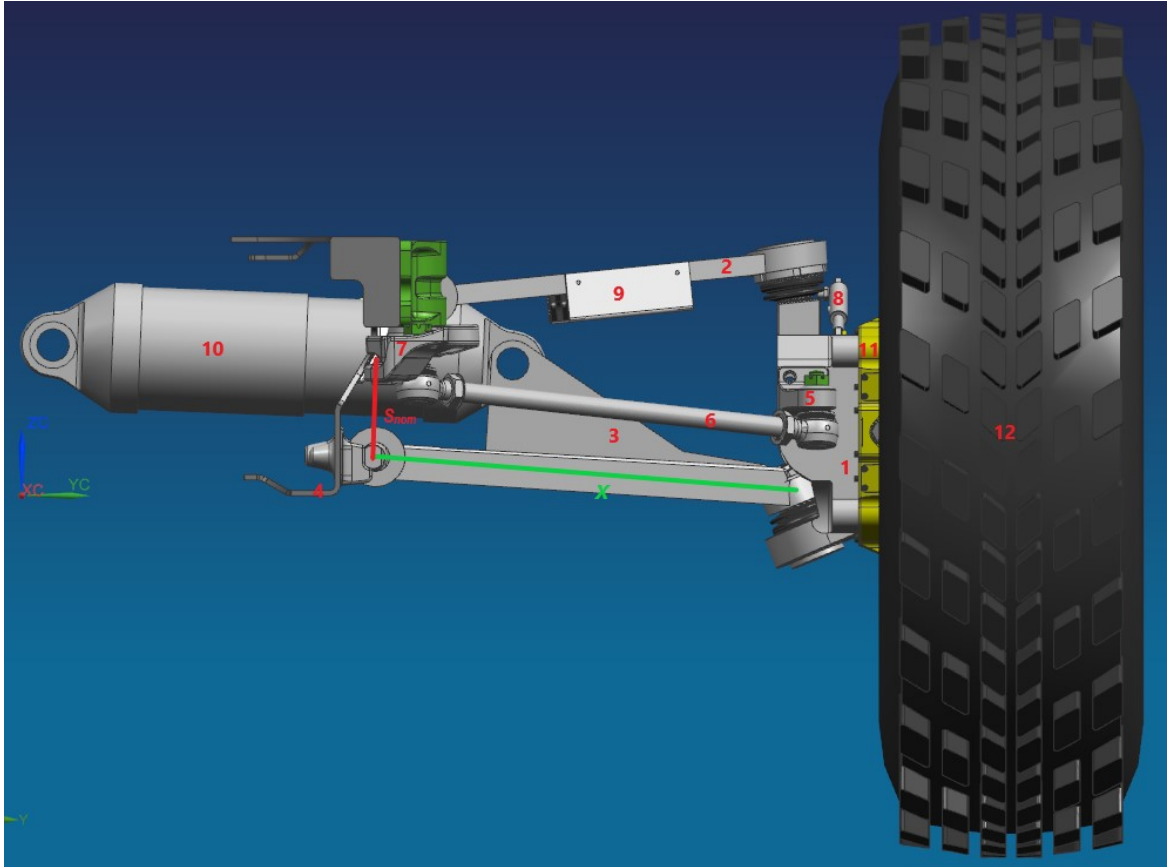
$$p_{nom} \times A = \frac{M}{S_{nom}}, \quad (5)$$

jolloin huomataan, että lopulta ainoat jousen mitoitukseen liittyvät muuttujat ovat männän halkaisija  $A$  ja momenttivarsi  $S_{nom}$ , koska  $p_{nom}$  tiedetään ja  $M$  voidaan laskea kaavalla (3). Kun hydropneumaattisen jousen paikkaa muokataan, momenttivarsi muuttuu ja siten myös vaadittu männän halkaisija kaavan (5) mukaan.

Jousen ylä- ja alakiinnityspisteet haetaan sovittamalla jousen 3D-malleja pyöräntuennan 3D-malliin. Jousen sijoitteluun vaikuttaa erityisesti käytettävissä oleva tila, jousen momenttivarren optimointi sekä sisään- että ulosjoustossa nimellisasennon lisäksi ja iskunpituuden määrittäminen järkeväksi. Aluksi kokeiltiin kiinnittää jousielementin alapäätä suoraan alatukivarteeseen, mutta tällöin momenttivarsi jäi liian lyhyeksi vaatien liian leveää mäntää. Ratkaisuna ongelmaan jousen alapää kiinnitetään alatukivarresta kohtisuoraan lähtevän varren päähän. Näin jousen momenttivartta saadaan pidennettyä ja samalla jousi mahtuu liikkumaan paremmin apurungon läpiviennissä.

Yläpään kiinnitys viedään mahdollisimman pitkälle apurungon sisälle, jotta iskua saadaan pidemmäksi. Paikaksi valitaan apurungon keskilinja siten, että jousi on nimellisasennossa vaaka-asennossa ja molempien puolten josten kiinnitykset ovat samalla akselilla. Alapään kiinnityksen kohdan alatukivarressa määrää vaatimus 2.1 eli pyöräntuennan joustoliikevaatimus. Kiinnityspiste määräytyy siten, että jousi mahtuu liikkumaan

apurungon läpiviennissä ilman kontakteja pyöräntuennan liikkeiden mukana. Pyöräntuennan 3D-malli nimellisasennossa näkyy Kuvassa 18. Kuvaan on myös merkattu  $X$  ja  $S_{nom}$  mitat sekä numeroitu pyöräntuennan osat mukaan luettuna alaluvussa 4.3. esiteltävät uudet komponentit.



**Kuva 18.** Pyöräntuennan 3D-malli nimellisasennossa komponentteineen.

Hydropneumaattisen jousen (Kuva 18, osa 10) kiinnityspisteet ilmenevät Kuvasta 18. Lisäksi kuvassa näkyvät jo esitellyistä komponenteista napamoottori (Kuva 18, osa 11) ja vaatimuksen 1.6 mukainen 14R20 rengas (Kuva 18, osa 12). Pyörän momenttivarsi  $X$  on merkitty kuvaan vihreällä ja jousen varsi  $S_{nom}$  punaisella viivalla. Muut numeroidut komponentit esitellään tarkemmin alaluvussa 4.3.

Jousen momenttivarsi nimellisasennossa  $S_{nom}$  on 0,150 m ja pyöränkuorman momenttivarsi  $X$  0,629 m, jolloin ratkaisemalla kaavasta (5) hydropneumaattisen jousielementin männän pinta-ala  $A$  ja sijoittamalla arvot pinta-alaksi saadaan 0,024 m<sup>2</sup>. Vastaavasti männän halkaisija  $d$  on 174,8 mm. 3D-mallista puolestaan jousen maksimipituudeksi  $L_{max}$  saadaan mitattua 0,730 m, nimellisasennon mitaksi  $L_{nom}$  0,692 mm ja minimipituudeksi  $L_{min}$  0,629 mm. Näin jousen iskunpituudeksi / saadaan laskettua  $L_{max} - L_{min} = 0,101$  m.

Boyle'n lain mukaan kaasutilavuuden paineella ja tilavuudella on yhteys:  $pV = \text{vakio}$ . Hydropneumaattisen jousen puristuessa kaasun paineen muutokset ovat kuitenkin niin suuria, että tapahtumaa kuvaa paremmin adiabaattinen prosessi. [22] Tällöin prosessille pätee kaava (6):

$$p_o \times V_o^K = p_i \times V_i^K. \quad (6)$$

Kaavassa (6)  $p_o$  on alkupaine ja  $V_o$  alkutilavuus ja  $p_i$  paine muutoksen jälkeen ja  $V_i$  tilavuusmuutoksen jälkeen.  $K$  on adiabaattivakio, jonka arvo kaksiatomiselle kaasulle, kuten typpi, on  $\frac{7}{5}$  [25]. [22] Kun tiedetään, että hydropneumaattisen jousen kaasutilavuus on sylinterin muotoinen, sen tilavuus saadaan kertomalla männän pinta-ala  $A$  kaasutilavuuden korkeudella. Jousen tilan muutokselle nimellisasennosta maksimisisäänjoustoon (minimitilavuus ja maksimipaine) pätee kaava (7):

$$p_{max} \times (A \times x)^K = p_{nom} \times [A \times (x + s)]^K. \quad (7)$$

Kaavassa (7)  $p_{max}$  on vaatimuslistassa määritelty jousen maksimipaine,  $x$  kaasutilavuuden minimikorkeus ja  $s$  jousen nimellis- ja minimipituuksien ero eli liikematka minimistä nimellisasettoon ( $L_{nom} - L_{min}$ ). Ratkaistaan kaavasta  $x$ , jolloin saadaan selville kaasutilavuuden minimitalavuus ja sitä kautta myös nimellis- ja maksimitilavuudet.

$$x = \frac{L_{nom} - L_{min}}{10^{\left(\frac{1}{K} \times \log \frac{p_{max}}{p_{nom}}\right) - 1}} \quad (8)$$

Sijoittamalla arvot kaavaan (8) kaasutilavuuden minimikorkeudeksi saadaan 0,0218 m. Kun minimikorkeus tiedetään, voidaan kaasutilavuudet laskea. Minimikaasutilavuus on 0,524 l, nimellistilavuus 2,03 l ja ulosjoustossa tilavuus on vastaavasti 2,95 l. Kaavasta 6 kaasutilavuuden painetasoksi ulosjoustossa eli kaasutilavuuden ollessa suurimmillaan saadaan 35,6 bar.

### 4.3 Muiden komponenttien suunnittelu

Tässä alaluvussa esitellään lyhyesti muut työssä suunnitellut lähinnä konseptin pyöräntuentaan liittyvät komponentit. Näitä ovat olka-akseli, ylä- ja alakolmiotukivarret sekä apurunko. Lisäksi jarrun toimilaite käsitellään tässä alaluvussa. Suunniteltujen pyöräntuennan mekaanisten komponenttien lujuustarkastelu ja tarkemmat materiaalivalinnat rajataan työn ulkopuolelle, joten osat on mitoitettu pääosin hieman yläkanttiin ja niiden päätarkoitus on lähinnä mahdollistaa napamoottorin integroinnin suunnittelu. Kaikki tämän alaluvun komponentit on numeroitu Kuvaan 18.



Olka-akseli on pyöräntuennan keskeinen osa, johon suurin osa tuennan komponenteista, kuten pyörännapa, tukivarret ja ohjausvarsi kiinnittyvät [26]. Tämän konseptin olka-akselin (Kuva 18, osa 1) suunnittelun lähtökohtana on, että sen tukivarsien nivelpisteiden pitää vastata AMV XP:tä, jotta pyöräntuennan geometriasta saadaan realistinen ja pyöräntuenta liikkuu oikealla tavalla. Ohjausvarren kiinnityspiste olka-akseliin suunnitellaan samalla periaatteella. Varren navan puoleinen kiinnityspinta muotoillaan napamoottoriin mukaan siten, että akseli väistää jarrua ja sen käyttövipua. Napamoottori kiinnitetään olka-akseliin kiinnitysreikiin neljällä M24-pultilla [21]. Suunniteltu olka-akseli on esitetty Kuvassa 19.



**Kuva 19.** *Konseptia varten suunnitellun olka-akselin 3D-malli.*

Kuvassa 19 olka-akselin sivupinnoilla on ohjausakseleiden kiinnitysreiät. Tukivarret puolestaan kiinnitetään akselin ylä- ja alapäissä oleviin reikiin. Kiinnitys napamoottoriin tulee jokaisessa nurkassa oleviin kiinnitysreikiin.

Ylä- ja alakolmiotukivarret (Kuva 18, osat 2&3) mallinnetaan samalla periaatteella kuin olka-akseli eli vastaamaan nivelpisteiden osalta AMV XP:tä ja muuten mahdollisimman yksinkertaisesti mahdollistaen kuitenkin realistisen napamoottoriin integroinnin suunnittelun. Lisäksi alatukivarteen suunnitellaan järeä kiinnityspiste alaluvussa 4.2 kuvaillulle hydropneumaattiselle jousielementille ja ylätukivarteen kiinnitettäväksi suunnitellaan

suojakannake letkuille (Kuva 18, osa 9). Pyöräntuennan ohjaukseen liittyvät komponentit, kuten raidetanko (Kuva 18, osa 6), ohjausvarsi (Kuva 18, osa 5) ja -vipu (Kuva 18, osa 7), on kopioitu yksinkertaistettuna AMV XP:n vastaavista.

Napamoottorissa oleva käyttöjarru vaatii toimiakseen toimilaitteen, joka käyttää moottorin etupinnassa olevaa jarruvipua. Käyttöjarrun tai sen vivun tarkempia ominaisuuksia ei kuitenkaan ole saatavissa, joten jarrun toimilaitteen tarkempi suunnittelu on tällä hetkellä mahdotonta. [21] Lisäksi Patrialla on omat jarrusuunnittelusta vastaavat asiantuntijansa, joten toimilaitteen tarkka suunnittelu voidaan rajata työn ulkopuolelle.

Vaatimusten mukaan jarrun toimilaitte on hydraulinen, joten se vaatii toimiakseen letkulinjan. Tämän suunnittelu kuuluu työn rajauksen sisään, joten myös hydraulinen toimilaitte on kuitenkin hahmoteltava karkeasti. Tässä konseptissa sen virkaa tekee yksinkertainen yksitoiminen hydraulisylinteri (Kuva 18, osa 8), johon liittyy yksi letkulinja. Jarruvivun 3D-mallista arvioidun liikkeen pituuden perusteella sylinterin iskunpituudeksi valitaan 100 mm, sylinterin männän halkaisijaksi käytettävissä olevan tilan mukaan 25 mm ja männän varren halkaisijaksi 16 mm. Sylinterin mitoituksessa käytetään apuna myös tilavaraukseen hyvin sopivaa Salhydro Oy:n HS-25X16X0100M-hydraulisylinteriä, jotta mitoista saadaan mahdollisimman realistiset. [27] Vaikka toimilaitte onkin täysin teoreettinen, realistiset mitat helpottavat letkureitityksen suunnittelua. Lisäksi jarrujärjestelmä vaatii kiinnikkeen toimilaitteelle ja vähintäänkin pölysuojan jarruvivulle, mutta niiden suunnittelu jätetään työn ulkopuolelle tarkempien vaatimusten puutteessa.

Patria AMV koostuu karkeasti kahdesta osasta. Panssarikorista ja apurungosta, jonka päällä kori makaa. Nämä liittyvät joustavilla elementeillä toisiinsa. Tämän työn rajauksen kannalta kiinnostava on lähinnä apurunko, johon pyöräntuennat kiinnitetään. [28] Konseptissa käytettävä apurunko (Kuva 18, osa 4) on muokattu AMV XP:n apurunko. Muutoksiin kuuluvat lähinnä läpivientien muokkaus, suurimpana vetoakselin läpivientireiän laajentaminen hydropneumaattista jouta varten. Lisäksi uusille letkuille ja kaapeleille tehdään luonnollisesti omat läpiviennit apurungon sisään. Tukivarsien kiinnityspisteiden ja ohjaukseen liittyvien komponenttien osalta tämän työn apurunko vastaa AMV XP:tä. Koska konsepti on rajattu yhdelle pyöräntuennalle (etuvasen) ja apurungon ulkopintaan, tämän työn kannalta apurungosta malliin riittää ainoastaan etuvasen runkopalkki, johon pyöräntuenta kiinnitetään.

## 5. ALIJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELU

Alijärjestelmien suunnittelulla tarkoitetaan varsinaista napamoottorin integrointia, joka sisältää pääasiassa liittimien sekä letku- ja kaapelilinjojen suunnittelua. Letku- ja kaapeli linjojen suunnitteluun vaikuttaa pyöräntuennan konfiguraatio etenkin tilavarausten kautta. Lisäksi kaiken pohjana on napamoottorissa olevat liitännät sekä moottorin vaatimat letkut ja kaapelit. Apurungon päässä liitinten paikoitukseen käytettävissä olevaan tilaan vaikuttavat eniten hydropneumaattisen jousen ja tukivarsien tilavaraukset. Varsinaiseen reititykseen vaikuttavat etenkin pyöräntuennan liikkumista koskevat vaatimukset 2.1 ja 2.2 eli vaadittu jouston määrä ja maksimikäntökulma.

Edellä mainittujen pyöräntuennan liikkeisiin liittyvien vaatimusten lisäksi reitityksen muodostumiseen vaikuttaa komponenttivaatimus 3.12. eli linjat pitää suunnitella mahdollisimman suojaan ja niiden pitää mahdollistaa korkea kestoikä. Keskimääräisen käyttöprofiilin mukaan ajoneuvolla ajetaan paljon myös vaativassakin maastossa, joka on erittäin tärkeää huomioida reititystä suunnitellessa [3]. Letkut ja kaapelit eivät saa jäädä muiden liikkuvien komponenttien, kuten ohjausvivun, tukivarsien ja hydropneumaattisen jousen väliin, mutta lisäksi rakenteen on suojattava niitä mahdollisimman paljon ulkoisilta voimilta. Letkut eivät siis saa kulkea sellaisia reittejä, että ne olisivat ensimmäisenä ottamassa iskuja vastaan esimerkiksi alatukivarren alla tai tukivarsien etupuolella.

Johtimien valintaan vaikuttavat niiden tekniset vaatimukset. Näitä ovat muun muassa minimitaivutussäde, reitin pituus, letkun paineenkesto, käyttölämpötila sekä EMC- ja suojausominaisuudet. Letkulta järjestelmässä vaadittava paineenkesto saadaan selville napamoottorin ominaisuuksista ja lämpötila sekä suojausominaisuudet on määritelty vaatimustaulukossa luvussa 3. Jotta johtimien minimitaivutussäde ja pituus vaatimuksesta saadaan suuntaa, jokaiselle letkulle ja kaapelille suunnitellaan alustavat reitit jokaiseen yhdeksästä tutkittavasta pyöräntuennan asennosta. Työn kannalta kiinnostavia asentoja ovat nimellis- ja ääriasennot eli tutkittavaksi määräytyvät nimellisasento, sisään- ja ulosjoustojen maksimit sekä jokaisesta vasemmalle ja oikealle ääriasentoon käännöt eli yhteensä yhdeksän eri pyöränasemaa.

Tämän konseptin napamoottori vaatii letkut sekä jäähdytysnesteen sisään että ulos virtaukselle, CTIS-järjestelmälle, jarruyksikölle sekä vaihteensiirrolle. Taulukkoon 4 on lisätty jokaisen letkun hahmotellun reitin pituus ja sen mukaan syntyvä minimitaivutussäde ja Taulukkoon 5 kaapeleiden vastaavat tiedot. Nämä taulukon arvot toimivat pohjana

letku- ja kaapelivalintoja tehdessä sekä lopullista reititystä suunnitellessa. Reitin vaatima minimitaivutussäde muuttuu vielä, kun johtimen lopullinen pituus määritetään. Taulukoissa 4 ja 5 solujen ylempi luku on minimitaivutussäde ja alempi hahmotellun reitin pituus. Molemmat arvot on listattu millimetreissä.

**Taulukko 4. Potentiaalisten letkureittien pituudet ja minimitaivutussäteet.**

Pyöränasema	Jäähdytys sisään (mm)	Jäähdytys ulos (mm)	CTIS (mm)	Jarruletku (mm)	Vaihteen-siirto (mm)
Kääntö: ei Jousto: ei	82,0 927	75,7 893	79,9 884	61,4 663	56,5 849
Kääntö: vasen Jousto: ei	47,5 979	60,6 802	56,2 890	95,2 561,2	63,3 723
Kääntö: oikea Jousto: ei	72,2 841	97,6 957	83,1 859	55,4 719	65,0 915
Kääntö: ei Jousto: sisään	80,0 939	96,0 890	82,9 883	86,8 655	73,7 880
Kääntö: vasen Jousto: sisään	48,7 979	65,0 792	64,5 893	92,2 566	55,4 782
Kääntö: oikea Jousto: sisään	74,6 851	109 974	57,4 890	78,6 720	55,9 913
Kääntö: ei Jousto: ulos	46,7 894	57,1 872	57,8 862	71,4 643	66,2 842
Kääntö: vasen Jousto: ulos	45,7 956	46,3 802	56,4 868	55,6 578	56,2 753
Kääntö: oikea Jousto: ulos	47,1 832	50,4 934	54,8 861	73,4 707	57,6 889

Taulukkoon 4 on korostettu sinisellä pohjalla jokaisen järjestelmän se asema, joka vaatii pisimmän letkun. Tämä mitta yhdessä liittimen mitan kanssa määrää valitun letkukoonpanon pituuden. Oranssilla pohjalla taas on korostettu pienin taivutussäde, joka antaa suuntaa letkulta vaadittavalle minimitaivutussäteelle. Taulukosta nähdään, että moottorin vasemmalla puolella oleville letkuille vaaditaan eniten mittaa oikealle käännössä ja päinvastoin. Taulukossa 5 on esitetty vastaavat tiedot napamoottorin kaapeleille, joita ovat kolme korkeajännitekaapelia ja kaksi datakaapelia.

**Taulukko 5.** *Potentiaalisten kaapelireittien pituudet ja minimitaivutussäteet.*

Pyöränasema	Korkea- jännite1 (mm)	Korkea- jännite2 (mm)	Korkea- jännite3 (mm)	Data1 (mm)	Data2 (mm)
Kääntö: ei Jousto: ei	141,4 805	203,6 798	117,3 799	126,3 833	112,5 824
Kääntö: vasen Jousto: ei	107,7 717	80,1 732	69,5 719	67,6 735	52,2 751
Kääntö: oikea Jousto: ei	257 882	260 877	312 873	336 908	904 892
Kääntö: ei Jousto: sisään	237 823	287 816	184 824	209 857	335 820
Kääntö: vasen Jousto: sisään	127 732	138 723	134 715	106 751	95,0 708
Kääntö: oikea Jousto: sisään	263 893	269 888	315 885	322 922	499 898
Kääntö: ei Jousto: ulos	199 762	211 761	259 759	184 781	268 784
Kääntö: vasen Jousto: ulos	124 666	74,8 666	61,9 678	108 671	61,0 696
Kääntö: oikea Jousto: ulos	202 843	211 840	166 836	192 864	260 861

Taulukosta 5 huomataan, että oikealle kääntö maksimisisäänjoustossa vaatii pisimpiä kaapelilinjjoja. Tämä on luonnollista, sillä kyseisessä pyöränasennossa kaapeleiden liitännäkohdat napamoottorissa ovat kaikkein kauimpana apurungosta. Vasemmalle kääntö sen sijaan taittaa kaapeleita eniten, kun etäisyys apurunkoon lyhenee. Seuraavissa alaluvuissa on esitelty perustellusti letku-, kaapeli- ja liitinvalinnat järjestelmä kerrollaan aloittaen letkuista.

## 5.1 Letkukokoonpanojen suunnittelu

Konseptin napamoottori vaatii kolme hydrauliletkua (kaksi jäähdytysnesteelle ja yksi jarrulle) sekä neljä paineilmaletkua (yksi CTIS-järjestelmälle ja kolme vaihteensiirrolle), joista kolme on tosin niputettu kulkemaan yhden letkun sisällä. Kyseisten letkujen tekni-

set vaatimukset ja niiden perusteet on avattu tarkemmin seuraavissa alaluvuissa. Hydraulii- ja paineilmaletkut koostuvat tavallisesti kolmesta osasta, jotka on esitetty Kuvassa 20.



**Kuva 20.** Hydrauliietkun rakenne, muokattu lähteestä [29].

Tavanomaisen letkun kolme osaa ovat tavallisesti kuminen tai muovinen sisäletku, joka on kontaktissa virtaavan aineen kanssa, vahvikekerros sekä päällysteulkokerros. Vahvikerunkona letkuissa käytetään tavallisesti kangas-, muovi- tai metallivaijerikudosta tai -spiraalia riippuen letkulta vaaditusta sekä sisäisen että ulkoisen paineenkestosta. Päällysteen tehtävä on suojata letkua kulumista, hankautumista ja ympäristöä vastaan sekä eristää letku muun muassa tekemällä pinnasta heijastamaton. [29]

Sisäletkun materiaalin määrää letkulla kuljetettava aine, jota letkun on kestettävä kaikissa vaadituissa virtaavan aineen lämpötiloissa. Vahvikekerroksen valinta sen sijaan on kompromissi taivutussäteen ja paineenkeston välillä. Mitä enemmän vahvikekerroksia on, sitä kestävämpi, mutta myös jäykempi letku on. [29] Päällysteen ratkaisee letkun käyttötarkoitus ja -ympäristö sekä sen ominaisuusvaatimukset, kuten esimerkiksi vaaditaanko letkulta heijastamattomuutta, kuten tässä konseptissa.

Letkujen ja kaapeleiden käyttöikään vaikuttavat monet tekijät. Tärkeimpänä niistä hyvä suunnittelu, oikeat komponenttivalinnat sekä oikea asennus [30]. Hyvään suunnitteluun kuuluu luvussa viisikin käsitelty järkevä reititys, jossa letkun minimitaivutussädettä ei aliteta ja letkuun ei kohdistu mekaanista hankausta etenkin terävää pintaa vasten. Lisäksi reitillä ei tulisi olla ylimääräisiä mutkia tai taitoksia ja letkun on oltava oikean mittainen, jotta siihen ei kohdistu turhia jännityksiä. [31]

Erityisesti liian lyhyen letkun vahvikerakenteeseen ja liitoksiin kohdistuu ääripäissä ylimääräistä kuormaa. Liian pitkään letkuun taas syntyy ylimääräisiä mutkia ja jopa tiukkojakin taitoksia, kun ylimääräinen letku painuu letkulle varattuun tilaan. Samalla on riskinä, että letku taipuu liian läheltä liitintä vaikuttaen liitokseen ja heikentäen sitä. [31] Tätä riskiä voidaan pyrkiä minimoimaan letkun tuennalla. Liian pitkä letku saattaa myös aiheuttaa paineen alenemista sekä lämmön nousua ja lisäksi riski letkun pyöräntuennan rakenteiden väliin jäämiselle kasvaa [32].

Letkun liikkeitä pitäisi pyrkiä minimoimaan reitittämällä letku hyvin tuettuna, mahdollisimman suoraan ja tasaista linjaa välttäen taipumista. Usein kuitenkin, kuten esimerkiksi tässä työssä, letkun on liikuttava ja taivuttava paljonkin. Tällöin reitin suunnittelussa on erittäin tärkeää huomioida, että letkun on tarkoitus nimenomaan taipua, ei kiertyä, pyöräntuennan liikkeiden mukana. Testit ovat osoittaneet, että jo 7 asteen kierto suuressa korkeapaineletkussa vähentää letkun käyttöikää 90 prosentilla, joten kiertoa ei saa syntyä matalammakaan painetason letkuissa. Jotta taipuvasta letkurakenteesta saadaan mahdollisimman kestävä, se on reititettävä niin sanotun taivutuspuheen läpi, jolla tarkoitetaan pistettä, jonka ympäri letku taipuu. Näin saadaan aikaan paras ja tehokkain jousto letkulle. [32]

Taivutuspuheen tarkoitus on myös pitää letku muun rakenteen piirteiden suuntaisena. Käytännössä tässä tapauksessa taivutuspuheen tehtävä on linjata letku tukivarsien suuntaiseksi. Jotta letkun jousto olisi tehokkainta, on taivutuspuheen ympäri tapahtuvan taivutuksen muistutettava saranaliikettä. Ilman saranaliikettä letku saattaa taipua niin sanotulle S-mutkalle, joka lisää letkun liikkeitä ja vähentää käyttöikää. S-mutka syntyy myös, kun letkua työnnetään taivuttamisen sijaan. [32] Tässä konseptissa haasteeksi tulee letkujen liike sekä horisontaalasti käännön mukana että vertikaalisesti jouston mukaan eli saranataivutuksen pitäisi syntyä kahteen eri suuntaan, ettei pyörännapa työnnä letkuja.

Myös komponenttivalinnat ovat osa hyvää suunnittelua. Kuten jo luvussa 5 todettiin järjestelmään valittavaan letkuun vaikuttavat monet seikat, kuten käyttötarkoitus ja -kohde, vaadittu yli- ja alipaineenkesto, letkussa virtaava aine, virtausnopeus, virtaavan aineen lämpötila, ympäristön lämpötila, letkun pintaan kohdistuvat vaatimukset ja minimitaivutussäde. [33] Kaikki nämä tekijät on otettava huomioon optimaalisen ja parhaan letkun valinnassa. Jos paineenkesto ei huomioida, letku saattaa räjähtää tai alipaineen tapauksessa supistua ja nurjahtaa. Väliaineelle sopimaton sisäletkumateriaali ei kestä kauaa käytössä, vaan se vanhenee nopeasti halkeillen ja lopulta kuoriutumalla pois. [30]

Lisäksi letkujen suojaaminen tuulta, sadetta, aurinkoa ja lämpötiloja vastaan lisää letkujen käyttöikä [31].

Haluttu virtausnopeus määrittää letkun sisähalkaisijan. Liian pieni letku ja sitä kautta liian suuri virtausnopeus lämmittää väliainetta ja saattaa vahingoittaa sisäletkua etenkin taivutuksissa. Halkaisijaltaan liian suuri letku nostaa kustannuksia ja hankaloittaa reititystä. [31] Liian äärimmäiset lämpötilat haurastuttavat ja kovettavat letkua, jolloin sen jousto ja paineenkesto heikkenevät, ja letku hajoaa helpommin. Minimitaivutussäteen alittaminen saattaa litistää letkua tai kuormittaa letkun vahvikerakenteita ja saattaa johtaa letkun räjähtämiseen etenkin korkeammilla paineilla. [30]

Oikeat liittimet oikeaan paikkaan mahdollistavat kestäväen letkurakenteen. Ensisijaisesti liitin valitaan järjestelmään määritetyn letkun mukaan, mutta lisäksi liittimen on sovittava toimilaitteeseen tai muuhun komponenttiin, johon letkukokoonpano liitetään. Etenkin, koska tässä konseptissa letkut liikkuvat suhteellisen paljon, kestäviin liitinrakenteisiin on kiinnitettävä huomiota, sillä letkujen liikkeessa liittimille kohdistuva rasitus kasvaa. Liittimen on myös letkun tapaan kestävä vaadittua painetasoa ja ympäristöä, koska letkukokoonpano on niin heikko kuin sen heikoin komponentti. Jos esimerkiksi letkun paineen kesto olisi 400 bar, mutta liittimen vain 200 bar, koko letkukokoonpanon paineen kestoksi määräytyy 200 bar [29]. [30]

Liittimen ympäristön keston vaikuttaa erityisesti valitun liittimen materiaalit. Materiaalit on valittava käyttötarkoituksen sekä -ympäristön mukaan. Tämän konseptin liittimien on esimerkiksi oltava ruostumattomia, koska ne ovat roiskeherkässä paikassa ajoneuvon alustassa ja lisäksi vaatimuksen 1.11 mukaan ajoneuvon on oltava uintikykyinen, joten letkukokoonpanojen on kestävä upotusta. Muutenkin komponenttien korroosiolta suojaaminen on otettava suunnittelussa huomioon, sillä korrosio heikentää letkua sen kudoksiin päästessään ja saattaa irrottaa liittimistä ei-toivottuja epäpuhtauksia järjestelmään [30].

Kolmas letkun käyttöikäen merkittävästi vaikuttava tekijä on letkuasennelman oikea kokoonpano. Letkun ja liittimen välisen liitoksen on oltava oikeanlainen ja ammattimaisesti tehty, jotta siitä saadaan kestävä. Lisäksi asennusta tehdessä on oltava huolellinen, jotta järjestelmään ei pääse epäpuhtauksia, ja letkun sekä liittimien voitelusta on huolehdittava. [30] Seuraavissa osiossa on esitelty letkukokoonpanot komponenttivalintoineen järjestelmä kerrallaan.



### 5.1.1 Jarrujärjestelmä

Kuten aiemmissa luvuissa on todettu, vaatimuslistan mukaan napamoottoriin integroidulla jarrulla on hydraulinen toimilaite, jolle ei kuitenkaan ole määritelty tarkempia ominaisuuksia. Kyseinen hydraulinen toimilaite vaatii kuitenkin toimiakseen hydraulineistettä, joka kulkee sille letkua pitkin. Jarruletkulla on oltava suuri paineen kesto, jotta se pystyy toistuvasti välittämään korkeapaineista jarrunestettä jarrujen toimilaitteelle. Siksi jarruletkuna käytetään usein metallikudosvahvikkeista letkua, joka kestää hyvin painetta, mutta varjopuolena ei ole kovin taipuisa. [34]

AMV XP -ajoneuvo toimii konseptin pohjana, joten sen jarruletku valikoituu luonnolliseksi referenssiksi sopivaa jarruletkua valittaessa. AMV:ssa jarruletkuna käytetään Parkerin silikonipäälysteistä ruostumaton teräspunoskudoksellista 929BJ-4 hydrauliletkua, joka täyttää kaikki työhön liittyvään konseptiin kohdistuvat vaatimukset. Siksi se on helppo valinta tähän jarrujärjestelmähahmotelmaan. Letkun polytetrafluorieteeniä (PTFE) olevan sisäletkun sisähalkaisija on vain 5 mm eli pienin koko Parkerin 929-sarjasta, mikä tarkoittaa sitä, että se on vahvarakenteiseksi letkuksi kohtalaisen taipuisa. [35]

Letkun ulkohalkaisija on 16 mm ja sen järeän vahvikekerroksen paksuus on 2 mm. Vahvikekerroksen päällä uloimpana on 3,5 mm:n sileä ruskea silikonipäälyste, joka suojaa vahvikekerrosta ja tekee letkusta valoa ja lämpöä heijastamattoman. Lisäksi PTFE-siiksen ansiosta letku on myös EMC-yhteensopiva (*static dissipative*). [35]

Jarruletkulle sopiva liitin on Parkerin 91N-sarjan liitin [35]. Tarkemmin malli 1JC91N-4-4C, joka on käyttöympäristöön sopivasta ruostumattomasta teräksestä valmistettu liitin. Se on tyypiltään kuorittava puristettava liitin eli letkun päällystettä kuoritaan hieman asennettaessa letkukokoonpanoa ja liitin puristetaan siihen tarkoitettulla laitteella kiinni letkuun [30], [35]. Liittimen toinen O-Lok ORFS -mallinen pää kiinnitetään toimilaitesylinterin tuloporttiin. Letkun apurungon päähän tarvitaan läpivientiliitin, jonka kautta jarrulinja viedään apurungon sisään jarruputkille ja muulle järjestelmälle. Jarruletkun liittimeen sopiva Parkerin läpivientiliitin on mallia 4-4F42EDMLOSS eli urosliitin O-Lok ORFS -liittämällä. Molempien liittimien paineen kesto on konseptiin riittävä 630 bar ja niiden ruostumaton materiaali soveltuu järjestelmän vaatimuksiin hyvin.

Jarruletkun numeraaliset vaatimukset on listattu Taulukkoon 6 ja samalla on tarkastettu, että letku varmasti täyttää tämän hetken vaatimukset. Vaatimukset perustuvat Taulukon 4 arvoihin, luvun 3 vaatimuslistan vaatimuksiin sekä napamoottorin spesifikaatioon. Kuten alaluvussa 4.3 todetaan napamoottorin jarrulle ei ole tarkkoja ominaisuuksia saata-

villa, joten paineenkestovaatimusta letkulle ei voida määrittää. Valitun letkun paineenkesto on kuitenkin hyvällä tasolla. Liitinten pituusmitalla tarkoitetaan mittaa letkun liitospinnasta liittimen toisen puolen liitospintaan eli mittaa, joka vaikuttaa letkukokoonpanon kokonaispituuteen. Se on mitattu liittimen 3D-mallista.

**Taulukko 6. Jarruletkuvalinnan tarkistus.**

Ominaisuus	Vaatus	Valitut komponentit
Minimitaivutussäde (mm):	55,4	51
Liitinten pituus (mm):	-	2 x 15
Letkun kokonaispituus (mm):	750	750
Paineen kesto (bar):	-	207
Käyttölämpötila (°C):	-46...+49	-54...+232

Taulukon 6 perusteella valittu letku vaikuttaa sopivalta järjestelmään. Soveltuvuutta on tutkittu tarkemmin vielä luvussa 6.

### 5.1.2 Jäähdytysjärjestelmä

Napamoottorin jäähdytys tapahtuu jäähdytysnesteen kierron avulla. Toisin sanoen jäähdytyksen kierto on hydraulinen. Vaatimuksen 3.5 mukaan jäähdytysnesteenä käytetään propyleeniglykolin ja veden seosta 50-50-seossuhteella, joka on määritelty napamoottorin spesifikaatiossa moottorin kanssa käytettäväksi jäähdytysnesteeksi. Kyseinen neste on myös MIL-STD-standardin mukainen jäähdytysneste, minkä seurauksena se on hyvin yleisesti käytetty jäähdytysnestevaihtoehto. [19]

Napamoottorissa vastakkaisilla puolilla on jäähdytysnesteen sisään- ja ulosportit. Neste kiertää niiden kautta moottorin läpi sitoen ja kuljettaen samalla lämpöä sieltä pois kohti jäähdytintä ja säiliötä ajoneuvon rungon sisään. Koska tämä konsepti on rajattu pyörännavan ja apurungon välille, riittää jäähdytysjärjestelmän suunnittelun osalta letkujen, letkuliittimien ja läpivientiliittimien valinnat sekä niiden järjestelmään sopivuuden tarkistamiset. Jäähdytysjärjestelmät ovat erittäin yleinen käyttökohde letkuille, joten erityisesti

niihin soveltuvia letkuja on markkinoilla runsaasti. Tähän konseptiin sopiva jäähdytysletku valitaan Parkerin *Automotive Heater & Cooling Hose – Series 6722* -tuotesarjasta, koska AMV:ssa käytetään useita Parkerin letkuja ja sarjasta löytyy tähän konseptiin sopiva tuote. [36]

Sarjan 6722 letkut on suunniteltu käytettäväksi raskaiden ajoneuvojen jäähdytysjärjestelmissä, joten kyseinen letku sopii tähän konseptiin erinomaisesti. Tarkemmin letkuksi valikoituu Parker 6722-0625050 24x4 -letku, jonka sisähalkaisija on napamoottorin mitapiirustuksessa jäähdytysletkulle suositeltu 5/8” [21]. Silikonikuminen sisäletku sekä kankainen vahvikekerros ovat molemmat korkeita lämpötiloja hyvin kestävästä materiaalista. Samalla ne tekevät letkusta hyvin joustavan, mikä helpottaa sen reitittämistä. Letkun päällyste on sinistä silikonikumia, joka suojaa letkua hyvin hankautumista, ikääntymistä, otsonia, kemikaaleja ja muita ympäristön vaikutuksia vastaan. Lisäksi letku on sähköä johtamaton ja heijastamaton optimaalista eristystä varten. [36]

Napamoottorin sivuilla olevissa jäähdytysnesteporteissa on M22x1,5 kierteet liittimiä varten. Jotta letku saadaan suunnattua tukivarsien suuntaisesti kohti apurunkoa, liittinten täytyy olla joko 90°-liittimiä tai banjoliittimiä. Liitintyyppiä valitaan banjo sen helpon suuntausmahdollisuuden, kahdesta osasta koostuvan joustavan ja 90°-liitintä kestävämmän rakenteen sekä napamoottorin spesifikaation suosituksen vuoksi. Lisäksi banjoliittimet sopivat käytettäväksi etenkin autoteollisuudessa pienissä tiloissa, joissa letkujen suuntauksella on merkitystä. Lisäksi sekä letkuun että napamoottorin porttiin sopivia 90°-liittimiä on heikosti saatavilla [37].[21], [38]

Napamoottorin spesifikaatiossa ehdotettu jäähdytysnesteletkun liitin on Parkerin 43-sarjan banjoliitinmalli 14943-22-10C [21]. Kyseinen liitin ei kuitenkaan sovi valittuun letkuun, vaan siihen pitää valita liitin Parkerin HY-sarjasta, johon ei kuulu konseptiin parhaiten sopivia banjoliittimiä [36]. Ongelma ratkaistaan lisäämällä letkuliittimen ja jäähdytysnesteportin väliin banjoliitinadapteri, jolla saavutetaan kaikki banjoliittimen hyödyt yhdellä adapteriliittimellä. Valitaan jäähdytysnesteletkuun sopiva Parkerin HY-sarjan 106HY-10-10-naarasliitin JIC 37°-kierteellä, joka sopii 3069-10-22-banjoadapterin JIC 37° -uros-kierteeseen. Banjoliitinadapterin portissa on DIN Metric -kierre, joka on yhteensopiva napamoottorin portin kanssa. [37], [38], [39]

Letkun liitos 106HY-liittimeen on samantyyppinen jarruletkun kanssa eli letkun pintaa kuoritaan, jonka jälkeen liitin puristetaan kestävästi letkuun kiinni. Banjoliittimen toinen osa on banjopultti, jolla liitin kiinnitetään tiukasti porttiin kiinni. Tähän konseptiin valitaan 3069-10-22-adapteriin sopiva Parker AM-16 -banjopultti napamoottoriin sopivalla

M22x1.5-kierteellä. Lisäksi banjoliittimen kokoonpanoon tarvitaan kaksi kuparista tiiviste-rengasta jokaista pulttia kohden, jotta liitoksesta saadaan tiivis. [37] Apurungon pään läpivienniksi valitaan Patrian omavalmisteinen läpivientiholkki banjopulttiin sopivalla M22x1.5-kierteellä. Apurungon läpivienniksi suunniteltu holkki on valmistettu ruostumattomasta ja haponkestävästä teräksestä, joten se kestää hyvin käyttöolosuhteita. Kaikki muutkin valitut liittimet on valmistettu ruostumattomasta teräksestä, jotta ne täyttävät tämän konseptin vaatimukset.

Jäähdytysnesteletkun numeraaliset vaatimukset on listattu Taulukkoon 7 samalla tapaa kuin alaluvussa 5.1.1 jarruletkun kohdalla. Vaatimukset perustuvat Taulukon 4 arvoihin, luvun 3 vaatimuslistan vaatimuksiin sekä napamoottorin spesifikaatioon. Vaikka ulosvirtauksen jäähdytysnesteletku voisi olla hieman lyhyempi kuin sisään virtauksen, molemmat letkut määritellään samanmittaisiksi. Näin vältetään mahdollisilta väärinpäin asennusvirheiltä ja sitä kautta mahdollisilta letkurikoilta sekä säästetään hieman kustannuksissa. Liitinten pituusmitalla tarkoitetaan mitta letkun liitospinnasta banjoliittimen portin keskipisteeseen eli mitta, joka vaikuttaa letkukokoonpanon kokonaispituuteen. Kyseinen mitta on arvioitu liitinten mittapiirroksista.

**Taulukko 7. Jäähdytysnesteletkuvalinnan tarkistus.**

Ominaisuus	Vaatus	Valitut komponentit
Minimitaivutussäde (mm):	45,7	44
Liitinten pituus (mm):	-	2 x 60
Letkun kokonaispituus (mm):	1099	1100
Paineen kesto (bar):	3,5	5,7
Käyttölämpötila (°C):	-46...+49	-54...+177

Taulukon 7 perusteella valittu letku vaikuttaa sopivalta järjestelmään. Soveltuvuutta on tutkittu tarkemmin vielä luvussa 6 ja seuraavissa kappaleissa.

Tarkastetaan, että jäähdytysjärjestelmän painehäviöt pysyvät valituilla komponenteilla sallituissa rajoissa eli alle napamoottorin mittapiirroksessa määritellyn 1,1 baarin [19].

Painehäviöitä syntyy virtausvastuksista, joita on kahta eri tyyppiä. Näitä ovat kitkavastukset eli virtaavan nesteen ja letkun välinen kitka sekä kertavastukset eli letkuosien aiheuttamat painehäviöt [40]. Virtausvastukset ovat suurimmillaan, kun virtaus on suurimmillaan eli kun jäähdytyksen tarve on suurin. Jäähdytyksen kannalta pahin tilanne on, kun hukkalämpöteho on suurimmillaan ja jäähdytysnesteen lämpötila on huipussaan, jolloin myös virtausta tarvitaan eniten. Tällaisessa tilanteessa napamoottorin läpi virtaavan nesteen massavirta eli maksimimassavirta moottorin läpi saadaan laskettua kaavalla (9):

$$\dot{m} = \frac{P_{hukka}}{c_p \times (T_{out} - T_{in})} \approx 0,541 \frac{kg}{s}. \quad (9)$$

Kaavassa (9)  $P_{hukka}$  on vaatimuslistan kohdassa 3.2 määritelty napamoottorin maksimihukkalämpöteho (11,5 kW),  $c_p$  jäähdytysnesteen ominaislämpökapasiteetti ( $0,85 \cdot 10^3 \frac{J}{kg \times K}$ ) ja  $T_{out}$  ja  $T_{in}$  vaatimuksessa 3.6 määritellyt nesteen maksimilämpötilat 105 °C ja 80 °C ulos- ja sisäänvirtauksissa [41]. Jakamalla maksimimassavirta  $\dot{m}$  jäähdytysnesteen tiheydellä virtauslämpötilassa  $\rho_{j neste}$  saadaan suurin tilavuusvirta  $Q_{max}$  napamoottorin läpi. Sijoittamalla arvot maksimitilavuusvirraksi saadaan 33,1 l/min, joka vastaa hyvin moottorin spesifikaation tilavuusvirta arviota  $\leq 33$  l/min. Virtausnopeus valituissa letkuissa lasketaan kaavalla (10) ja sitä vastaava Reynoldsin luku kaavalla (11).

$$v = \frac{Q_{max}}{\pi \cdot r_{letku}^2} \approx 2,747 \frac{m}{s} \quad (10)$$

$$Re = \frac{v \times d_{letku}}{v_{90}} \approx 5,493 \times 10^4 \quad (11)$$

Edellisissä kaavoissa  $d_{letku}$  on letkun sisähalkaisija ja  $r_{letku}$  sen säde.  $v_{90}$  puolestaan on jäähdytysnesteen viskositeetti. Reynoldsin luvun avulla järjestelmälle voidaan laskea vastuskertoimia. Koska Reynoldsin luku on suurempi kuin kriittinen Reynoldsin luku  $Re_{kr}$  (2300), virtaus letkussa on turbulenttia. Kun  $2300 < Re < 10^5$  ja oletetaan, että valittu siliikoniletku on sileä, virtauksen kitkavastuskerroin  $\lambda$  voidaan laskea Blasiuksen yhtälöllä (12). [42]

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \approx 0,021. \quad (12)$$

Kun kitkavastuskerroin ja letkun mitat ovat tiedossa, kitkahäviöt lasketaan Darcy-Weisbachin yhtälöllä (13): [40]

$$\Delta p_{kitka} = \lambda \times \frac{L}{d_{letku}} \times \frac{\rho_{j neste} \times v^2}{2} \approx 0,05 \text{ bar}. \quad (13)$$

Kaavassa (13)  $L$  on letkun pituus (1050 mm) ja  $\rho_{j\text{neste}}$  jäähdytysnesteen tiheys noin 90°C lämpötilassa ( $980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ). Järjestelmässä virtausta vastustavat kitkan lisäksi molemmissa letkuissa olevat mutkat ja ulosvirtaukset molemmista letkuista. Kertavastuskertoimet edellisille ovat  $\zeta_{\text{mutka}}$  (0.4) ja  $\zeta_{\text{ulos}}$  (0.5) [43]. Näiden lisäksi virtausvastusta aiheuttaa jäähdytysletkujen banjoliittimet, jotka voidaan käytännössä käsitellä 90° liittiminä. Sellaisen kertavastuskerroin  $\zeta_{90}$  saadaan W.B. Hooperin kahden kertavastuskertoimen metodin mukaisesti kaavasta (14):

$$\zeta_{90} = \frac{\zeta_1}{Re} + \zeta_{\infty} \times \left(1 + \frac{1}{D}\right) = 0,661, \quad (14)$$

Kaavassa (14)  $\zeta_{\infty}$  ja  $\zeta_1$  ovat 90° liittimille estimoidut kertoimet 0,25 ja 800 ja  $D$  letkun sisähalkaisija tuumissa mitattuna. Metodi on kohtalaisen tarkka, kun Reynoldsin luku on alle 100 000 eli tässä tapauksessa sillä saavutetaan luotettavia tuloksia. [44] Kertavastushäviöt lasketaan kertoimien avulla kaavalla 15:

$$\Delta p_{\text{kertavastushäviö}} = \zeta \times \frac{\rho_{j\text{neste}} \times v^2}{2}, \quad (15)$$

Kaavassa (15)  $\zeta$  on laskettavan kohteen kertavastuskerroin. Painehäviötä syntyy myös itse napamoottorissa. Koska tarkkaa tietoa jäähdytysnesteen virtauksesta moottorin sisällä ei ole saatavilla, moottorissa syntyvää painehäviötä joudutaan arvioimaan. Arvioidaan, että napamoottorin aiheuttama painehäviö on samaa luokkaa polttomoottorin nestejäähdyttimestä ja hydraulioöljyn jäähdyttimestä aiheutuvan painehäviön kanssa eli suunnilleen 30-50 kPa [45], [46]. Kaavassa (16) summataan kaikki kaavoilla (13) ja (15) lasketut vastusten aiheuttamat häviöt, jolloin saadaan kokonaispainehäviö jäähdytysjärjestelmässä:

$$\Delta p_{\text{kokonaiishäviö}} = 2 \times \Delta p_{\text{kitka}} + 2 \times \Delta p_{\text{mutka}} + 2 \times \Delta p_{\text{ulos}} + 2 \times \Delta p_{\text{liitin}} + \Delta p_{\text{moottori}} \approx 0,716 \text{ bar}, \quad (16)$$

Kaavassa (16) ensimmäiset häviötermit on kerrottu kahdella, koska letkuja on kaksi, ja moottorin aiheuttamaksi painehäviöksi on arvioitu yläkanttiin 50 kPa. Näin kokonaispainehäviöksi saadaan 0,716 bar eli selvästi vähemmän kuin napamoottorin spesifikaatiossa määritelty maksimipainehäviö 1,1 bar [19]. Toisin sanoen jäähdytyksen komponenttivalinnat ovat ainakin järjestelmän suorituskyvyn kannalta onnistuneita.

### 5.1.3 Pneumatiikan letkut

Napamoottorilla on kaksi eri pneumaattista eli paineilmalla toimivaa järjestelmää. Nämä ovat renkaantäyttöjärjestelmä sekä vaihteensiirto. Pneumatiikan letkuja valittaessa on huomioitava, että ilma on yksi huonoimmista väliaineista letkun kannalta. Ilma kuivattaa ja haurastuttaa sopimattoman letkumateriaalin pehmeitä osia. Siksi materiaalivalintoihin on kiinnitettävä erityistä huomiota ja ilmajärjestelmään on hyvä lisätä öljyistin, joka voitelee ja kostuttaa paineilmaletkuja. [31]

Ensimmäisenä näistä kahdesta järjestelmästä käsitellään renkaantäyttö- eli CTIS-järjestelmä, jonka liitospaikka sijaitsee keskellä napamoottorin liitospintaa. Tämän työn rajaukseen kuuluu CTIS-järjestelmän suunnittelu rungon ja pyörännavan väliseltä osalta eli käytännössä järjestelmän letkun ja liitinten valinta. Koska AMV XP:hen on myös saatavilla optiona vastaava CTIS-järjestelmä ja AMV:n sekä tämän konseptin rengaskoko ja painoluokka ovat samat, tämän konseptin renkaantäyttöjärjestelmä voi perustua AMV:n CTIS-järjestelmään. Näin ollen vaaditut järjestelmän painetaso ja letkun sisähalkaisija voidaan määrittää AMV:n CTIS-järjestelmän painetason ja letkun sisähalkaisijan mukaan.

Vaatimusten perusteella renkaantäytön letkuksi valitaan Parkerin mataliin lämpötiloihin tarkoitettu hydrauliletku 538DM-6 DuraMax, joka soveltuu käytettäväksi myös pneumaattikasovelluksissa. Sekä letkun sisä- että ulkopinta ovat copolyesteria ja vahvikerunko on kuitua. Rakenne tekee letkusta hyvin joustavan ja kylmää kestävä. Lisäksi letkun mattapäällinen on heijastamaton ja liukas, mikä vähentää letkun ulkopinnan mekaanista kuormitusta ja sitä kautta myös kulumaa. Letku ei myöskään johda sähkövirtaa eli se täyttää EMC-vaatimukset. Valitun letkun sisähalkaisija on 10 mm ja maksimityöpaine 207 bar, joten CTIS-järjestelmän painetasot eivät tuota letkulle ongelmia [47]. [48]

Liittimeksi CTIS-järjestelmälle valitaan banjoliitin osittain samoista syistä kuin jäähdytinnesteletkullekin. Lisäksi banjoliittimen avulla letku saadaan suunnattua kulkemaan napamoottorin pinnan suuntaisesti suojassa kohti ylätukivartta. 538DM-6 letkulle sopiva liitin pitää valita Parkerin 56-perheestä, josta löytyy letkuun sopiva banjoliitin. Valitaan 14956-16-6C Banjo Union banjoliitin CTIS-järjestelmän letkun liittimeksi, koska se sopii letkulle ja sen portissa on napamoottorin CTIS-porttiin sopiva M16-kierre. Portteihin sopii Parker AM-10 -banjoruuvi ja lisäksi liitos vaatii kaksi kappaletta kuparisia tiivisterenkaita, jotta liitin on pitävä. [48]

Koska AMV:n CTIS-järjestelmän letkuliittimissä käytetään samaa AM-10-banjoruuvia ja järjestelmissä käytetään muutenkin samoja komponentteja, läpivienti apurungon läpi voi

myös olla samanlainen. Läpivienti toteutetaan messinkisellä M16x1.5-kierteisellä Raufoss 623 7726 läpivientiholkilla, jonka paineenkesto on CTIS:lle riittävä 12,5 bar.

CTIS-letkun numeraaliset vaatimukset on listattu Taulukkoon 8 samalla tapaa kuin aiempienkin letkujen kohdalla alaluvuissa 5.1.1 ja 5.1.2. Vaatimukset perustuvat Taulukon 4 arvoihin, luvun 3 vaatimuslistan vaatimuksiin sekä napamoottorin spesifikaatioon. Liittinten pituusmitalla tarkoitetaan liittimen B-mittaa eli mittaa letkun liitospinnasta liittimen toisen puolen liitospintaan eli mittaa, joka vaikuttaa letkukokoonpanon kokonaispituuteen [48].

**Taulukko 8.** CTIS-letkuvalinnan tarkistus.

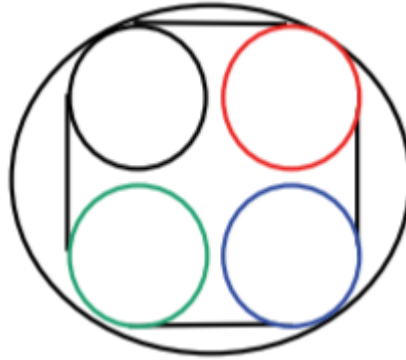
Ominaisuus	Vaatus	Valitut komponentit
Minimitaivutussäde (mm):	54,8	51
Liittinten pituus (mm):	-	2 x 33
Letkun kokonaispituus (mm):	959	960
Paineen kesto (bar):	10	12,5
Käyttölämpötila (°C):	-46...+49	-57...+100

Kuten taulukosta 8 nähdään, valittu CTIS-letku soveltuu käyttötarkoitukseensa hyvin. Konseptin toinen pneumaattinen järjestelmä on napamoottorin vaihteensiirto. Vaihteensiirto tapahtuu moottorin sisällä olevilla pneumaattisilla toimilaitteilla, joita ohjataan rungon sisällä olevilla pneumaattisilla patruunaventtiileillä. Paineilma venttiileiltä toimilaitteille eli rungon sisältä napamoottorille kulkee kolmea paineilmaletkua pitkin. [21] Koko vaihteensiirtojärjestelmästä ainoastaan letku- ja liittinrakenteen suunnittelu kuuluu tämän työn rajaukseen.

Vaihteensiirtoimilaitteelle menevien paineilmaletkujen tulee olla ulkohalkaisijaltaan 6 mm ja ne kaikki kolme täytyy niputtaa kulkemaan yhden letkun sisällä. Letku lähtee apurungon läpivienniltä ja kulkee toisen läpiviennin kautta vaihteensiirron liittinten kannen läpi. Kansi näkyy Kuvassa 14, jossa läpivienti on kannen yläreunassa. Kannen alla sisäletkut kuoritaan yhteisen letkun alta ja niistä jokainen liitetään omalla banjoliittimellä toimilaitteiden portteihin. [21]



Napamoottorin spesifikaation vaihteensiirtojärjestelmän kuvaus ohjaa letkuvalinnan Parker Legris -tuoteperheeseen ja tarkemmin 1010P06 00M04 – puolijäykkään nailon multitube -letkuun. Letku koostuu neljästä eri värisestä 6x1 polyvinylikloridi -paineilmaletkusta (PVC), jotka ovat yhden mustan nailonsuojaletkun sisällä. [49] Letkun rakenne on esitetty Kuvassa 21.



**Kuva 21.** Multitube-letkun poikkileikkaus [49].

Koska vaihteensiirtojärjestelmä vaatii vain kolme letkua, yksi 1010P06 00M04 -letkun neljästä sisäletkusta jää vapaaksi ja sitä voidaan hyödyntää mahdollisesti muihin ilman kuljetus tehtäviin. Neljättä letkua voidaan hyödyntää esimerkiksi napamoottorin huohotuksessa. Letkun paineenkesto on 24 bar, käyttölämpötila-alue  $-40\text{ °C} - +80\text{ °C}$  ja minimaivutussäde 55 mm. Läpivienti liitinten kannen läpi määritellään konseptin yhtenäisyyden vuoksi saman malliseksi, mutta yhtä kokoa isommaksi kuin alaluvussa 5.2 käsiteltävien korkeajännitekaapeleiden läpivienti. Läpivientiholkiksi valikoituu AGRO 1060.25.190 -läpivientiholkki, joka on yleisesti käytössä sähkökaapeleiden läpivientiholkina, mutta sopii samaan tarkoitukseen myös paineilmaletkun kohdalla. Holkin materiaali on nikkelpäällystetty messinki. [50]

Sisäletkut liitetään napamoottorin sisälle kolmella banjoliittimellä. Letkuille sopivat liittimet löytyvät Legriksen liitinmallistosta. Sieltä liittimeksi valitaan 3618-04-19-banjoliitin, jonka pultin M5x0,8-kierre sopii napamoottorin paineilmatoimilaitteiden porttiin. Liitin on nikkelpäällystettyä messinkiä ja liitoksen tiiveyden varmistaa fluoroelastomeeri-tiiviste-rengas (FKM). Banjoliittimen käyttölämpötila-alue on  $-25\text{ °C} - +150\text{ °C}$  ja paineenkesto 30 bar. [51] Toisin sanottua liitin ei aivan täytä konseptin käyttölämpötilavaatimusta, mutta toisaalta se on suojakannen alla suojassa kylmyydeltä ja muilta sääolosuhteilta. Lisäksi napamoottorin ollessa käynnissä sen tuottama lämpö lämmittää myös sen yhteydessä olevia liittimiä, joten liitin voidaan valita tähän konseptiin.

Multitube-letkujen kanssa käytetään multi-connector-läpivientejä. Tarkemmin tässä konseptissa käytetään 6x1-kokoisille letkuille tarkoitettua polymeerirunkoista Legris 3320 06 00 04 -multi-connector-läpivientiä, johon jokainen letku liitetään erikseen liitinsuojahatun alla. Liitoksessa käytetään nitrilikumista-O-rengastiivistettä (NBR). Läpivientiliitin on vaihteensiirtoletkurakenteen heikko kohta, sillä sen paineenkestokyky on vain 20 bar ja käyttölämpötila-alue vain -20 °C - +80 °C. [52] Läpivientiliitin on kuitenkin apurungon päässä, joten siihen kohdistuu kohtalaisen vähän rasitusta ja se on osittain apurungon sisällä suojassa. Lisäksi vaihteensiirtojärjestelmä ei ole painetasoltaan kovin liittämiä kuormittava.

Vaihdeletkun numeraaliset vaatimukset on listattu Taulukkoon 9 samalla tapaa kuin aiemmat letkut alaluvuissa 5.1.1 ja 5.1.2. Vaatimukset perustuvat Taulukon 4 arvoihin, luvun 3 vaatimuslistan vaatimuksiin sekä napamoottorin spesifikaatioon. Liitinten pituusmitalla tarkoitetaan tässä tapauksessa liitinsuojahatun pituutta eli mitta, joka vaikuttaa letkukokoonpanon kokonaispituuteen. Letkun pituus on laskettu moottorin läpivientiholkilta apurungon läpivientiliittimelle. Läpivientiholkin pituudella ei lasketa olevan merkitystä letkun pituuteen.

**Taulukko 9. Vaihteensiirtoletkuvalinnan tarkistus.**

Ominaisuus	Vaatus	Valitut komponentit
Minimitaivutussäde (mm):	55,4	55
Liitinten pituus (mm):	-	33
Letkun kokonaispituus (mm):	948	950
Paineen kesto (bar):	6	20
Käyttölämpötila (°C):	-46...+49	-20...+80

Taulukosta 9 huomataan, että vaihteiston letku täyttää alustavasti asetut vaatimukset käyttölämpötilaa lukuun ottamatta. Samalla taulukosta näkyy, kuinka letkuasennelman heikoin lenkki määrittää koko letkun keston, sillä valittu letku kestäisi kovempaa painetta ja pakkasta, mutta herkkä läpivientiliitin määrittää näiden rajat.

## 5.2 Napamoottorin kaapeleiden suunnittelu

Napamoottori vaatii toimiakseen letkujen lisäksi myös sähkökaapeleita. Yhteensä niitä on viisi per pyörännapa (kolme korkeajännite- ja kaksi datakaapelia). Tässä osiossa käsitellään näiden suunnittelu. Yleisesti kaapeleiden suunnittelua koskevat monet samat periaatteet kuin letkujenkin suunnittelua. Myös kaapeleiden osalta on noudatettava minimitaivutussädettä, käyttölämpötilarajoja ja tiettyjä materiaalivaatimuksia, mutta muitakin tärkeitä tekijöitä tulee huomioida kaapeleita valittaessa. Kaapelit eroavat edellisen kappaleen letkuista siten, että paineenkeston sijaan huomioon pitää ottaa maksimivirrankesto. Lisäksi suojauksessa on eroa, sillä hydrauliletkut suojataan öljyvuoja vastaan ja kaapeleiden kohdalla kyse on sähköturvallisuudesta. [53]

### 5.2.1 Korkeajännitekaapelit

QinetiQ HDU-100 on kolmivaiheinen sähkömoottori, joka vaatii toimiakseen yhden korkeajännitekaapelin jokaista vaihetta kohden eli yhteensä kolme kaapelia. Kaapeleiden liittimet ovat napamoottorin sisällä, eikä niiden tarkempaa spesifikaatiota ole saatavilla, joten napamoottoriin absoluuttisen varmasti sopivia korkeajännitekaapeleita ei voida valita. Tämän työn laajuuteen kuitenkin riittää, että fyysisiltä mitoiltaan ja reititysominaisuuksiltaan realistiset kaapelit ja niille sopivat läpiviennit saadaan valittua, jotta kaapeloinnin reititys voidaan suunnitella. [19]

Yhteistyössä Patrian sähkösuunnittelijoiden kanssa tehdyn arvion mukaan napamoottorille sopivaksi kaapeliksi valitaan sähköajoneuvokaapeli, jonka jännitelujuus on 1000 V. Napamoottorin spesifikaation mukaan sen vastasähkömotorinen voima on 800 V, joten jännitelujuusvaatimus on perusteltu. Lisäksi moottorin jatkuvavaihevirta on maksimissaan 300 A. [19] Näiden vaatimusten perusteella arvioidaan, että suojattu EXTRAD XLE 150 HVX2/0X 1000V -kaapeli on napamoottorille sopiva korkeajännitekaapeli. Kaapelin ulkohalkaisija on 15,5 mm, se on häiriösuojattu ja sen suojakuori on oranssi, kuten vaatimuksen 1.20 EU-direktiivi edellyttää. [53]

Kaapelit tuodaan apurungossa olevan kumitiivisteellä tiivistetyn reiän läpi pyöräntuennalle. Kaapelit linjataan kulkemaan alatukivarren suuntaisesti napamoottorille, jonka sisään jokainen kolmesta kaapelista kulkee AGRO 1060.25.160 sähkökaapeleille tarkoitettun läpivientiholkin läpi. Kuten alaluvussa 5.1.3 todettiin, läpivientiholkki on nikkelipäällystettyä messinkiä.

Taulukkoon 10 on listattu korkeajännitekaapeleiden valintaan vaikuttavat vaatimukset ja verrattu niitä valitun kaapelin ominaisuuksiin. Vaatimukset perustuvat Taulukon 5 mittoihin, napamoottorin spesifikaatioon sekä luvun 3 vaatimuslistaan. Koska kaapelin pituus mitataan läpivienniltä läpiviennille, läpivientiliitinten pituudella ei ole tässä merkitystä. Molemmat kaapelit ovat samanmittaisia, jotta kustannuksissa säästetään ja asennusvirheiltä vältyttäisiin.

**Taulukko 10.** Korkeajännitekaapeleiden valinnan tarkistus.

Ominaisuus	Vaatus	Valitut komponentit
Minimitaivutussäde (mm):	61,9	58
Liitinten pituus (mm):	-	-
Kaapelin pituus (mm):	893	900
Maksimivirta (A)	300	390
Käyttölämpötila (°C):	-46...+49	-55...+150

Kuten Taulukosta 10 voidaan todeta, kaapeli täyttää hyvin sille asetetut vaatimukset. Kaapeleiden reititystä käsitellään tarkemmin luvussa 6.

### 5.2.2 Datakaapelit

Moottorin resolverin ja lämpöantureiden tuottama data pitää myös siirtää napamoottorilta ajoneuvon rungon sisälle moottorinohjausyksikölle. Tähän käytetään kahta datakaapelia, joista toisessa on 15 ja toisessa yhdeksän johdinta. 15- ja 9-pinniset Micro-D-pistokkeet datakaapeleille sijaitsevat korkeajännitekaapeleiden tapaan napamoottorin sisällä. [21] Datakaapelit suunnitellaan samanlailla kuin kaapelit alaluvussa 5.2.1. eli läpivienniltä läpiviennille.

Sopiviksi datakaapeleiden liittimiksi valitaan Glenairin MWDM2L-15SSB ja Glenair MWDM2L-9SSB -pistokkeet, jotka on suunniteltu puolustusteollisuuden käyttöön [54]. Pistokeihin sopivalla pistotulpalla varustetut johtoniput ovat Glenairin MWDL-15P-6E5-48B ja MWDL-9P-6E5-48B [55]. Johtojen minimitaivutussädettä ei mainita niiden mittatiedoissa, mutta muun Glenair malliston perusteella johtojen minimitaivutussäde on alle

32 mm [56]. Kun johtoniput asennetaan suojaletkujen sisään, saadaan aikaan datakaapelit, joiden reititystä tässä työssä suunnitellaan. Valitaan ulkoletkuksi Murrflex GF10 -punottu letku, joka on suunniteltu kaapelin suojaletkuksi [57]. Kaapelit tuodaan korkeajännitekaapeleiden tapaan apurungossa olevan kumitiivisteellä tiivistetyn reiän läpi pyöräntuennalle. Kaapelit reititetään alatukivarren suuntaisesti napamoottorille, jonka sisään molemmat kaapelit kulkevat AGRO 1060.25.160 sähkökaapeleille tarkoitettujen läpivienniholkkien läpi.

Datakaapelin valintaan vaikuttavat vaatimukset on listattu Taulukkoon 11, jossa niitä verrataan valitun kaapelin ominaisuuksiin. Vaatimukset perustuvat Taulukon 5 mittoihin, napamoottorin spesifikaatioon sekä luvun 3 vaatimuslistaan. Koska kaapelin pituus mitataan läpivienniltä läpiviennille, liitinten pituudella ei ole tässä merkitystä. Taulukossa 11 kaapelin pituus kohdassa tarkoitetaan juuri tätä mittaa. Valittujen datakaapeleiden kokonaispituudet ovat 48 ”.

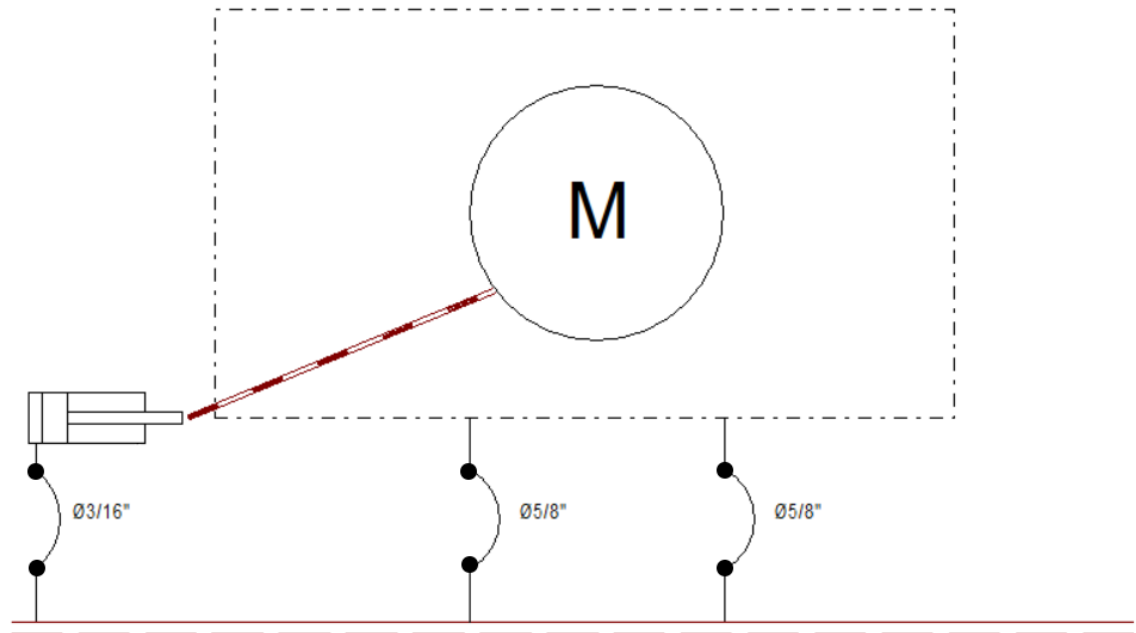
**Taulukko 11.** Datakaapeleiden valinnan tarkistus.

Ominaisuus	Vaatus	Valitut komponentit
Minimitaivutussäde (mm):	52,2	32
Liitinten pituus (mm):	-	-
Kaapelin pituus (mm):	922	925
Käyttölämpötila (°C):	-46...+49	-55...+150

Taulukosta 11 nähdään, että valitut datakaapelit täyttävät niiden vaatimukset hyvin. Myös datakaapeleiden reititystä käsitellään tarkemmin luvussa 6.

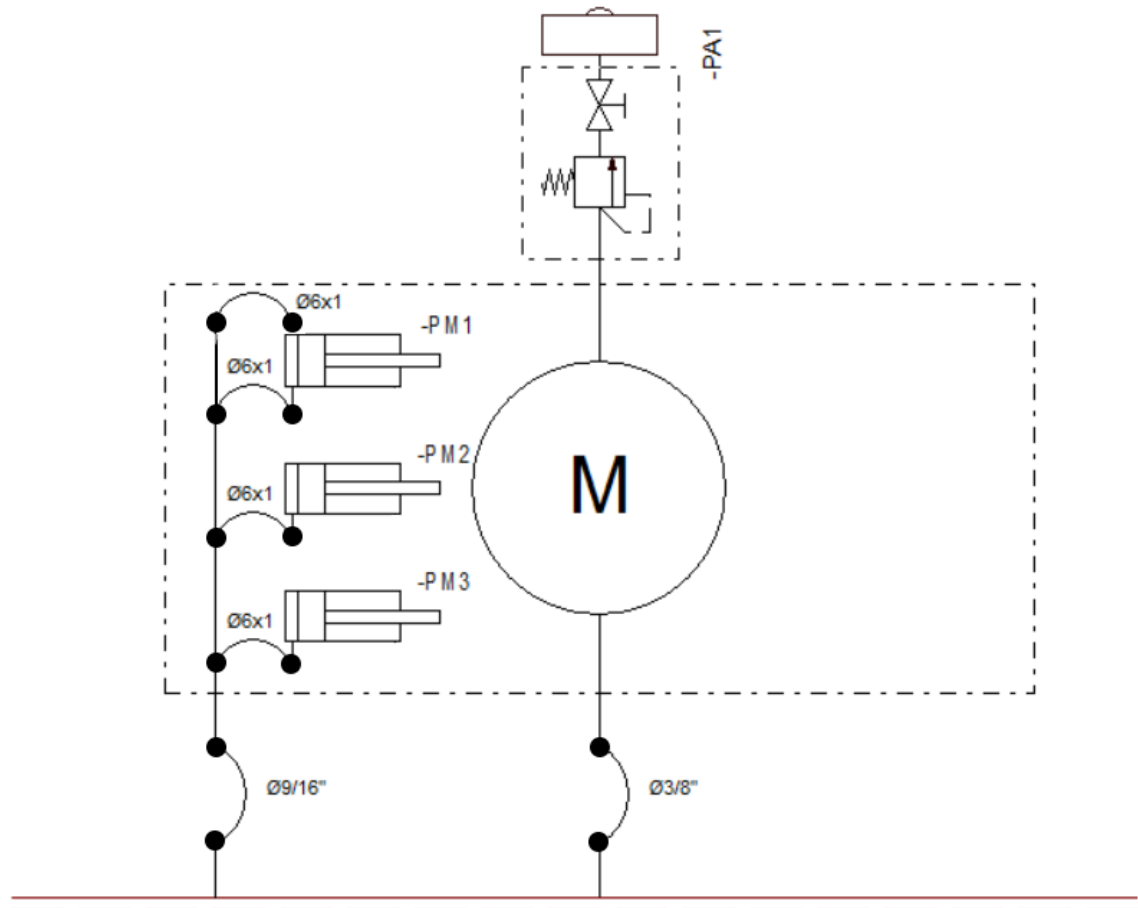
### 5.3 Piirikaaviot

Vaatimuksessa 1.26 vaaditut järjestelmän hydraulii- ja paineilmakaaviot on esitetty tässä alaluvussa. Kuvassa 22 on hydraulikaavio ja Kuvassa 23 puolestaan paineilma- eli pneumaattikaavio. Molemmat kaaviot on rajattu apurungon ja pyörännavan välille esittämään tämä konsepti.



**Kuva 22.** Napamoottorin integroinnin hydraulikaavio.

Hydraulikaaviossa keskellä näkyy sähköinen napamoottori koteloineen. Ruskea poikkiviiva taas kuvaa ajoneuvon apurunkoa. Keskellä alhaalla on jäähdytysnesteen sisään- ja ulosvirtauksen letkut ja vasemmassa reunassa jarruletku. Jarruletku kulkee konseptissa hahmotellulle jarrun toimilaitesylinterille. Sylinteri käyttää jarrun toimilaitteen vipua, joka on piirretty kaavioon paksulla ruskealla viivalla. Paineilmakaavio on esitetty Kuvassa 23.



**Kuva 23.** Napamoottorin integroinnin paineilmakaavio.

Apurunko sekä napamoottori on kuvattu samanlailla paineilmakaaviossa kuin Kuvan 22 hydraulikaaviossa. Kaaviossa keskellä alhaalla on CTIS-letku, joka kulkee napamoottorin kautta kuvassa keskellä ylhäällä näkyvälle pyörännavalla olevalle renkaantäyttöventtiilille asti. Kaavion vasemmalla puolella on vaihteensiirron multitube-letku, joka jakautuu napamoottorin kotelon sisällä kolmeen pienempään vaihteensiirron toimilaitteille menevään letkuun ja lisäksi neljänteen vapaaksi jäävään letkuun. Toimilaitteet on kuvattu kaaviossa paineilmasyylintereinä.

## 6. TULOSTEN ARVIOINTI

Tässä luvussa arvioidaan työssä saavutetut tulokset ja tavoitteiden täyttyminen. Napamoottorin muokkauksen onnistuminen ja jousen suunnittelun tarkistus käsitellään tässä luvussa ja alaluvuissa arvioidaan johdinrakennetta, vaatimusten täyttymistä sekä esitetään karkea kustannusarvio napamoottorin integroinnille. Kustannusarvio toimii samalla johdinrakenteen sisällysluettelona.

Alaluvussa 4.1 käsitelty napamoottorin valinta ja muokkaus vaikuttaa onnistuneelta. Moottori sopii konseptin pyöräntuentaan ja lisäksi kaikki sen vaatimat toiminnot voidaan integroida pyöräntuentaan. Muokkauksen varjopuolena napamoottori ei ole enää symmetrinen eli vaatimus tämän konseptin monistamisesta sellaisenaan jokaiselle pyöräntuennalle ei toteudu, vaan ajoneuvon oikealle puolelle moottorista joudutaan muokkaamaan peilikuva. Jatkokehittämällä napamoottoria tai ajoneuvon pyöräntuuntaa, moottorin symmetria saadaan kuitenkin palautettua. Jatkokehitysehdotukset on esitetty tarkemmin luvussa 7.

Arvioidaan hydropneumaattisen jousen suunnittelua tarkastelemalla sen mitoitusta tarkemmin. Kaavalla (2) laskemalla hydropneumaattisen jousen tuottamaksi maksimivoimaksi  $F_{max}$  400 barin maksimipaineella saadaan 960 kN. Kaavalla (4) laskettu staattista pyörän kuormaa vastaava voima on 144 kN, joten maksimipaineella jousi tuottaa lähes seitsemän kertaa staattisen kuorman. Kyseinen seitsenkertainen kuorma on määritelty Patrian sisäisessä standardissa voimaksi, joka saa aiheuttaa jouseen pysyvää deformaatiota, mutta ei saa johtaa jousen rakenteen totaaliseen pettämiseen. Se, että mitoituksen puolesta, jousi kestää tällaisen voiman on vaikuttavaa.

Ratkaisemalla kaavasta (4) momentti ja sijoittamalla siihen jousen tuottama maksimivoima sekä jousen momenttivarsi sisäänjoustossa saadaan laskettua jousen maksimivoimalla tuottama momentti:

$$M_{max} = F_{max} \times S_{sj} \approx 1,89 \times 10^5 Nm. \quad (17)$$

Kaavassa (17)  $S_{sj}$  on jousen momenttivarsi sisäänjoustossa eli 0,197 m 3D-mallista mitattuna. Jousen maksimivoimaa vastaava pyöränkuorma eli suurin pyöräntuennan kestävä pyöränkuorma  $m_{max}$  saadaan laskettua ratkaisemalla kaavasta (3) massa ja sijoittamalla momentin paikalle  $M_{max}$ :



$$m_{max} = \frac{M_{max}}{X \times g} \approx 30630 \text{ kg.} \quad (18)$$

Kaavalla (18) laskettu tulos, yli 30 t, tarkoittaa, että yhden pyöräntuennan jousi pystyy mitoituksensa puolesta kannattelemaan likimain koko ajoneuvon massaa. Lisäksi jousi mahtuu liikkumaan pyöräntuennassa ilman, että se ottaa kiinni muuhun rakenteeseen. Näin ollen jousen mitoitus voidaan pitää onnistuneena. Toisaalta jousen suunnitteluun liittyy myös haasteita, joita ei näissä laskelmissa ole huomioitu. Kitkaa esimerkiksi ei ole huomioitu laskuissa lainkaan, mutta sen vaikutuksen arvioidaan olevan kohtalaisen pieni. Viimeistään jatkokehitysvaiheessa kitkojen vaikutukset on kuitenkin hyvä huomioida.

Lisäksi jousen suhteellisen lyhyt isku saattaa aiheuttaa ongelmia. Jousielementin lyhyen iskunpituuden vuoksi jousen kaasutilavuudet ovat suhteellisen pieniä verrattuna vastaaviin hydropneumaattisiin jousiin. Kaasutilavuudet ovat samaa luokkaa AMV:ssä käytössä olevan jousen kanssa, mutta AMV:n jousen halkaisija on vain noin puolet työssä suunnitellun jousen halkaisijasta. Lyhyen iskun ja suuren männän halkaisijan takia jousen kaasutilavuus muuttuu todella nopeasti, jolloin myös kaasun paineen muutokset ovat nopeita. Tämä aiheuttaa haasteita hydropneumaattisen jousen tiivistykselle ja lineaariselle toiminnalle.

## 6.1 Reitityksen onnistuminen

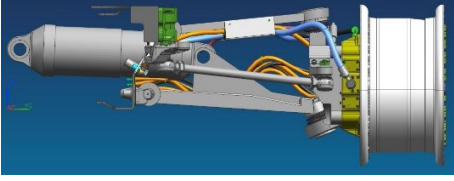
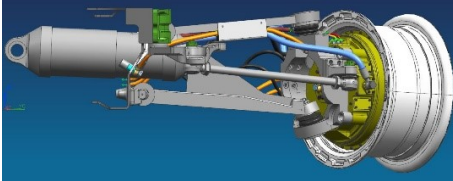
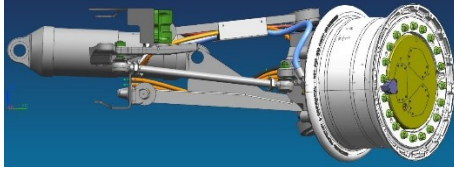
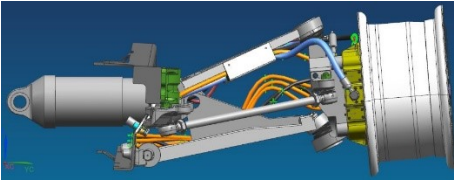
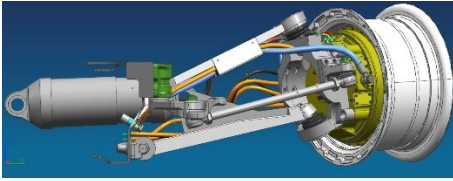
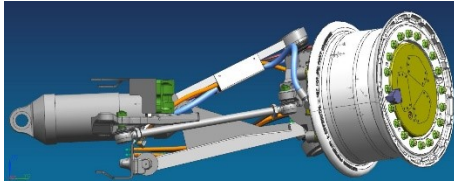
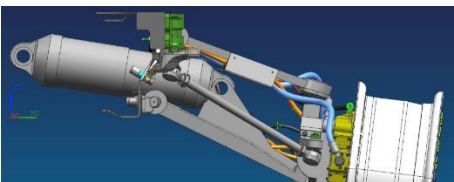
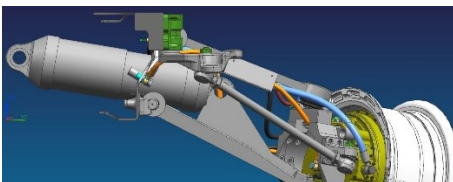
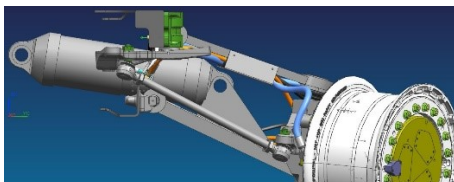
Johdinten reitityksen onnistuminen sekä johdinten käyttöiän optimoimiseen liittyvät tekijät käsitellään tässä alaluvussa. Kaikki yhdeksän pyöränasemaa tutkitaan ja johdinten käyttäytymistä niissä käsitellään. Pyöräasemat kuvattuna edestä, ylhäältä ja takaa on esitetty taulukoissa 12–14. Taulukoiduissa kuvissa pyöräntuennasta on poistettu rengas, jotta johdinreitit näkyvät paremmin ja kuvat ovat havainnollistavammat. Etupuolelta otetuista kuvista hahmottuvat paremmin suurin osa letkulinjoista, kun taas takaapäin näkyvät paremmin kaapeleiden reitit. Ylhäältä kuvattuna johtojen horisontaalinen taipuminen erottuu selvästi. Lisäksi selvitetään, kuinka johtimia pitää tukea, jotta rakenteesta saadaan kestävä.

Jotta letkurakenteen kestävyyttä voidaan arvioida, pyöräntuennan liikkeitä yhden huoltovälin eli neljän vuoden aikana on pystyttävä arvioimaan. Arvioidaan, että jousituksen eli pyöräntuennan syklejä syntyy rajussa eli tämän konseptin mukaisessa käytössä joka toinen sekunti eli 2 s/sykli [58]. Keskimääräisestä käyttöprofiilista laskettuna ajoneuvon keskinopeus elinkaarensa aikana on 44,4 km/h. Syklitaajuuden ja keskinopeuden avulla

voidaan laskea, että kilometrin aikana syklejä syntyy noin 40,5. Keskimääräisen käyttöprofiilin mukaisten vuotuisten ajokilometrien aikana tämä tarkoittaa noin 632 000 sykliä ja vaatimuksen mukaisen neljän vuoden huoltovälin aikana noin 2 528 000 sykliä. [3] Toisin sanoen keskimäärin johdinten, jotka taipuvat ainakin jonkin verran aina pyöräntuennan liikkeessä joka toinen sekunti, on elinkaarensa aikana kestävä yli 2 500 000 liikettä ja taitosta.

Suurella arvioidulla liikemäärällä liikkeestä aiheutuvaa johdinten hankautumista ja kulumaa, on pyrittävä minimoimaan muun muassa johdinten tuennalla. Tuennan tarpeesta huolimatta johtimilta vaaditaan silti taipumista pyöräntuennan liikkeiden mukana. Vaatimus 2 500 000 taitoksesta johtimen käyttöiän aikana ei ole realistinen, vaan ajoneuvon huoltovälivaatimusta on alennettava. Standardiletkun käyttöikä on 200 000 sykliä ja parhaimmillakin letkuilla vain 1 000 000 sykliä. [59] Tämän konseptin johtimet ovat taipuisaa ja hyvin suojattua materiaalia, joten huoltovälitavoite voisi olla sama napamoottorin kanssa eli yksi vuosi. Tällöin johtimien tulisi kestää noin 625 000 taitosta ennen kuin ne vaihdetaan uusiin huollossa. Kuitenkin, jotta edes vuoden huoltovälitavoitteeseen päästään, johtimet ja niiden reititys tulee olla hyvin suunniteltu. Taulukossa 12 on kuvattu kaikki yhdeksän tutkittavaa pyöränasemaa edestä.

**Taulukko 12.** Kaikki yhdeksän pyöränasemaa edestä kuvattuna.

		
Kääntö: <b>ei</b> ; Jousto: <b>ei</b>	Kääntö: <b>vasen</b> ; Jousto: <b>ei</b>	Kääntö: <b>oikea</b> ; Jousto: <b>ei</b>
		
Kääntö: <b>ei</b> ; Jousto: <b>sisään</b>	Kääntö: <b>vasen</b> ; Jousto: <b>sisään</b>	Kääntö: <b>oikea</b> ; Jousto: <b>sisään</b>
		
Kääntö: <b>ei</b> ; Jousto: <b>ulos</b>	Kääntö: <b>vasen</b> ; Jousto: <b>ulos</b>	Kääntö: <b>oikea</b> ; Jousto: <b>ulos</b>

Taulukon 12 kuvista näkyy hyvin etenkin vaaleansinisen jäähdytysnesteen sisäänmenoletkun sekä lähes samaa reittiä kulkevan oranssin CTIS-letkun reititys sekä taivunnat pyöräntuennan liikkeiden mukana. Samoin kuvista ilmenee hyvin hydropneumaattisen jousen toiminta eri pyöränasemissa. Jäähdytysnesteletku on reititetty siten, että reitti kulkee yläkautta ylätukivarteen kiinnitetyn letkuja suojaavan tukilevyn kautta apurungon läpiviennille. Näin reitti saadaan mahdollisimman sujuvaksi, eikä letku ole ensimmäisenä ottamassa iskuja vastaan, vaan sitä suojaavat tukivarret, ohjausvarsi, suojalevy sekä raidetanko.

Taulukosta 12 huomataan, että letkun linja on kaikkein suorin vasemmalle käännettäessä, kun siltä vaaditaan eniten pituutta. Suoraan ajettaessa ja käännyttäessä oikealle letku joutuu taipumaan. Joustolla ei näytä olevan suurta merkitystä letkun taipumiseen.

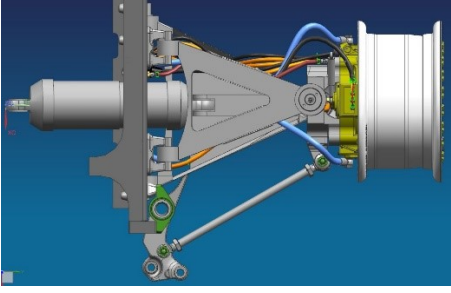
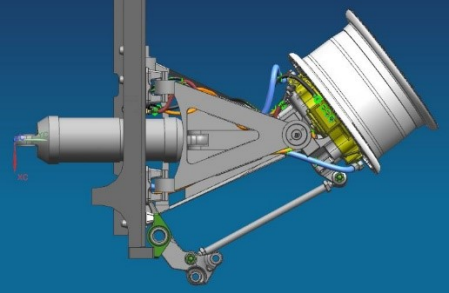
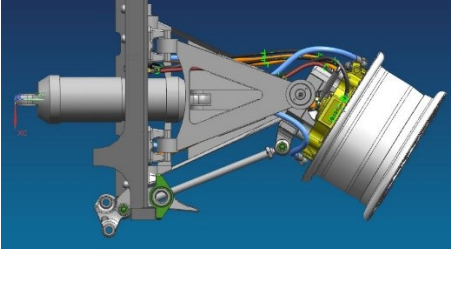
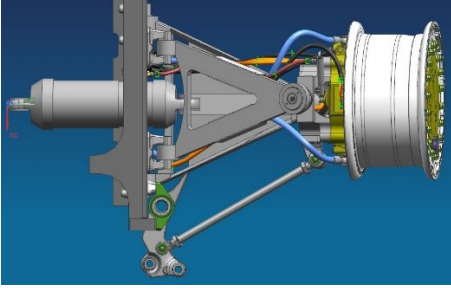
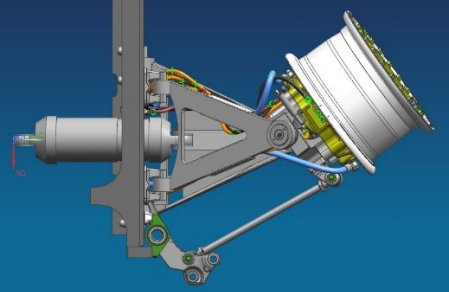
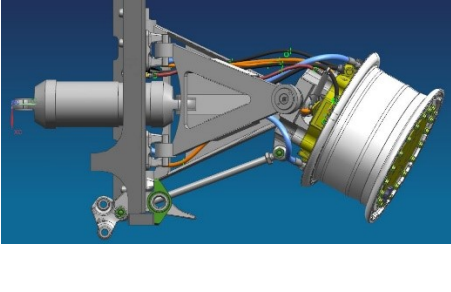
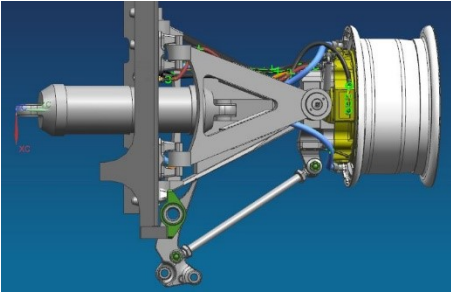
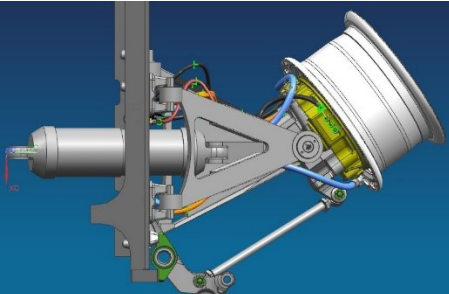
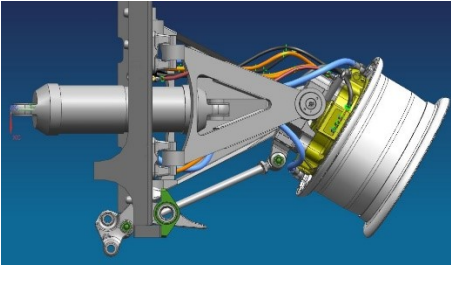
Letkutuki, jonka läpi letku linjataan, tukee letkua ja kannattelee sen painoa. Tuen ja apurungon väliselle osalle letkuun jätetään hieman löysää joustovaraa, mutta suurin osa taipumisesta pyöräntuennan liikkeiden mukana syntyy navan puoleisen pään liittimen ja tukilevyn välillä. Letkun taivutuspiike on tässä välissä. Taivutuspiike pitää pyrkiä tukemaan esimerkiksi olka-akseliin ohjausakselin päälle. Lisäksi letkun lähtö liittimeltä pitää tukea, jotta liitokseen ei synny rasiitusta, kuten Taulukon 12 perusteella oikealle käännössä näyttää syntyvän. Letkua myös hankauskulumalta suojaava ja turvallisuutta parantava suojasukka kannattaa asentaa letkun ympärille tukemaan letkun ja liittimen välistä liitosta.

CTIS-letku puolestaan kulkee olka-akselin suojassa jäädytyksen sisäänmenoletkun kanssa samalle ylätukivarren letkutuelle ja sitä kautta apurungon läpiviennille. Koska CTIS-letkun reitti kokonaisuudessaan kulkee lähellä pyöräntuennan keskilinjaa, tuennan liikkeet eivät vaikuta kovin suuresti letkuun. Suurin haaste CTIS-letkun reitityksessä on tiukka taivutus, joka letkuun on tehtävä, jotta se taipuu olka-akselin suojassa pyörännavalta ylätukivarren alle. Kuten Taulukosta 15 nähdään, taivutuksessa pysytään CTIS-letkun minimaistaivutussäteen yläpuolella.

CTIS-letkun tuentaan olka-akselin sisäpuolella on kiinnitettävä huomiota, jotta banjoliittimelle tulevia rasiituksia saadaan minimoitua ja letku ei pääse hankaamaan olka-akseliin liikkeiden mukana. Hankausvaurioiden minimoimiseksi myös CTIS-letkun ympärille kannattaa asentaa suojasukka. Lisäksi tuennalla estetään se, ettei letku pääse käytännössä taipumaan alle minimaistaivutussäteen. Hyvä paikka letkun tuennalle olisi esimerkiksi jatkokkehitysvaiheessa suunniteltava napamoottorin liitinpintaan asennettava jarrun toimilaitteivun suojailevy.

Myös CTIS- ja jäädytysnesteletkujen asennukseen letkutuen läpi on kiinnitettävä huomiota, jotta letkut eivät pääse hankaamaan toisiaan vasten. Letkutuki on rakenteeltaan sellainen, että siinä on oma reikänsä kullekin letkulle, joten ainakin tuen kohdalla letkujen väliin ja hieman tilaa. Lisäksi letkujen ympärille asennettavat suojasukat vähentävät letkujen hankauskulumaa. Taulukkoon 13 on koottu yläpuolelta otetut kuvat jokaisesta pyöränasemasta.

**Taulukko 13.** Kaikki yhdeksän pyöränasemaa ylhäältä kuvattuna.

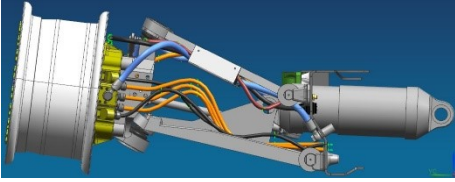
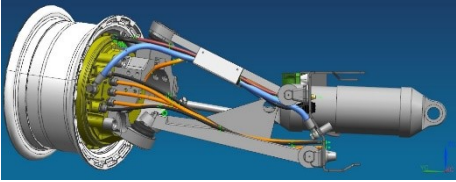

		
Kääntö: <b>ei</b> ; Jousto: <b>ei</b>	Kääntö: <b>vasen</b> ; Jousto: <b>ei</b>	Kääntö: <b>oikea</b> ; Jousto: <b>ei</b>
		
Kääntö: <b>ei</b> ; Jousto: <b>sisään</b>	Kääntö: <b>vasen</b> ; Jousto: <b>sisään</b>	Kääntö: <b>oikea</b> ; Jousto: <b>sisään</b>
		
Kääntö: <b>ei</b> ; Jousto: <b>ulos</b>	Kääntö: <b>vasen</b> ; Jousto: <b>ulos</b>	Kääntö: <b>oikea</b> ; Jousto: <b>ulos</b>

Ylhäältä katsottuna johtimien horisontaalinen taipuminen ja pyöräntuennan käytös käännoissä näkyvät erityisen hyvin. Jousituksen liikkeet eivät erotu ylhäältä katsottuna niin selvästi, mutta toisaalta taulukko havainnollistaa jousen lyhyttä iskua hyvin. Lisäksi Taulukosta 13 voidaan nähdä, että kaikki letkut pysyvät varsin hyvin pyöräntuennan rakenteen suojassa. Yksikään letkulinja ei tule tuki- tai ohjausvarsien etupuolelle, jossa se voisi altistua helpommin iskuille ja ympäristölle.

Taulukosta 13 nähdään, että etenkin vaaleansiniset jäähdytysnesteletkut pyrkivät taipumaan jonkin verran myös vaakasuunnassa tukilevyjen ja navan välissä. Molemmat letkut on hyvä tukea taivutuspuiteiden kohdalta, jotta saranaliikettä saadaan korostettua ja taivutus ei kuluta letkuja liikaa. Lisäksi varsinkin ulosjoustossa käännettäessä kaapelit pyrkivät taipumaan horisontaalisti. Tätä saadaan vähennettyä tukemalla kaapeleita toisiinsa.

Myös Taulukossa 15 esille nouseva jarruletkun taivutussädeongelma näkyy erityisen hyvin Taulukon 13 kahdeksannessa kuvassa, jossa ulosjoustossa vasemmalle käännettäessä jarruletku tekee erittäin tiukan mutkan letkutuen ja apurungon välissä. Koska vaihteensiirron liitäntöjen kansi on poistettu liitäntöjen havainnollistamiseksi, yläkuvissa näkyvät vaihteensiirron kolme eri lähtöä napamoottorin päällä ennen kuin ne yhdistyvät yhdeksi paksummaksi mustaksi letkuksi. Samalla taulukossa näkyy vaihteensiirron letkun taipuminen, kun letku lähtee läpivienniltä suoraan taaksepäin ja taipuu siitä etuviisoon ylätukivarren alle taempan letkutukeen. Taulukosta 13 on hyvä huomata, että yksikään johdin ei taivu jousielementin tielle tai hankaa sitä vasten. Taulukossa 14 on esitetty pyöränasemat kuvattuna takaa.

**Taulukko 14.** Kaikki yhdeksän pyöränasemaa kuvattuna takaa.

		
Kääntö: <b>ei</b> ; Jousto: <b>ei</b>	Kääntö: <b>vasen</b> ; Jousto: <b>ei</b>	Kääntö: <b>oikea</b> ; Jousto: <b>ei</b>
		
Kääntö: <b>ei</b> ; Jousto: <b>sisään</b>	Kääntö: <b>vasen</b> ; Jousto: <b>sisään</b>	Kääntö: <b>oikea</b> ; Jousto: <b>sisään</b>
		
Kääntö: <b>ei</b> ; Jousto: <b>ulos</b>	Kääntö: <b>vasen</b> ; Jousto: <b>ulos</b>	Kääntö: <b>oikea</b> ; Jousto: <b>ulos</b>

Taulukosta 14 näkyvät erityisen hyvin kaapelit ja niiden reitit. Kolme oranssia korkeajännite- sekä kaksi mustaa datakaapelia on reititetty apurungolle alatukivartta pitkin siten, että ne on tuettu suunnilleen alatukivarren puoliväliin kiinnitettyyn järeään kiinnikkeeseen. Lisäksi kuvissa näkyy yläkautta reititetyt sininen jäähdytysnesteen ulosvirtausletku, musta vaihteensiirron letku sekä ruskea jarrunesteletku.

Kaapeleiden reitityksessä suurena haasteena on korkeajännitekaapeleiden jäykkyys ja niiden vaatima tuenta, koska sijoittelunsa ja pyöräntuennan laajojen liikkeiden vuoksi ne joutuvat taipumaan paljon. Kaapelit lähtevät napamoottorin reunalta olka-akselin vierestä. Lähdöt kannattaa tukea olka-akseliin kiinnittämällä kaksi kaapelitukea peräkkäin olka-akselin ohjausvartta vastaavalle paikalle. Lähempänä napaa olevassa tuessa on



tuenta kaikille kolmelle korkeajännitekaapelille ja toisessa vain kahdelle ylemmälle kaapelille. Kaksi ylintä korkeajännitekaapelia kulkee molempien kannakkeiden ja kolmas eli alin kaapeli vain ensimmäisen kannakkeen läpi, jotta se pystyy vielä taipumaan alatukivarren päälle ilman, että minimitaivutussädetä alitetaan. Näin kaapelit lähtevät napamoottorilta suoraan, eikä niihin kohdistu turhaa rasitusta heti läpivienniltä. Samalla kaapelit saadaan tuettua myös alkuosalta, jolla alatukivarsi ei tue niitä.

Lisäksi kaapelit olisi hyvä pyrkiä kiinnittämään yhteen kaapelinippuun, jossa ne tukevat toisiaan. Johtonippu tuetaan kiinnikkeellä alatukivarteen, jotta kaapeleiden liikkeitä saadaan rajoitettua ja ne pysyvät paremmin tukivarren suojassa. Molemmat datakaapelit kannattaa myös kiinnittää samaan johtonippuun siten, että nippujen kiinnityspisteet ovat molempien taivutusasteiden kohdalla. Taivutusasteet sijaitsevat sekä navan ja alatukivarren kiinnityspisteiden että alatukivarren kiinnityspisteiden ja apurungon välissä. Näin taivutusasteet saadaan tuettua ja kaapeleiden taivutuksen kestoa parannettua. Taulukosta 14 nähdään, että kaapelit pyrkivät taipumaan erityisesti vasemmalle kääntyessä, mutta myös suoraan ajettaessa.

Suoraan ajettaessa kaapelit taipuvat pääasiassa suhteellisen siististi alatukivarren kiinnityspisteiden ja navan välissä, mutta vasemmalle kääntyessä syntyy ongelmia, kun kaapelit taipuvat molemmista taivutusasteista. Kahdesta kohtaa taipuminen vähentää kaapeleiden kestoikää, mutta tällä napamoottorin konfiguraatiolla kaapeleiden taipumisongelmaa on hankala korjata. Kestoa kannattaa pyrkiä parantamaan tukemalla kaapelit toisiinsa, mutta parempi ratkaisu olisi muuttaa napamoottorin suunnittelua siten, että kaapelit kulkisivat lähempänä pyöräntuennan keskilinjaa, jolloin niiden ei tarvitsisi taipua niin paljon tuennan liikkeiden mukana.

Ruskean jarruletkun reititys näkyy hyvin Taulukossa 14. Jarruletku kulkee toimilaitesylinteriltä taemman ylätukivarteen kiinnitetyn letkutuen läpi apurungon läpiviennille. Taulukossa 13 näkyvät jarruletkun reititysongelmat näkyvät selvästi myös Taulukossa 14, kun sisäänjoustossa jarruletku taipuu letkutuen ja apurungon välillä tiukalle mutkalle. Tiukka taivutus johtuu letkun minimi- ja maksimipituuksien suuresta erosta suhteessa letkun pituuteen. Oikealle kääntyessä letku on lähes jännityksessä liittimien välillä ja muissa asennoissa se taipuu mutkalle. Ongelmaan voisi olla ratkaisuna CTIS- ja jäähdytysjärjestelmien letkujen tyylinen banjoliitin, jolla letkun suuntausta saisi muutettua ja taitoksia mahdollisesti vähennettyä. Kuitenkin, koska oikeaa jarrun toimilaitetta ei ole vielä suunniteltu, letkulinjaakaan ei vielä kannata suunnitella valmiiksi. Tähän konseptiin riittää, että valittu jarruletku on sopiva jarruletkuksi, vaikka nykyisellä jarrun toimilaitteen sijoittelulla se ei konseptiin sovikaan.



Jäähdytysnesteen ulostuloletku on reititetty vastaavasti sisäänmenoletkun kanssa eli yläkautta, mutta ulostuloletku kulkee taemman letkutuen läpi apurungossa olevalle läpiviennille. Jäähdytysnesteletkun rinnalla kulkee musta vaihteensiirron letku. Molempien letkujen taivutuspaiste on suunnilleen samassa paikassa, joten ne kannattaa kiinnittää samaan kiinnikkeeseen tai tukea toisiinsa. Näin letkujen saranaliikettä saadaan parannettua ja siten letkujen kestoikää kasvatettua. Letkujen toisiinsa tukeminen on mahdollista, koska letkujen painetasoissa ei ole suuria eroja. Molemmat letkut kannattaa suojata suojasukalla jäähdytysnesteen sisäänmenoletkun ja CTIS-letkun tapaan.

Valittujen letkujen taivutussäteet eri pyöränasemissa on esitetty Taulukossa 15. Lisäksi taulukkoon on listattu letkun minimitaivutussäde, liittimien pituusmitta, letkun pituus sekä koko letkuasennelman pituus.

**Taulukko 15.** Valittujen letkujen taivutussäteet suunnitelluilla reiteillä.

Pyöränasema	Jäähdytys sisään (mm)	Jäähdytys ulos (mm)	CTIS (mm)	Jarruletku (mm)	Vaihteen- siirto (mm)
Minimitaivutussäde	44	44	51	51	55
Liittimien pituus	2 x 60	2 x 60	2 x 33	2 x 15	33
Letkun pituus	980	980	894	720	917
Letkukokoon- panon pituus	1100	1100	960	750	950
Kääntö: ei Jousto: ei	64,7	52,2	52,1	47,4	73,3
Kääntö: vasen Jousto: ei	49,9	44,6	66,0	29,9	52,4
Kääntö: oikea Jousto: ei	54,9	55,4	53,6	55	64,9
Kääntö: ei Jousto: sisään	68,1	68,0	56,7	55,2	66,0
Kääntö: vasen Jousto: sisään	47,4	45,9	55,4	44,8	50,8
Kääntö: oikea Jousto: sisään	44,7	78,1	54,9	67,9	58,8
Kääntö: ei Jousto: ulos	50,5	55,4	58,0	36,8	62,9
Kääntö: vasen Jousto: ulos	49,6	51,9	56,0	36,5	55,8
Kääntö: oikea Jousto: ulos	47,8	74,7	51,4	92,7	55,8

Taulukkoon 15 on merkattu punaisella ne mitat, jotka ovat alle letkun minimitaivutussäteen. Erityisen ongelmalliseksi huomataan jarruletku, joka alittaa minimitaivutussäteen useassa eri pyöränasemassa. Kuten jo aiemmassa kappaleessa todettiin, jarruletkua ei suunnitella tämän paremmin, koska jarrun toimilaite ei ole valmis. Kannattaa kuitenkin

huomioida, että jarruletkua ei kannata reitittää tai toimilaitetta suunnitella tämän konseptin tapaan.

Lisäksi vaihteensiirron letku taipuu alle minimitaivutussäteen tai hyvin lähelle sitä vasemmalle käännessä. Konseptin pyöräntuennalla vasemmalle käännessä kyseessä on käännöksen sisäpuoleinen pyörä. Konseptissa pyörien maksimikäntökulma on  $37^\circ$ , joka on jopa hieman yli maksimikäntökulmavaatimuksen  $34^\circ$ . Jos käntökulmaa rajoitettaisi vaatimuksen alarajalle, vaihteensiirtoletkun ei tarvitsisi taipua aivan näin paljon. Näin minimitaivutussäde ei mahdollisesti ylittyisi. Toinen mahdollinen ratkaisu on letkujen siirto ylätukivarrella kohti apurunkoa, jolloin vaihteensiirron letkun ei tarvitse taipua yhtä tiukasti.

Muut letkut pysyvät minimitaivutussäteen paremmalla puolella. CTIS-letku on kuitenkin jatkuvasti taivutettuna lähelle minimitaivutussädettä, joten se on tuettava hyvin, jotta letku kestää käytössä. Myös jäähdytysletkut ovat hyvin lähellä minimitaivutussäteitään etenkin vasemmalle käännyttäessä, joten nekin vaativat varmaa tuentaa. Valittujen kaapeleiden taivutussäteet eri pyöränasemissa on esitetty Taulukossa 16. Lisäksi taulukoon on listattu kaapelin minimitaivutussäde sekä pituus.

**Taulukko 16.** Valittujen kaapeleiden taivutussäteet suunnitelluilla reiteillä.

Pyöränasema	Korkeajännite1 (mm)	Korkeajännite2 (mm)	Korkeajännite3 (mm)	Data1 (mm)	Data2 (mm)
Minimitaivutussäde	58	58	58	32	32
Kaapelin pituus	900	900	900	925	925
Kääntö: ei Jousto: ei	63,1	61,5	61,0	52,0	64,1
Kääntö: vasen Jousto: ei	62,4	62,0	60,1	44,9	63,7
Kääntö: oikea Jousto: ei	133	99,7	108	182	107
Kääntö: ei Jousto: sisään	74,0	66,1	62,3	84,6	55,4
Kääntö: vasen Jousto: sisään	61,0	61,2	61,0	82,4	61,4
Kääntö: oikea Jousto: sisään	112	129	110	372	150
Kääntö: ei Jousto: ulos	74,6	66,8	60,4	59,9	62,9
Kääntö: vasen Jousto: ulos	62,0	61,4	60,0	56,2	59,1
Kääntö: oikea Jousto: ulos	61,7	71,3	66,3	108	74,2

Taulukosta 16 nähdään, että datakaapelit istuvat pyöräntuentaan taivutussäteiden suhteen hyvin. Datakaapelitkin joutuvat taipumaan kohtalaisen tiukalle mutkalle varsinkin vasemmalle kääntyessä, mutta datakaapeleiden minimitaivutussäde on niin pieni, että se ei pääse alittumaan. Korkeajännitekaapelit sen sijaan ovat melko tiukalla taivutuksella kaikissa muissa tapauksissa kuin oikealle kääntyessä. Tämä rasittaa kaapelirakennetta merkittävästi ja laskee niiden käyttöikä. Korkeajännitekaapeleiden minimi-

taivutussädettä ei kuitenkaan aliteta yhdessäkään pyöränasemassa. Luvun 7 jatkokehitysvaiheessa on esitetty ratkaisuja johdinten reitityksen ja sitä myötä keston parantamiseen.

## 6.2 Vaatimusten täytyminen

Luvun 3 vaatimuslistassa on kaiken kaikkiaan 46 tätä konseptia koskevaa vaatimusta. Vaatimusten täytyminen arvioidaan lyhyesti Taulukossa 17. Taulukon pohjana käytetään luvun 3 vaatimuslistaa, johon tarkentavan kommentin sijaan on kuvattu, kuinka vaatimus konseptissa täyttyy.

**Taulukko 17. Konseptin vaatimusten täytyminen.**

Vaatimusten kohde	Vaatus	Täytetty
<b>1. Käyttäjän vaatimukset</b>	1.1 Ajoneuvon huippunopeus on oltava vähintään 100 km/h.	Napamoottori on mitoitettu 105 km/h huippunopeuden mukaan.
	1.2 Järjestelmä on mitoitettava 8000 kg:n akselipainolle.	Mitoituksessa käytettiin 8000 kg:n akselipainoa.
	1.3 Alustan maavaran on oltava nimellisasennossa vähintään 430 ±15 mm ajoneuvon keskilinjalla.	Konsepti on mallinnettu mukailen AMV:n pyöräntuenta, joten maavaravaatimus täyttyy.
	1.4 Jokaisessa navassa on oltava veto.	Konsepti on monistettavissa.
	1.5 Jokaisen akselin pitää olla ohjattavissa.	Konseptissa on huomioitu ohjaus ja se on monistettavissa.
	1.6 Rengaskoon on oltava 14R20.	Valittu rengaskoko on 14R20.
	1.7 Järjestelmän on oltava toimintakykyinen -46°C...+49°C lämpötiloissa.	Komponentit on valittu sen mukaan, että ne täyttävät lämpötilavaatimuksen.
	1.8 Alustan on kyettävä toimimaan standardin STANAG 2895 mukaisissa sääolosuhteissa.	Komponentit on valittu siten, että ne toimivat haastavissakin sääolosuhteissa.

	1.9 Alusta on oltava varastoitavissa standardin STANAG 2895 mukaisissa sääolosuhteissa ilman häiritseviä vaikutuksia alustaan.	Komponentit on valittu siten, että ne voidaan varastoida vaadituissa olosuhteissa.
	1.10 Ajoneuvon sähköisten järjestelmien on täytettävä STANAG 2601 -standardin vaatimukset.	Sekä napamoottori, että sähkökaapelit on suunniteltu sotilaskäyttöön, joten vaatimus täyttyy.
	1.11 Ajoneuvon on oltava uintikykyinen.	Napamoottori kestää upotusta ja letkut ja liittimet on valittu tämän vaatimuksen mukaan. Hydropneumaattisen jousen tiivistykseen on kiinnitettävä jatkokehityksessä huomiota.
	1.12 Ajoneuvon huoltoväli on oltava vähintään neljä vuotta.	Johdin rakenteen kannalta vaatimuksen täyttäminen ei ole mahdollista. Vaatimus on määriteltävä uudelleen.
	1.13 Järjestelmän ei tule vaatia merkittäviä toimenpiteitä viiden vuoden varastoinnin aikana.	Järjestelmä on varastoitavissa.
	1.14 Napamoottorin huoltovälin oltava vähintään vuosi.	Napamoottori on suunniteltu vuoden huoltovälin mukaan.
	1.15 Normaalit käyttöhuollot on kyettävä tekemään ajoneuvon omilla työkaluilla.	Työkalut on määriteltävä konseptin mukaan. Konsepti ei vaadi erikoistyökaluja.
	1.16 Alustarakenteen on mahdollistettava useammat eri ajoneuvotyypit.	AMV:n alusta ja mitoituksessa käytetty massa mahdollistavat alustan monipuolisen käytön.
	1.17 Ajoneuvon on kestävä dokumentin D511951 keskimääräisen käyttöprofiilin mukaista käyttöä.	Rakenne on pyritty suunnittelemaan vaatimuksen perusteella.
	1.18 Kaikkien alijärjestelmien on toimitettava suunnitellusti IEC 61000-4-2-standardin tason neljän mukaisen elektrostaattisen varauksen testissä.	Kaapelit on suojattu ja napamoottori on suunniteltu täyttämään alan standardit.

	1.19 Ajoneuvon EMC-ominaisuuksien (Electromagnetic compatibility) eli sähkömagneettisen yhteensopivuuden on täytettävä MIL-STD-461E-standardin mukaisten testien raja-arvot.	Sekä napamoottori että sähkökaapelit on suunniteltu sotilaskäyttöön. Lisäksi valitut letkut ovat sähköajohtamattomia, joten vaatimus täyttyy.
	1.20 Ajoneuvon on täytettävä direktiivin 2007/46/EC mukaiset tyyppihyväksynät.	Konseptia tuotteistettaessa se on tyyppihyväksytettävä. Suunniteltu konsepti ei estä tyyppihyväksyntää.
	1.21 Ajoneuvon materiaalien pitää olla kierrätettävissä mahdollisimman hyvin.	Materiaalien kierrätysohjeet hankittava komponenttitoimittajilta.
	1.22 Ajoneuvon on täytettävä vähintään Euro VI raskaan ajoneuvon päästönormit.	Sähköinen napamoottori ei aiheuta pakokaasupäästöjä ja siten täyttää normin.
	1.23 Melutasojen on täytettävä direktiivin 70/157/ETY vaatimukset.	Sähköinen napamoottori on erityäin hiljainen polttomoottoriin verrattuna.
	1.24 Häiriötilanteen sattuessa ajoneuvon käytön on säilyttävä turvallisena ja ajoneuvon toimintakykyisenä.	Johdinrakenne on suunniteltu turvallisesti muun muassa suojaamalla letkut. Koska napamoottorit ovat jokaisessa pyörännavassa, ajoneuvo säilyy toimintakykyisenä, vaikka niistä useampaankin tulisi häiriö samanaikaisesti.
	1.25 Mahdollinen letkurikko ei saa aiheuttaa henkilö- tai ympäristövahinkoa.	Letkut on suojattu suojasukilla.
	1.26 Järjestelmistä on toimitettava kaaviot sekä toiminta- ja rakennekuvaukset.	Kaaviot ja kuvaukset on luotu.
<b>2. Ajoneuvon vaatimukset</b>	2.1 Joustoliikkeen on oltava vähintään 250 mm sisäänpäin ja 200 mm ulospäin pyöräaseman nimellisasettoon verrattuna.	Pyöräntuenta on suunniteltu näiden mittojen mukaan.

	2.2 Rakenteen on sallittava kaartein sisäpuoleisella pyörällä vähintään 34° pyörien maksimikäntökulman.	Maksimikäntökulma kaartein sisäpuoleisella pyörällä on 37° 3D-mallista mitattuna.
	2.3 Rakenne pitää olla monistettavissa jokaiselle pyörälle.	Rakenne on monistettavissa pienillä muutoksilla.
	2.4 Jarrumomentin on riitettävä 0,8 G:n hidastuvuuden saavuttamiseen.	Vaatus on huomioitava jarrua suunnitellessa.
	2.5 Napojen yhteenlaskettu vetovoima oltava riittävä 0,8 G:n vetovoiman saavuttamiseen.	Kahdeksalla tämän kokoluokan napamoottorilla vaatimus saavutetaan helposti.
	2.6 Napakohtainen vetovoima oltava kaksinkertainen kohdassa 2.5 määritettyyn keskimääräiseen arvoon nähden.	Sähköinen napamoottorin vääntömomentti on korkea, joten vaatimus täyttyy valitulla moottorilla.
<b>3. Komponentti-vaatimukset</b>	3.1 Napamoottorin tehon on oltava 60–90 kW per napamoottori jatkuvana tehona.	Napamoottorin jatkuva teho on 85 kW [19].
	3.2 Napamoottorin hukkalämpöteho ei saa ylittää 11,5 kW:a.	Jäähdytys on mitoitettu vaatimuksen mukaan.
	3.3 Napamoottorin on tuettava CTIS-järjestelmää.	Moottori tukee CTIS-järjestelmää [19].
	3.4 Kaapelivaurion sattuessa napamoottorin on siirryttävä turvalliseen tilaan.	Napamoottorin ohjaus suunniteltava vaatimuksen mukaan. Kaapelivaurioiden riskit pyritty minimoimaan
	3.5 Jäähdytysnesteenä käytettävä propyleeniglykolin ja veden seosta.	Jäähdytysneste on valittu vaatimuksen mukaan.
	3.6 Jäähdytysnesteen lämpötila ei saa ylittää 80 °C imuvirtauksessa, eikä 105 °C moottorilta ulosvirtauksessa.	Järjestelmä on mitoitettu vaatimuksen mukaan.
	3.7 Jousitus tulee olla hydropneumaattinen suoraan alatukivarteen kiinnitetty jousielementti, joka on käännetty apurungon sisälle.	Konseptin jousielementti suunniteltu tätä vaatimusta noudattaen.
	3.8 Nimellisasennossa jousen kaasutillavuuden paineen on oltava 60 bar.	Hydropneumaattisen jousen mitoitukseen käytetty tätä vaatimusta.



	3.9 Jousen kaasutilavuuden maksimipaine ei saa ylittää 400 baaria.	Hydropneumaattisen jousen mitoitukseen käytetty tätä vaatimusta.
	3.10 Käyttöjarrun toimilaitteen tulee olla hydraulinen.	Hydraulinen toimilaitte hahmoteltu osana työtä.
	3.11 Letkuille ja sähkökaapeleille on jätävä riittävä tila.	Letkureitit on saatu mahtumaan pyöräntuentaan.
	3.12 Letku- ja kaapelilinjat on linjattava mahdollisimman suojaan ja reittien pitää mahdollistaa korkea kestoikä.	Suunnittelu on tehty tämän vaatimuksen mukaan.
	3.13 Letkujen on oltava heijastamattomia materiaalia.	Letkumateriaaleiksi on valittu heijastamattomat materiaalit.
	3.14 Letkujen ja kaapelien on kestävä vähintään keskimääräisen käyttöprofiilin mukaista käyttöä yhden huoltovälän ajan.	Johdinrakenteen käyttöikä on suunniteltu tämän vaatimuksen mukaan.

### 6.3 Kustannusanalyysi

Tässä aluvussa esitellään konseptin komponenttien karkea kustannusanalyysi listan muodossa. Kustannusanalyysiin on listattu tähän konseptiin suunniteltu jousielementti sekä napamoottori ja sen integrointiin liittyvät johtimet liittimiseen. Samalla lista toimii tämän työn osaluettelona. Kustannusarvioon ei ole laskettu mukaan suunnittelu-, testaus- tai muita tuotekehityskustannuksia, vaan ainoastaan komponenttien hinnat.

Hinnat perustuvat pääosin Patrian hankintaosastolta saatuihin tietoihin sekä komponenttitoimittajien listahintoihin. Napamoottorin hinta-arvio pohjautuu hankinnan arvioon saman kokoluokan laadukkaiden napamoottoreiden hintatasosta. Käytännössä komponenttien tilausmäärät vaikuttavat hintoihin suuresti, mutta tämä karkea kustannusarvio antaa kuitenkin suuntaa konseptin käytännön kustannuksista. Patrian OEM-alennus on huomioitu, joten analyysi on realistinen, vaikka tilausmääriä ei olekaan huomioitu. Jos liittimen ruostumattomasta versiosta ei ole erikseen listahintaa saatavilla, hinta on arvioitu kertomalla se kahdella. Lisäksi hydropneumaattisen jousen tuotekehityskustannuksia ei ole otettu huomioon sen hinnassa, vaan hinta perustuu vastaavien hydropneumaattisten jousten hintatasoon.

**Taulukko 18. Konseptin kustannusarvio.**

Järjestelmä	Komponentti	Hinta (€)
Sähköinen napamoottori	QinetiQ HDU-100	10 000
Hydropneumaattinen jousi	Erikoisvalmisteinen jousi	3 000
Jäähdytysletku	Letku: 6722-0625050I, 1,96 m	18
	Banjoadapteri: 3069-10-22, x 4	4 x 14,5
	Liitin: 106HY-10-10, x 4	4 x 27
	Banjopultti: AM-16, x 4	4 x 12
	Läpivienti: Omavalmisteläpivientiholkki, x 2	2 x 5
	<b>Yhteensä</b>	

CTIS-letku	Letku: 538DM-6 DuraMax, 0,9 m	13
	Banjoliitin: 14956-16-6C Banjo Union, x 2	24
	Banjopultti: AM-10, x 2	2 x 6
	Läpivienti: Raufoss 623 7726, x 1	3
	<b>Yhteensä</b>	<b>52</b>
Jarruletku	929BJ-4, 0,72 m	24
	2 x 1JC91N-4-4C	2 x 30
	4-4F42EDMLOSS	24
	<b>Yhteensä</b>	<b>108</b>
Vaihteensiirron letku	Letku: 1010P06 00M04 -Multitube, 0,9 m	8
	Liitin: 3618-04-19, x 3	3 x 4
	Läpivienti: Legris 3320&3321 06 00 04, x 1	2 x 27
	Letkujakotukkihattu: Legris 3329 00 02	16
	Läpivienti (napa): AGRO 1060.25.190, x 1	6
	<b>Yhteensä</b>	<b>96</b>
Korkeajännitekaapeli	Kaapeli: XLE 150 HVX2/0X 1000V, 2,7 m	54
	Läpivienti (napa): AGRO 1060.25.160, x 3	3 x 6
	Läpivienti: Kumitiiviste, x 3	3 x 1
	<b>Yhteensä</b>	<b>75</b>
Datakaapeli	Johto1: Glenair MWDL-15P-6E5-48B	42
	Johto2: Glenair MWDL-9P-6E5-48B	66

	Liitin1: Glenair MWDM2L-15SS	17,5
	Liitin2: Glenair MWDM2L-9SS	14
	Suojaletku: Murrflex GF10, x 2	1,5
	Läpivienti (napa): AGRO 1060.25.160, x 2	2 x 6
	Läpivienti: Kumitiiviste, x 3	2 x 1
	<b>Yhteensä</b>	<b>155</b>
Komponentit yhteensä:	Napamoottori	10 000
	Hydropneumaattinen jousi	3 000
	Letkut	498
	Kaapelit	230
	<b><u>Yhteensä</u></b>	<b><u>13 728</u></b>

Muut komponentit löytyvät myös AMV:n tavanomaisesta rakenteesta, joten ne eivät ole kustannusanalyysin kannalta kiinnostavia. Konseptin komponenttien kustannuksiksi arvioidaan 13 728 euroa, mikä tarkoittaa sitä, että konseptia monistettaessa koko ajoneuville kustannukset nousevat noin 100 000 euroon.

## 7. JATKOTOIMENPITEET

Jotta konseptia saataisiin kehitettyä paremmaksi tai jopa valmiiksi tuotteeksi, se vaatii jatkotoimenpiteitä. Näihin kuuluu muun muassa tuotteistamisprosessin jatkaminen PDR:stä eteenpäin, komponenttien suunnittelun jatkaminen ja komponenttivalmistajien mukaan ottaminen suunnittelutyöhön. Lisäksi, jotta konseptista saataisiin suunniteltua valmis tuote, suunnittelua on laajennettava koskemaan koko ajoneuvoa. Tarkemmin jatkotoimenpiteet on avattu seuraavissa kappaleissa.

Yksi tärkeimmistä jatkotehtävistä on konseptin testaus käytännössä. Patrian tuotteistamisprosessin mukaan testaus kuuluisi aloittaa jo PDR-katselmuksessa, joka kuuluu osittain tämän työn piiriin [6]. Konseptin luotettavuus ja rakenteen kesto selviävät parhaiten kokeilla. Yksi parhaista tavoista arvioida letkujen kestoja on testata niitä käytännössä ja oppia mahdollisista johdinrikoista ja -vaurioista [31]. Letkujen käyttöikä ja kesto arviointiin on kehitetty myös teknologia, jota voisi soveltaa tässä konseptissa. Eatonin LifeSense Hose -letkunvalvontajärjestelmä havaitsee tapatumat, jotka johtavat letkurikkoon ja varoittaa käyttäjää niistä ennen kuin letku hajoaa. Järjestelmä ei siis varsinaisesti paranna letkun kestoja, mutta se vähentää letkurikkojen riskiä ja parantaa järjestelmän turvallisuutta. [60]

Johdinrakenteelle on laadittava myös huolto-ohjelma, jota noudattamalla johdinrakenteen käyttöikä paranee ja johdinrikköjen riski pienenee. Letkut ja kaapelit on uusittava ajoissa, eikä niiden käyttöikä saa ylittää. Usein letkujen käyttöikä on noin 10 vuotta, mutta tämän konseptin mukaisella käytöllä johtimet kannattaa vaihtaa vuosittain huollon yhteydessä, kuten alaluvussa 6.1 perusteltiin. [31] Lisäksi huolto-ohjelman suunnittelun osana ajoneuville on laadittava ajoonlähtötarkastuslista, johon lisätään maininta johdinten kunnon tarkastuksesta aina ennen ajoon lähtöä. Käytännössä johtimista pitää mahdollisuuksien mukaan tarkastaa visuaalisesti kaikki merkit johdinten kulumasta tai nurjahduksista, mahdolliset öljy- tai jäähditysnestevuodot sekä liitinten kunto päällisin puolin.

Napamoottoriin liittyy paljon jatkokehitysmahdollisuuksia ja -tarpeita. Moottorin jatkokehitykseen kannattaa ottaa mukaan sen valmistaja QinetiQ, jonka kanssa moottoria voidaan kehittää vastaamaan paremmin Patrian vaatimuksia ja tarpeita. Etenkin liitinpinnat ja jarru vaativat jatkosuunnittelua. Jarrujärjestelmälle on luotava tarkempi spesifikaatio,

jonka pohjalta jarrujärjestelmä letkuineen ja toimilaitteineen suunnitellaan. Paras ratkaisu tähän olisi varmasti integroida jarru osaksi napamoottoria vastaamaan tavanomaista jarrulevystä ja -satulasta koostuvaa asetelmaa, kuten esimerkiksi MST:n napamoottorissa. Lisäksi, jos edetään QinetiQ:n käyttämän ulkoisen jarruvivun, jota jarrun toimilaitte käyttää, mukaan, vivulle ja toimilaitteelle on suunniteltava suojalevy. Suojalevy suojaa jarrua esimerkiksi pölyä ja kiven iskemiä vastaan.

Napamoottorin vaatimien johdinten määrää on myös ehdottomasti vähennettävä tai ainakin liitäntöjä on pyrittävä niputtamaan paremmin yhteen, jotta johdinrakenteesta saadaan yksinkertaisempi ja kestävämpi. Lisäksi, kuten tulosten käsittelykappaleesta selvisi, johtimet on helpompi reitittää lähellä pyöräntuennan keskilinjaa, jossa tuennan liikkeiden vaikutus johdinten liikkeisiin on pienempi. Näin ollen napamoottori pitäisi suunnitella siten, että letkujen ja kaapelien liitännät olisivat mahdollisimman lähellä navan keskilinjaa. Tätä päätelmää tukee myös Kuvan 6 MST:n napamoottori, jossa on yksi monitoimintoinen johdin moottorin navassa, ja Kuvan 13 QinetiQ:n uusin napamoottorimalli, jossa johtimet lähtevät napamoottorilta kahdessa nipussa läheltä moottorin keskilinjaa. Tällaisella suunnittelulla napamoottorista saadaan myös symmetrinen, jolloin konsepti olisi aidosti monistettavissa sellaisenaan jokaiselle pyöräntuennalle.

Toinen vaihtoehto, jolla napamoottorista saa symmetrisen, on luopua tavanomaisesta olka-akselista kokonaan ja pultata pallonivelet suoraan napamoottorin kuoreen, kuten QinetiQ:n HED-demonstraattorissa. Tällöin korkeajännitekaapeleiden ei tarvitsisi väistää olka-akselia, vaan ne voisivat kulkea alkuperäisellä paikallaan suoraan alatukivarren pintaa pitkin tuennan keskilinjalla. Tämä ratkaisu myös vähentäisi kaapeleiden taipuntaa ja lisäisi niiden käyttöikä. Toisaalta tällä reititystavalla hydropneumaattinen jousi olisi kaapeleiden tiellä tai kaapeleiden tulisi kiertää jousen kiinnityspiste. Symmetrian säilyttäminen on hyvä tavoite jatkokehitykselle, sillä se vähentää moottorin muokkaustarvetta ja eri nimikkeiden määrää ja tuottaa siten kustannussäästöjä.

Hydropneumaattista jousia on myös jatkokehitettävä, jotta konseptista saadaan valmis tuote. Paras lopputulos saadaan varmasti, jos kehitystyö suoritetaan yhdessä jousen valmistajan kanssa. Näin kehitystyöhön saadaan enemmän asiantuntijoita mukaan, jolloin jousen rakenteesta saadaan varmasti kestävä ja materiaaleista oikeanlaisia. Jousen jatkokehityksessä erityisesti jousen kaasutilavuuden tiivistykseen on kiinnitettävä huomiota, jotta jousen kestoikä saadaan maksimoitua. Nopeiden painemuutosten ja korkeiden painetasojen vuoksi tiivistys on kovilla. Tiivistyksen on oltava pitävä, jotta vuotoja ei

pääse tapahtumaan ja jousi säilyy toimintakykyisenä. Lisäksi jatkokehityksessä jousielementin iskunpituuteen on hyvä varata lisäpituutta, jotta jousi ei pääse iskeytymään päätyyn niin helposti.

Lopuksi, jotta Patria saisi kehitettyä konseptista tuotantovalmiin tuotteen, tuotteistamisprosessia on jatkettava *PDR*:stä eteenpäin prosessin vaiheiden mukaan. Lisäksi konseptia on laajennettava koskemaan koko ajoneuvoa eli muun muassa konseptin voimantuotto ja -siirto on suunniteltava, oli voimanlähteenä sitten generaattori tai akut.

## 8. YHTEENVETO

Tässä luvussa kiteytetään koko suunniteltukonsepti. Työn loppupäätelmänä voidaan esittää, että tällä konseptilla ei välttämättä kannata jatkaa eteenpäin ainakaan sellaiseen. Konsepti on sen verran vaativa, että johdinrakenteesta tulee liian monimutkainen ja joustoa vaativa. Sen kestoikää ei välttämättä saada tyydyttäväksi, vaikka johtimet tukisi ja suojaisikin erittäin hyvin. Konsepti sinällään on varsin lupaava ja siinä on paljon tulevaisuuden potentiaalia. Sen kehittämistä kannattaakin jatkaa jatkokehitysehdotusten pohjalta ja esimerkiksi QinetiQ:n uusi napamoottorikonsepti, jonka integrointi on huomattavasti yksinkertaisempi, vaikuttaa erittäin lupaavalta perustalta jatkokehitykselle.

Hydropneumaattinen jousi täyttää sinällään järjestelmän vaatimukset uudella sijoittelutavalla, mutta sen kestäväksi saamiseen liittyy suuria haasteita. Jousen jatkokehittäminen voi kuitenkin olla järkevää, jos siihen saadaan mukaan jousivalmistaja ja sillä todetaan saavutettavan riittävästi hyötyjä.

Aiheen tutkimista kannattaa jatkossakin jatkaa Patrialla esimerkiksi voimantuoton suunnitteluun tai napamoottorien ohjaukseen liittyvän diplomityön muodossa. Kaiken kaikkiaan korkeat kustannukset, jotka ovat koituneet monen muunkin vastaavan konseptin kohtaloksi, vaivaavat tätäkin konseptia. Toistaiseksi voisi sanoa, että napamoottorein toteutettu voimansiirto on kymmeniä tuhansia euroja tavanomaista voimansiirtoa kalliimpi. Napamoottoriteknologian kehittyessä ja yleistyessä kustannukset todennäköisesti laskevat tulevaisuudessa, jolloin tämä konsepti moderneilla komponenteilla varustettuna voi olla hyvinkin toteutuskelpoinen. Patrian ei kannata jäädä kehityksessä kilpailijoita jälkeen, vaan sen on pysyttävä kehityksen aallonharjalla. Sähköisillä napamoottoreilla saavutetaan useita etuja tavanomaiseen voimansiirtoon nähden. Tulevaisuudessa kustannusten laskiessa ja asiakastarpeiden mennessä yhä enemmän ympäristöystävällisempään suuntaan, sähköhybridivaihtoehdosta voi tulla hyvinkin kiinnostusta markkinoilla herättävä tuote. Silloin Patrialla on hyvä olla konsepti valmiina.



## LÄHTEET

- [1] Armoured Modular Vehicle - Patria AMV XP, Patria, brochure. Available: <https://www.patriagroup.com/products/armoured-wheeled-vehicles/patria-amvxp>.
- [2] Patria AMV, Wikimedia, 2020, web page. Available (accessed 31.3.2020): [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Pansarterr%C3%A4ngbil\\_360\\_Revinge\\_2015-7.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Pansarterr%C3%A4ngbil_360_Revinge_2015-7.jpg).
- [3] Keskimääräinen käyttöprofiili teknisen suunnittelun käyttöön, Patria, 25.9.2012.
- [4] Esitemateriaalia, Patria Vehicles Oy, 2005.
- [5] YouWheel.com, Automobile Suspension Design 101 (Part III): Double Wishbone Suspension, Medium, Jan 2015, web page. Available (accessed 30.4.2020): [https://medium.com/@you\\_wheel/automobile-suspension-design-101-part-iii-double-wishbone-suspension-1edbcbe29232](https://medium.com/@you_wheel/automobile-suspension-design-101-part-iii-double-wishbone-suspension-1edbcbe29232).
- [6] Tuotteistamisprosessi ohjeistus, Patria, 2/2020, Excel-taulukko.
- [7] M. Kari, A. Hakala, E. Pääkkönen, M. Pitkänen, Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 STAE 2025, osa 1: Teknologian kehitys, Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, Edita Prima Oy, Helsinki, 2008, 566 s.
- [8] P. Dalsjø, Hybrid electric propulsion for military vehicles - Overview and status of the technology, Norwegian Defence Research Establishment (FFI), FFI-rapport 2008/01220, Kjeller 2008, 84 p. Available (accessed 3.5.2020): <https://pdfs.semanticscholar.org/2bc5/adf23a0d20041726185fc213da99c665e905.pdf>.
- [9] SEP Modular Armoured Tactical System, Army Technology, 2019, web page. Available (accessed 3.5.2020): <https://www.army-technology.com/projects/sep/>.
- [10] A. Olsson Werkström, Hägglunds förlorade igen, Mittnytt, Aug 2010, webbsida. Tillgänglig (omnämnde 3.5.2020): [https://web.archive.org/web/20110612082426/http://svt.se/2.55868/1.2105663/hagglunds\\_forlorade\\_igen?lid=puff\\_2105663&lpos=rubrik](https://web.archive.org/web/20110612082426/http://svt.se/2.55868/1.2105663/hagglunds_forlorade_igen?lid=puff_2105663&lpos=rubrik).
- [11] Hybrid Electric Drive Demonstrator Vehicle, QinetiQ, brochure. Available: <http://www.offroadvehicle.ru/AZBUCAR/QinetiQ/HED.pdf>.
- [12] J. Mackey, S. Goldsack, S. Dick, Next-generation in-wheel electric hub drives, 2017 NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium, Novi, Michigan, USA, August 8-10, 2017. QinetiQ Ltd. Farnborough, UK, p. 1-10.
- [13] admin, Advanced Hybrid Electric Demonstrator vehicle AHED 8x8 Vehicle, Defence Update, Feb 2007, web page. Available (accessed 8.5.2020): [https://defence-update.com/20070219\\_ahed\\_8x8.html](https://defence-update.com/20070219_ahed_8x8.html).

- [14] General Dynamics AHED 8x8, ULTIMATE OFF-ROAD LOCOMOTION, YouTube, Aug 2015, web video. Available (watched 8.5.2020): <https://www.youtube.com/watch?v=OEOc5bXLivE&feature=share>.
- [15] QinetiQ wins two contracts from US Office of Naval Research for its Armored Reconnaissance Vehicle (ARV) programme, QinetiQ, Oct 2018, web page. Available (accessed 24.5.2020): <https://www.qinetiq.com/news/2018/10/qinetiq-wins-two-contracts-from-us-office-of-naval-research--for-its-armored-reconnaissance-vehicle-arv-programme>.
- [16] E-X-Drive®, QinetiQ, 2020, web page. Available (accessed 24.5.2020): <https://www.qinetiq.com/expertise/power-sources-energy-storage-and-distribution/vehicle-drive-technology>.
- [17] J.Pääskyvuori, Napamoottorin integrointi erillisjousitettuun alustaan: Hydrauliiikan ja pneumaatiikan rakennesuunnittelu, Patria, 10/2019, toimeksianto.
- [18] AMV 8X8 ajoneuvon keskimääräinen käyttöprofiili, Patria Vehicles Oy, 20.10.2005.
- [19] 4 tonne per wheel Hub Drive Unit - TARGET REQUIREMENTS SPECIFICATION, QinetiQ, 2018.
- [20] J.Koskela, Napamoottoreilla toteutetun pyöräntuennan konseptointi, Oulun yliopisto, 2020, 124 s.
- [21] Hub interfaces, QinetiQ, 2018.
- [22] G. V. Kinagi, S. P. Pitchuka, D. Sonawane, Hydropneumatic Suspension Design for Light Military Tracked Vehicle, SAE International, 2012-01-1911, Published 09/24/2012. Available: <https://saemobilus-sae-org.libproxy.tuni.fi/content/2012-01-1911>.
- [23] J. Gonzalez Prada, A. Alonso, J. Vinolas, X. Carrera, K. Reybrouck, J. Germán Giménez, Gas dampers: model development and potential ride performance evaluation, Vehicle System Dynamics: Advanced Suspension Systems and Dynamics for Future Road Vehicles, 2011-02-01, Vol.49 (1-2), p.199-218.
- [24] T. Atkins, M. Escudier, A Dictionary of Mechanical Engineering (1 ed.), Oxford University Press, 2013, 372 p.
- [25] Adiabatic Process, HyperPhysics, Georgia State University Department of Physics and Astronomy, web page. Available (accessed 13.10.2020): <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/adiab.html>.
- [26] A. Mutha, S. Thosar, N. Ghodmare, Design and Optimization of a Steering Knuckle of FSAE Car, Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering, I-DAD, February 22 - 24, 2016, p. 463-472.
- [27] Sylinterien mittataulukko 2019, Salhydro Oy, 2019, mittataulukko. Saatavissa: [https://www.salhydro.fi/files/products/Sylinterimitat\\_02092019.pdf](https://www.salhydro.fi/files/products/Sylinterimitat_02092019.pdf).
- [28] T.Tuominen, Patria AMV – vaihkaa vientimenestykseksi, Reserviläinen, 2.1.2018, verkkosivu. Saatavissa: [https://www.reservilainen.fi/uutiset/patria\\_amv\\_vaihkaa\\_vientimenestykseksi](https://www.reservilainen.fi/uutiset/patria_amv_vaihkaa_vientimenestykseksi).

- [29] Hydraulic Hose Information, Engineering360, GlobalSpec, web page. Available (accessed 18.10.2020): [https://www.globalspec.com/learnmore/flow\\_control\\_fluid\\_transfer/pipe\\_tubing\\_hose\\_fittings\\_accessories/hydraulic\\_hose](https://www.globalspec.com/learnmore/flow_control_fluid_transfer/pipe_tubing_hose_fittings_accessories/hydraulic_hose).
- [30] A. Oinonen, Kumiletkut ja letkuliittimet sekä niiden yleisimmät vauriot. FLUID Finland No 2, 3/2002.
- [31] R. Mramor, Predicting the life of hydraulic hose, Machine Design, Cleveland, Vol. 77, Iss. 5, 3/2005. p. 79-80.
- [32] Hydraulic Hose / Connector Product Application Department, The Gates Rubber Co., Routing hydraulic hoses for longer life, Rock Products, Denver, Vol. 104, Iss. 9, 9/2001. p. 38.
- [33] Engineering Essentials: Types of Hydraulic Hose, Hydraulics & Pneumatics, 1/2012, web page. Available (accessed 19.10.2020): <https://www.hydraulicspneumatics.com/technologies/hose-tubing/article/21884159/engineering-essentials-types-of-hydraulic-hose>.
- [34] What does a brake hose do and how long do they last?, BrakeQuip@ProflexHoseLtd., Blog, Available (accessed 19.10.2020): <https://brakequip.co.uk/blog/what-does-a-brake-hose-do-and-how-long-do-they-last/>.
- [35] Static Dissipative Smoothbore PTFE Hose with Silicone Jacket – 929BJ | #929BJ-4, Parker Hannifin, web page. Available (accessed 19.10.2020): <https://ph.parker.com/us/en/static-dissipative-ptfe-hose-with-silicone-jacket-929bj/929bj-4>.
- [36] Automotive Heater & Cooling Hose – Series 6722 | Product Series, Parker Hannifin, web page. Available (accessed 19.10.2020): <https://ph.parker.com/us/en/automotive-heater-cooling-hose-series-6722>.
- [37] Fittings, Parker Hannifin, Catalog 4400 US, catalogue. Available (accessed 19.10.2020): [https://www.parker.com/parkerimages/hpd/literature/catalog/Section%20B%20-%20Fittings\\_.pdf](https://www.parker.com/parkerimages/hpd/literature/catalog/Section%20B%20-%20Fittings_.pdf).
- [38] Banjo Adapters, HoseandFittings.com, web page. Available (accessed 21.0.2020): <https://www.hoseandfittings.com/banjo-adapters/>.
- [39] AMERICAN JIC 3069 SERIES MALE JIC X METRIC BANJO, Products, adaptall, web page. Available (accessed 21.10.2020): <https://www.adaptall.com/products/American/jic/3069.php>.
- [40] H. Nuora, Suljettujen putkiverkostojen mitoituspäätösten tarkastelu, Energiatekniikan koulutusohjelma, Satakunnan ammattikorkeakoulu, 2008, 89 s.
- [41] Propylene Glycol based Heat-Transfer Fluids, The Engineering ToolBox, web page. Available (accessed 15.10.2020): [https://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d\\_363.html](https://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d_363.html)
- [42] Putkivirtaus, Koneautomaatio, Metropolia Ammattikorkeakoulu, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 15.10.2020): <https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/4.+Putkivirtaus>.

- [43] Luentomateriaali, IHA-2100 Hydrauliteknikka I, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017.
- [44] K. Perumal, R. Ganesan, CFD modeling for the estimation of pressure loss coefficients of pipe fittings: An undergraduate project: CFD MODELING FOR THE ESTIMATION OF PRESSURE LOSS, Computer applications in engineering education, 2016-03, Vol.24 (2), p.180-185
- [45] RAUCELL HYDRAULIIKKAÖLJYN JÄÄHDYTTIMET: SARJA-H, Raucell Oy, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 15.10.2020): <https://raucell.fi/hydrauliikkaoljyn-jaahdyttimet-sarja-h/>.
- [46] N. Tenho, MOOTTORITUTKIMUSKONTIN LAYOUTIN JA JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU, Energia- ja polttomoottoritekniikka, Turku AMK, 2019. 27 s.
- [47] A. Siekkinen, A. Korpilahti, Rengaspaineiden säätö puutavara-ajoneuvoissa, Metsätehon tuloskalvosarja 13/2015, Metsäteho, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 20.10.2020): [http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja\\_2015\\_13\\_Rengaspaineiden\\_saato\\_puutavara\\_ajoneuvoissa\\_ak.pdf](http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2015_13_Rengaspaineiden_saato_puutavara_ajoneuvoissa_ak.pdf).
- [48] CAT 4660, Parflex Thermoplastic & Fluoropolymer Products, Hose, Tubing & Fittings, Parker Hannifin, 2018, catalogue. Available (accessed 20.10.2020): [https://www.parker.com/Literature/Parflex/CATALOG\\_4660-Thermoplastic\\_Hose.pdf](https://www.parker.com/Literature/Parflex/CATALOG_4660-Thermoplastic_Hose.pdf).
- [49] CAT 0550, Parker Legris Technical Tubing & Hose, Parker Legris, catalogue. Available (accessed 21.10.2020): [http://www.legris.com/jahia/webdav/site/legris/shared/BP/Documentation/CAT\\_0550\\_UK\\_BD.pdf](http://www.legris.com/jahia/webdav/site/legris/shared/BP/Documentation/CAT_0550_UK_BD.pdf).
- [50] Cable glands Progress nickel-plated brass, Short entry thread metric, AGRO, products. Available (accessed: 24.10.2020): [https://www.agro.ch/en\\_CH/products/industrial-products/cable-glands/progress-nickel-plated-brass/743/cable-glands-progress-nickel-plated-brass?c=473&diameter=](https://www.agro.ch/en_CH/products/industrial-products/cable-glands/progress-nickel-plated-brass/743/cable-glands-progress-nickel-plated-brass?c=473&diameter=).
- [51] Parker Legris Product guide, Parker Legris, 7/2014, catalogue. Available (accessed 21.10.2020): [https://issuu.com/eriksbv/docs/parker\\_legris\\_product-guide](https://issuu.com/eriksbv/docs/parker_legris_product-guide).
- [52] 3320 – Multi-Connector-Male, Parker Legris, Technical Specifications, web page. Available (accessed: 21.10.2020): [http://www.legris.com/Legris\\_ecom/ResearcherReferencesTypeArticle.do;jsessionid=B33A5B6297594676EA69A9813FC4ECAB?codeReferenceASelectionner=&codeActivite=BP&codeGroupe=02&codeFamille=01&codeSousFamille=04&codeTypeArticle=3320&codeFamille=usa&codeLangue=en\\_US#produitsAss](http://www.legris.com/Legris_ecom/ResearcherReferencesTypeArticle.do;jsessionid=B33A5B6297594676EA69A9813FC4ECAB?codeReferenceASelectionner=&codeActivite=BP&codeGroupe=02&codeFamille=01&codeSousFamille=04&codeTypeArticle=3320&codeFamille=usa&codeLangue=en_US#produitsAss).
- [53] 1/0 AWG Champlain EXTRAD XLE HVFX 1000V Shielded Cable – Orange, EV WEST, 12/2015, catalogue. Available (accessed 22.10.2020): [https://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=423&osCsid=1hpg7976hkff24pa7mhnj2jcs7](https://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=423&osCsid=1hpg7976hkff24pa7mhnj2jcs7).
- [54] Interconnect capability guide, Glenair, catalogue. Available (accessed 23.10.2020): <https://cdn.glenair.com/catalogs/interconnect-capability-guide.pdf>.

- [55] MWDL Low Profile Plastic Shell Micro-D Insulated Wire Termination, Glenair, 2013, technical specification. Available (accessed: 23.10.2020): <https://docs.rs-online.com/8587/0900766b81327a38.pdf>.
- [56] Series 96, High-Performance wire and cable, Glenair, 6/2013, catalogue. Available (accessed 23.10.2020): <https://cdn.glenair.com/catalogs/wire-and-cable.pdf>.
- [57] Cable protection conduit, Murrflex closed, Type GF, Murri Oy, technical specification. Available (accessed 23.10.2020): [http://www.murri.fi/files/documents/products/P83341016/GF-punottu\\_letku.pdf](http://www.murri.fi/files/documents/products/P83341016/GF-punottu_letku.pdf).
- [58] A. A. Jaoude, Analytic and linear prognostic model for a vehicle suspension system subject to fatigue, Systems Science & Control Engineering, An Open Access Journal, Volume 3, 2015 - Issue 1, p. 81-98.
- [59] D. Atanasov, D. Singh, S. Karayagiz, Eaton`s new development on braided hoses extends service-life to one-million cycles and increases flexibility and pressure resistance, Eaton Aeroquip Dynamax EC881, White paper, 2018. Available (accessed 24.10.2020): [https://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@hyd/documents/content/pct\\_3610316.pdf](https://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@hyd/documents/content/pct_3610316.pdf).
- [60] M. Gannon, M. Beining, How does Eaton`s LifeSense Hose improve system performance?, HOSE ASSEMBLY TIPS, 6/2018, web page. Available (accessed 25.10.2020): <https://www.hoseassemblytips.com/how-does-eatons-lifesense-hose-improve-system-performance/>.