



# **KOELENNOKIN PAINEILMAJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU**

Santeri Viinikainen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2013  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Lentokonetekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Lentokonetekniikka

VIINIKAINEN, SANTERI:  
Koelennokin paineilmajärjestelmän suunnittelu

Opinnäytetyö 47 sivua, joista liitteitä 5 sivua  
Toukokuu 2013

---

Tein opinnäytetyöni Patria Aviation Oy:lle talven 2012 ja kevään 2013 aikana. Työn suunnittelu- ja teoriaosuuden toteutin Engineering-yksikköön kuuluvassa tuotekehityksyksikössä Tampereen toimipisteessä. Toissijainen työskentelypaikka oli Hallin toimipiste, missä tehtiin komponenttien testaukset sekä komposiittiosien ja putkistojen valmistus. Koneistettavat komponentit teetettiin alihankkijoilla.

Tehtävänä oli suunnitella paineilmajärjestelmä koelennokin laskeutumisjärjestelmää varten. Koelennokki on valmistettu kehitettävien laitteistojen testaamiseen. Opinnäytetyön tuloksena syntyvän järjestelmän on tarkoitus tuottaa paineilmaa laskeutumisjärjestelmän tarpeisiin. Laskeutumisjärjestelmän tarkoitus on demonstroida laskeutumismahdollisuuksia laskuvarjon ja ilmatyynyjen avulla. Suunniteltavan järjestelmän tuli työntää laskuvarjo ulos kotelostaan ja täyttää ilmatyynyt tietyssä vaiheessa tiettyyn paineeseen. Opinnäytetyön järjestelmä koostuu painepulloista, paineenalentimista, venttiileistä, putkistoista ja muista komponenteista. Valmiin järjestelmän tuli olla helposti valmistettavissa, kevyt, toimintavarma ja kompakti.

Työssä tutustuin pneumatiikan teoriaan, etsin paino-optimoidut komponentit, suunnitelin tarvittavat koneistettavat komponentit ja järjestelmän ohjauslogiikan sekä kytkennät. Komponenteilta vaaditaan paljon. Tämä loi haasteita niiden etsimiseen, ja osa komponenteista jouduttiinkin teettämään täysin mittatilaustyönä koneistamalla.

Työn tuloksena syntyi vaatimukset täyttävä ja toimiva järjestelmä, jota tullaan tulevaisuudessa testaamaan lisää ja kehittämään edelleen.

---

Asiasanat: paineilmajärjestelmä, pneumatiikka, tuotekehitys, suunnittelu, venttiili

## **ABSTRACT**

Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical and Production Engineering  
Option of Aircraft Engineering

VIINIKAINEN, SANTERI:  
Designing pneumatic system to flying model

Bachelor's thesis 47 pages, appendices 5 pages  
May 2013

---

This thesis was made during winter 2012 and spring 2013 to a Finnish company Patria Aviation Ltd. The theoretical and designing part of the thesis was made at the Research and Development Unit of the Department of Engineering, in Tampere. In addition, the mechanical side of the thesis, for instance the testing of the components, was carried out at Halli works. The machined components were ordered from subcontractors.

The purpose of the thesis was to design a pneumatic system for the landing system of an experimental flying model. The flying model was made to test recovery systems which are under development. The purpose of the landing system is to demonstrate different possibilities to use a parachute and airbags in order to land safely. The main function of the pneumatic system is to produce compressed air for the landing system: to thrust the parachute out from its casing as well as to fill the airbags with compressed air at a certain phase to a certain pressure. The pneumatic system of this thesis consists of air reservoirs, regulators, valves, tubing and other components. The finished system was required to be easy to manufacture, as well as lightweight, reliable and compact.

In this thesis I had to familiarise myself with the theory of pneumatics, to find weight optimized components, design the machined components as well as to design the logic of the system and its connections. All the components had very strict requirements which caused challenges to look for the most optimal ones. Some components had so unique threads and forms that they had to be manufactured by machining.

The result of the thesis was a functional system which fulfilled all the major requirements. In near future the system will see more tests and perhaps some further development.

---

Key words: pneumatic system, research & development, designing, valve

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Opinnäytetyön tausta .....	7
1.2	Opinnäytetyön tarkoitus.....	7
1.3	Opinnäytetyön tavoite.....	7
1.4	Opinnäytetyön rajausta .....	8
2	PATRIA OYJ .....	9
2.1	Patria Aviation .....	10
2.2	Engineering ja tuotekehitysyksikkö.....	10
3	PNEUMATIIKAN TEORIAA .....	11
3.1	Paineesta, ideaalikaasusta ja ilman fysikaalisista ominaisuuksista.....	11
3.2	Massavirrasta ja tilavuusvirrasta.....	12
3.3	Virtaus venttiileissä.....	13
3.4	Virtaus putkessa .....	14
3.5	Virtaus aukosta .....	15
4	PAINEILMAJÄRJESTELMÄ .....	17
4.1	Lähtötiedot .....	17
4.2	Tavoitteiden asettaminen .....	17
5	VIRTAUSTARKASTELUT .....	19
5.1	Putkiston painehäviöt.....	19
5.2	Tyynyjen täyttymisnopeus .....	20
5.3	Paineilmasäiliön tilavuus .....	22
6	JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU .....	24
6.1	3D-mallintaminen .....	24
6.2	Ohjauslogiikan suunnittelu .....	25
7	KOMPONENTIT .....	26
7.1	Pullo .....	26
7.2	Adaptteri .....	27
7.3	Korkeapainejakotukki .....	28
7.4	Pullon kiinnitysrakenteet .....	30
7.5	Paineanturi .....	30
7.6	Venttiileistä yleisesti.....	30
7.6.1	Suuntaventtiilien etsiminen.....	31
7.6.2	Suuntaventtiilien valinta.....	32
7.7	Putkisto .....	35
7.8	Työsylinteri .....	36
7.9	Ensiöpaineenalennusventtiili .....	36

7.10 Toisiopaineenalennusventtiili .....	36
7.11 Liittimet .....	36
7.12 Komponenttien huollettavuus .....	37
8 JÄRJESTELMÄN OHJAUSLOGIIKKA .....	38
8.1 Normaalitila .....	38
8.2 Täyttö .....	38
8.3 Ylläpito .....	38
8.4 Pullojen täyttö .....	39
9 JÄRJESTELMÄN TESTAAMINEN.....	40
10 POHDINTA.....	41
LÄHTEET.....	42
LIITTEET .....	43
Liite 1. Korkeapainejakotukin piirustukset .....	43
Liite 2. Adapterin piirustukset.....	44
Liite 3. Kytkentälogiikka normaalitilassa.....	45
Liite 4. Kytkentälogiikka täyttötilassa.....	46
Liite 5. Kytkentälogiikka ylläpitotilassa .....	47

## LYHENTEET JA TERMIT

<b>Merkintä</b>	<b>SI-yksikkö</b>	<b>Selitys</b>
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	tiheys (kaasun)
$p$	Pa	paine
$T$	K, C°	lämpötila
$\eta_o$	$\text{Ns/m}^2$	dynaaminen viskositeetti
$\nu_o$	$\text{m}^2/\text{s}$	kinemaattinen viskositeetti
$c$	$\text{J/kgK}$	ominaislämpö
$v$	$\text{m/s}$	nopeus
$t$	s	aika
$m$	kg	massa
$q_m$	$\text{kg/s}$	massavirta
$q_v$	$\text{m}^3/\text{s}$	tilavuusvirta
$d$	mm	halkaisija
$R$	$\text{J/kgK}$	Kaasuvakio (kuiva ilma)
$\mu$	-	virtauskerroin 0,7
$\gamma$	-	adiabaattivakio 1,4 (ilmalle)

# 1 JOHDANTO

Jokainen lentolaite tarvitsee laskeutumisjärjestelmän. Lentokoneissa yleisin ratkaisu on pyörälliset laskutelineet, mutta muitakin mahdollisuuksia on olemassa. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella paineilmajärjestelmä, joka tuottaa paineilmaa lennokin laskeutumisjärjestelmän tarpeisiin. Laskeutuminen toteutetaan laskuvarjon ja ilmatyynyjen avulla.

## 1.1 Opinnäytetyön tausta

Työn tuloksena syntynyt paineilmajärjestelmä on osa kehityksessä olevaa tutkielmaa. Järjestelmän suunnittelu ei rajoittunut vain olemassa olevien komponenttien yhdistelemiseen. Työ sisältää myös koneistusosien, komponenttien kiinnittämiseen käytettävien korvakkeiden, komponenttien sijoittelun ja järjestelmän ohjauslogiikan suunnittelua. Koelennokin ahdas rakenne ja tiukat massarajoitukset loivat haasteita osien suunnitteluun ja sijoittamiseen.

## 1.2 Opinnäytetyön tarkoitus

Tarkoituksena oli suunnitella valmis, toimiva paineilmajärjestelmä koelennokkiin. Järjestelmän suunnittelussa tuli ottaa huomioon komponenttien saatavuus, massa, asennettavuus, huollettavuus, käytettävyys, toimintavarmuus ja kustannustehokkuus. Opinnäytetyön järjestelmä on osa suurempaa projektia, ja sen toimintavarmuus on välttämätön koelennokin turvallisen laskeutumisen takaamiseksi.

## 1.3 Opinnäytetyön tavoite

Tärkein tavoite oli saada valmis ja toimiva järjestelmä koelennokin tarpeisiin. Järjestelmän suunnittelu koostui useasta eri osa-alueesta, kuten logiikan, koneistusosien, putki-liitoksien ja komponenttihankintojen suunnittelusta. Järjestelmän ohjauslogiikan tuli olla yksinkertainen ja mahdollisimman kevyt. Komponenttien painon ja lukumäärän tuli olla myös alhainen, mikä toi haasteita opinnäytetyön aikana.

Tarvittavien koneistusosien suunnittelussa on otettava huomioon, että osat ovat helposti koneistettavissa, mutta samalla kevyitä ja mahdollisimman edullisia valmistaa. Tämä asettaa erityisvaatimuksia osien muotoilulle ja materiaalivalinnoille.

Alihankkijoilta hankittavien komponenttien, kuten venttiilien ja paineenalentimien, tulee olla helposti ja nopeasti saatavilla. Komponenttivalintoja vaikeuttavat niiden vaatimukset massan ja koon suhteen. Komponenttien pitää olla mahdollisimman kevyitä ja kompakteja, mutta samalla kestäviä ja edullisia.

#### **1.4 Opinnäytetyön rajaus**

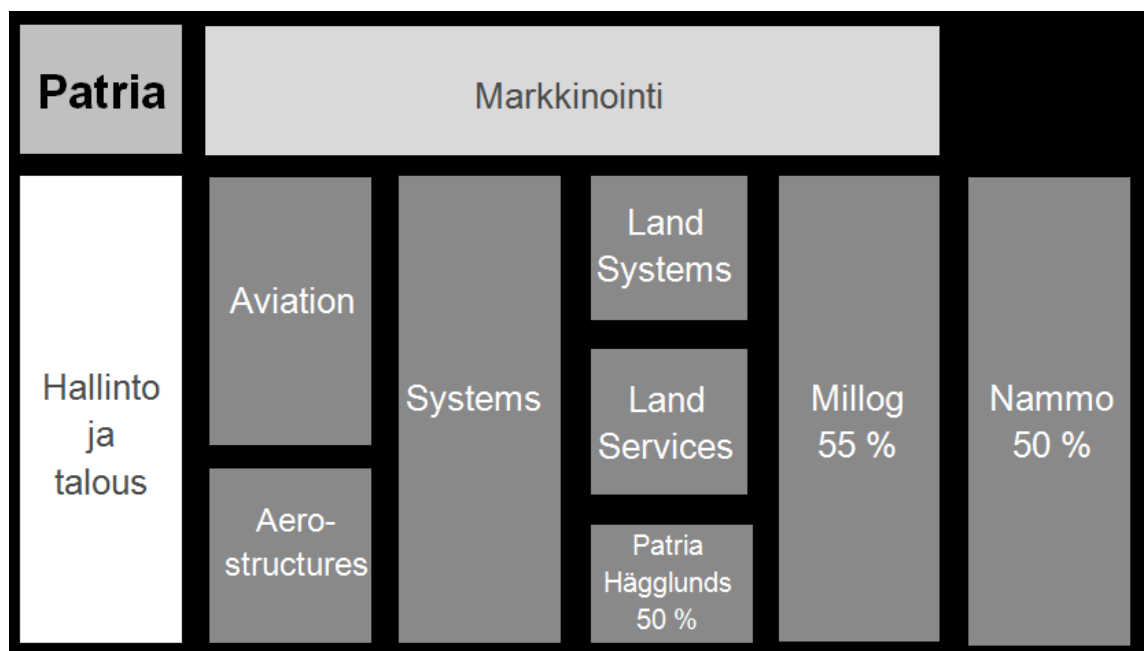
Koelennokki koostuu useasta eri järjestelmästä. Opinnäytetyö rajattiin yhdessä työn tilaajan kanssa käsittelemään ainoastaan koelennokin paineilmajärjestelmää. Työhön kuuluvat paineilmakomponenttien valinta, virtaustarkistukset, komponenttien sijoittelut, järjestelmän alustavat testaukset sekä kytkentöjen, koneistusosien ja logiikan suunnittelu. Paineilmajärjestelmä on osa laskeutumisjärjestelmää, mutta tämä opinnäytetyö on rajattu käsittelemään vain paineilman tuottamista laskeutumisjärjestelmän tarpeisiin. Työ ei käsittele laskuvarjoa, sen koteloitinta eikä laskeutumistyynyjä.



## 2 PATRIA OYJ

Patria Oyj on suomalainen puolustus- ja ilmailuteollisuuskonserni, jonka tuotteisiin kuuluvat pääasiassa panssaroidut pyöräajoneuvot, kranaatinheitinjärjestelmät, ampumatarvikkeet, lentokoneet ja helikopterit sekä näiden tuotteiden elinkaaren tukipalvelut. Konsernin toimintaan kuuluvat myös lentäjäkoulutus ja teknologiaratkaisujen tuottaminen. Yritys valmistaa tuotteita niin kansainvälisille markkinoille kuin strategiselle kumppanille, Suomen puolustusvoimille.

Patria perustettiin vuonna 1997 yhdistämällä suomalaisia puolustus- ja ilmailuteollisuuden yrityksiä, ja sen juuret ulottuvat aina vuoteen 1921 saakka. Nykyorganisaatio koostuu kahdeksasta tulosyksiköstä, jotka näkyvät kuviossa 1.



Kuvio 1 Konsernin rakenne

Patrian omistajat ovat Suomen valtio (73,2 %) ja European Aeronautic Defence and Space Company (EADS) (26,8 %). Vuonna 2011 Patrian liikevaihto oli 618,4 miljoonaa euroa, ja vuoden lopussa yhtiön palveluksessa oli 3 430 henkilöä.

## **2.1 Patria Aviation**

Patria Aviation liiketoiminta keskittyy lentokoneiden ja helikoptereiden elinkaaren tukipalveluihin sekä lentäjäkoulutukseen. Elinkaaren tukipalveluihin kuuluvat rungon, moottorin ja laitteiden huolto-, korjaus-, ja modifiointipalvelut pääasiassa viranomais- ja sotilasasiakkaille Pohjois-Euroopassa. Aviationin toimipaikat Suomessa ovat Jämsän Halli, Nokian Linnavuori, Tampere, Tikkakoski, Kauhava ja Helsinki-Malmin lentoasema. Liiketoiminnalla on toimipaikkoja myös Ruotsissa Tukholman Arlandassa sekä Linköpingissä.

## **2.2 Engineering ja tuotekehitysyksikkö**

Engineering-yksikkö tarjoaa suunnittelutyötä tuotannon tarpeisiin. Suurin osa tehtävistä töistä on modifikaatioiden sekä rakennekorjausten suunnittelua. Yksikkö koostuu lujuuslaskijoista, asiantuntijoista ja suunnittelijoista.

Tuotekehitysyksikkö on osa Engineeringiä, ja sen tehtävänä on kehittää uusia lentoteknisiä ratkaisuja asiakkaiden tarpeisiin.

### 3 PNEUMATIIKAN TEORIAA

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti paineilmateoriaa, joka keskittyy lähinnä ylipainetekniikkaan. Rajaan alipainetekniikan teorian kokonaan pois, koska opinnäytetyön järjestelmä perustuu pelkkään ylipainetekniikkaan. Käsittelen myös lyhyesti kaasun virtaukseen liittyvää teoriaa.

#### 3.1 Paineesta, ideaalikaasusta ja ilman fysikaalisista ominaisuuksista

Paine ilmaisee tiettyyn pinta-alaan kohdistuvaa voimaa jaettuna tällä pinta-alalla. Paineen SI-yksikkö on Pa (Pascal) =  $\text{N/m}^2$ . Paineen yksikkönä Pascal on kuitenkin hyvin pieni, joten yleensä käytetään sen kerrannaisia, kuten kPa ja MPa. Luultavasti yleisin käytössä oleva paineen yksikkö on bar, joka on Pascalin kerrannainen, eli  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ . (1, s. 20.)

Ilmakehän aiheuttaman paineen normiarvo on 1,013 bar. Paineen ylittäessä ilmakehän paineen puhutaan ylipaineesta. Normaalisti kansankielessä paineella tarkoitetaan juuri ylipainetta. Paineen laskiessa alle ilmakehän paineen on kyse alipaineesta. Paine voi laskea tyhjiöön saakka, jolloin absoluuttinen paine on 0 bar. Lähelle tyhjiötä olevaa alipainetta käytetään teollisuudessa joihinkin harvoihin kohteisiin, kuten eräisiin hitsausmenetelmiin. (1, s. 20.)

Ilman normiarvoiksi on valittu seuraavat arvot:

paine	$P_o = 1,013 \text{ bar}$
lämpötila	$T_o = 293 \text{ K} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
tiheys	$\rho_o = 1,2 \text{ kg/m}^3$
dynaaminen viskositeetti	$\eta_o = 18,14 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$
kinemaattinen viskositeetti	$\nu_o = 15,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
ominaislämpö vakioaineessa	$c_p = 1005 \text{ J/kgK}$
ominaislämpö vakiotilavuudessa	$c_v = 718 \text{ J/kgK}$
äänennopeus	$v_k = 342 \text{ m/s}$

Fysikaaliset ominaisuudet riippuvat paljon toisistaan. Yhden arvon muuttuminen voi vaikuttaa useaan muuhunkin arvoon, kuten lämpötilan muutokset vaikuttavat painee-

seen ja tiheys on riippuvainen paineesta. Arvojen riippuvuutta voidaan tarkastella ideaalikaasun käyttäytymistä kuvaavista yhtälöistä. (1, s. 20.)

Avogadron lain mukaan samassa lämpötilassa ja paineessa ideaalikaasut sisältävät yhtä suurissa tilavuuksissa saman lukumäärän molekyylejä.

Ideaalikaasu on kuviteltu mallikaasu, jonka tilamuutoksia kuvaa tilayhtälö (3.1).

$$p \cdot V = n R T \quad (3.1)$$

$$p = \text{paine, } N/m^2$$

$$V = \text{tilavuus, } m^3$$

$$n = \text{kaasumoolien lukumäärä}$$

$$R = \text{kaasuvakio } 8,318 \text{ J/(mol K) (1, s. 21.)}$$

### 3.2 Massavirrasta ja tilavuusvirrasta

Virtaustien, kuten venttiilin tai putken, läpi kulkeva kaasumäärä voidaan ilmoittaa usealla eri tavalla, esimerkiksi massa- ja tilavuusvirralla. Kaasua läpäisemättömässä putkessa tapahtuvassa virtauksessa on jokaisesta poikkileikkauksesta läpi menevä massa aikayksikköä kohden yhtä suuri, eli massavirta on vakio. (1, s. 24.)

$$q_m = dm / dt = \text{vakio} \quad (3.2)$$

$$m = \text{massa, kg}$$

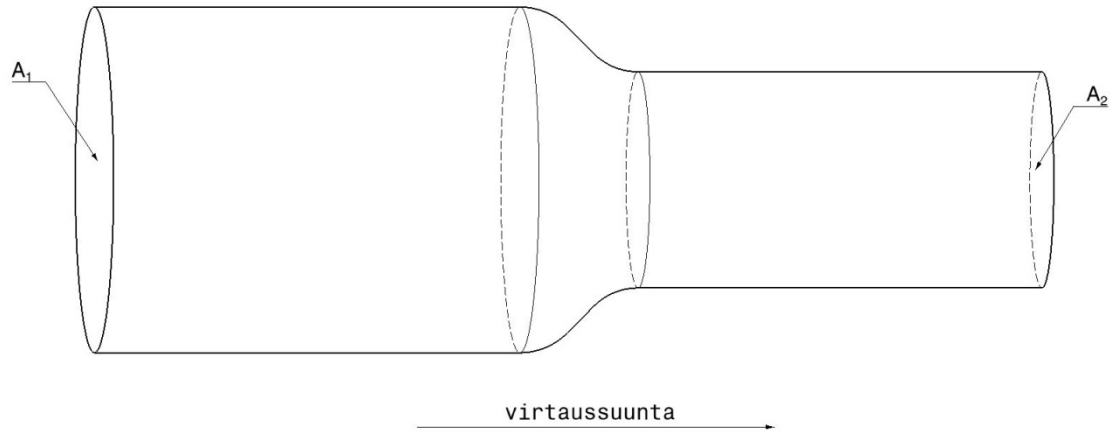
$$q_m = \text{massavirta, kg/s}$$

$$t = \text{aika, s}$$

Kaasujen tiheys ei ole vakio, joten pneumatiikassa on hankala käsitellä paineenalaista tilavuusvirtaa. Kaasujen tiheyteen vaikuttaa paine ja lämpötila. Tästä syystä virtauksia on helpompi käsitellä massavirtauksina, jolloin lämpötilan ja paineen muutokset eivät vaikuta virtauksen määrään. Massavirtaa käytetään yleensä teoreettisissa tarkasteluissa ja tilavuusvirtaa käytännön mitoituksessa. Paineenalainen tilavuusvirta redusoidaan yleensä normaali-ilmakehän paineeseen, jolloin sen arvot ovat vertailukelpoisia keske-

nään. Tilavuusvirran yksikkönä käytetään yleisesti kuutiometriä sekunnissa ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) normaalipaineista ilmaa ja massavirran kilogrammaa sekunnissa ( $\text{kg}/\text{s}$ ). (1, s. 25.)

Kuvassa 1 on havainnollistettu virtauskanava, jonka poikkipinta-ala muuttuu.

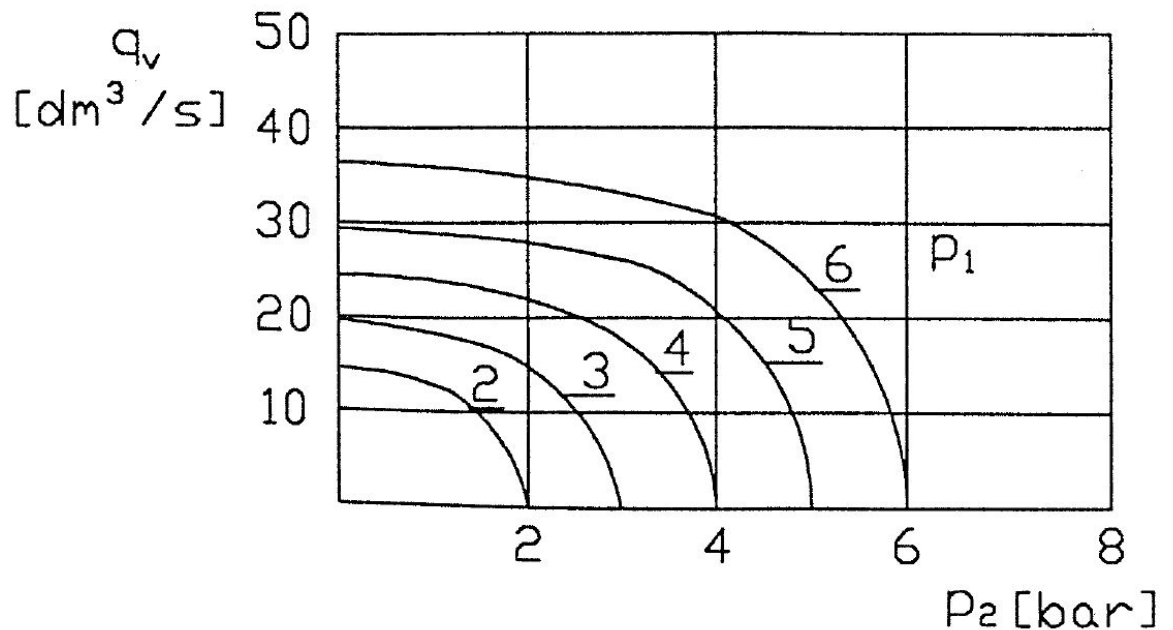


Kuva 1 Virtauskanava

### 3.3 Virtaus venttiileissä

Yleisesti paineilmaventtiilien läpivirtaus riippuu venttiilin virtauskanavan poikkipinta-alasta, kanavien muotoilusta ja venttiilin liitäntöjen välisestä paine-erosta. Virtaus voi ylittää äänennopeuden, jolloin se on ylikriittistä. Alle äänennopeuden kulkeva virtaus on alikriittistä.

Venttiilivalmistajat voivat ilmoittaa venttiilin virtaavuuden usealla eri tavalla. Yksi suosituimmista tavoista on ilmoittaa tilavuusvirta redusoituna ilmakehän paineeseen. Tilavuusvirran määrä riippuu venttiiliin kohdistetusta paine-erosta, minkä takia valmistajat käyttävät kuvion 2 kaltaista kaaviota virtaavuuden ilmoittamiseen. Kuvion 2 mukaisessa kaaviossa havainnollistetaan paine-eron vaikutusta tilavuusvirtaan (1, s. 28.)



Kuvio 2 Paine-eron vaikutus virtaukseen

### 3.4 Virtaus putkessa

Kaasun virtaus putkessa on laminaarista, turbulenttista tai niiden yhdistelmää. Virtaavan kaasun nopeuden kasvaessa virtaus muuttuu vähitellen laminaarisesta turbulenttiseksi. Virtausnopeus kasvaa tarkisteltavien pisteiden paine-eron kasvaessa. Pneumaattisissa järjestelmissä virtaukset ovat lähes aina turbulenttisia, mikä johtuu korkeista virtausnopeuksista. Laminaariseen virtaukseen pyritään vain poikkeustapauksissa, kuten mittavälineissä. Virtaus saadaan pysymään laminaarisena pienissä ja pitkissä putkissa vain alhaisilla virtausnopeuksilla. Virtauksen luonne voidaan selvittää laskemalla virtaukselle Reynoldsin luku. (1, s. 33.)

Laminaarisessa virtauksessa menetetään vähemmän energiaa kitkan voittamiseen kuin turbulenttisessa virtauksessa. Tästä syystä turbulenttisen virtauksen painehäviö on myös suurempi. Turbulenttinen virtaus putkessa on poukkoilevaa, kun taas laminaarisessa se on tasaista. Reynoldsin luvun ollessa alle 2000 virtaus on lähes aina laminaarista, ja kun Reynoldsin luku on suurempi kuin 3000, virtaus muuttuu vähitellen turbulenttiseksi. Reynoldsin luvun ollessa 2000:n ja 3000:n välillä virtauksessa esiintyy molempia lajeja. Moni asia vaikuttaa virtauksen luonteen muuttumiseen, kuten pinnan karheus ja virtaavan kaasun viskositeetti. Reynoldsin luku määritellään kaavalla (3.3). (3, s. 236.)

$$R_e = \rho v d / \eta \quad (3.3)$$

$R_e = \text{Reynoldsin luku}$

$\rho = \text{aineen tiheys}$

$v = \text{virtausnopeus}$

$\eta = \text{viskositeetti}$

$d = \text{putken halkaisija}$

Bernoulin lain (3.4) mukaan suljetun putken kokonaisenergia on vakio. Kokonaisenergia koostuu staattisen paineen aiheuttamasta potentiaalienergiasta ja dynaamisen paineen aiheuttamasta kineettisestä energiasta. Tästä syystä potentiaalienergian nousua seuraa staattisen paineen kasvaminen ja virtausnopeuden hidastuminen eli kineettisen energian laskeminen. Bernoulin laki pätee vain häviöttömälle virtaukselle, jolloin kitkan vaikutusta ja virtauksen pyörteisyyttä ei oteta huomioon. (3, s. 232.)

$$p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{vakio} \quad (3.4)$$

$p = \text{virtaavan aineen paine}$

$\rho = \text{aineen tiheys (vakio)}$

$\rho g h = \text{hydrostaattinen paine}$

$v = \text{virtausnopeus}$

### 3.5 Virtaus aukosta

Kaasun ulosvirtaus aukosta voi olla ali- tai ylikriittistä. Toisin sanoen kaasu etenee alle äänennopeudella tai yli äänennopeudella. Virtauksen laatua voidaan arvioida kriittisen painesuhteen avulla. Virtaus muuttuu alikriittisestä ylikriittiseksi, kun painesuhde saa arvon alle 0,53. Kriittinen painesuhde määritellään adiabaattivakion (3.5) avulla.

(1, s. 27.)

$$b_{kr} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 0,53 \quad (3.5)$$

$\gamma = \text{adiabaattivakio} = 1,4 \text{ (ilmalle)}$

*Alikriittinen:*  $\frac{p_2}{p_1} \geq b_{kr}$

*Ylikriittinen:*  $\frac{p_2}{p_1} < b_{kr}$  (1, s. 26)

Alikriittisen alueella aukosta purkautuvan massavirran suuruus riippuu painesuhteesta ja purkautumisaukon pinta-alasta. Kaavassa (3.6) käytetään purkautumiskerrointa  $\mu$ , jonka on kokeellisesti todettu saavan arvoja 0,5:n ja 1:n väliltä. Pneumaattisten järjestelmien suunnittelussa käytetään kuitenkin yleensä arvoja 0,6:n ja 0,8:n väliltä. Purkautumiskertoimen arvon suuruuteen vaikuttaa eniten purkausaukon muoto. (1, s. 26; 3, s. 234.)

$$q_m = \mu A \sqrt{2\rho p_1 \frac{\gamma}{(\gamma+1)} \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (3.6)$$

$q_m = \text{massavirta}$

$\mu = \text{purkautumiskerroin } 0,6 \dots 0,8$

$A = \text{virtauspoikkipinta-ala}$

$p_2 = \text{vastapaine}$

$p_1 = \text{korkeampi paine}$

Ylikriittisellä alueella massavirta on riippumaton vastapaineesta  $p_2$ , eli sen suuruuteen vaikuttavat vain korkeampi paine  $p_1$  ja virtaustien poikkipinta-ala  $A$  (1, s. 26).

$$q_m = \mu A \sqrt{2\rho p_1 \frac{\gamma}{(\gamma+1)} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{2}{\gamma-1}}} \quad (3.7)$$



## 4 PAINEILMAJÄRJESTELMÄ

Useimmissa lentolaiteissa on paineilmajärjestelmiä, joilla ohjataan erilaisia toimintoja tai paineistuksia. Ilmailun tunnetuin paineilman käyttökohde on luultavasti ohjaamon ja matkustamon paineistus, jonka avulla koneen sisäilma pysyy hengitettävällä tasolla. Paineilmaa voidaan käyttää myös kriittisten toimilaitteiden varavoimana, koska paineakut voidaan rakentaa sähköstä riippumattomiksi.

Jokainen lentolaite tarvitsee jonkinlaisen laskeutumisyjärjestelmän. Opinnäytetyön paineilmajärjestelmän tehtävänä on tuottaa paineilmaa laskeutumisyjärjestelmälle, jonka tarkoitus on mahdollistaa koelennokin turvallinen laskeutuminen.

### 4.1 Lähtötiedot

Työn lähtötietoina sain tietoja aiemmista paineilmajärjestelmän prototyypeistä. Aiempi prototyyppi oli valmistettu painavista ja tilaa vievistä komponenteista. Yksi tärkeimmistä lähtötiedoista oli aiemmalla järjestelmällä saavutettu tyynyjen täyttymisnopeus: nämä pohjatiedot helpottivat oikean suurusluokan venttiilien etsimistä.

Tyynyt ovat tilavuudeltaan noin 60 litraa, ja niitä on yhteensä kolme kappaletta. Tyynyt tulisi täyttää kahdessa vaiheessa. Ensin ne pitää saada nopeasti täyteen, ja sen jälkeen on ylläpidettävä noin 0,3 bar:n ylipainetta. Tyynyjen tulisi täytyä enintään viidessä sekunnissa.

Toisena tärkeänä lähtötietona oli koelennokissa paineilmajärjestelmälle varattu tila. Käytettävissä oleva tila on hankalan muotoinen, joten komponenttien tulisi olla muodoiltaan sellaisia, että ne käyttäisivät tilan mahdollisimman tehokkaasti.

### 4.2 Tavoitteiden asettaminen

Työn tavoitteeksi asetettiin kunnianhimoisesti valmis, toimiva järjestelmä, jonka toiminnallisuus vastaisi vähintään aikaisemmin suunniteltua ja testattua prototyyppiä. Tavoitteena oli toiminnallisuuksien säilyttämisen lisäksi suunnitella järjestelmä, joka on

luotettava, helposti valmistettava ja huollettava, yksinkertainen, kompakti sekä tuotteistettu. Komponenttien tuli olla myös suhteellisen helposti saatavissa.

## 5 VIRTAUSTARKASTELOT

### 5.1 Putkiston painehäviöt

Pneumatiikkaputkiston tulisi olla mitoitettu siten, että paineilmalähteen ja toimilaitteen välillä painehäviö olisi enintään 1 bar:n luokkaa. Painehäviöihin vaikuttavat käytettävän putkiston sisähalkaisija, liittimet ja venttiilit. Painehäviö suorassa putkessa voidaan laskea kaavalla (5.1). Alla olevissa laskuissa oletetaan, että ympäristön lämpötila on sama kuin virtaavan kaasun lämpötila. Laskuissa on käytetty valitun Parker PVL-C10 -suuntaventtiilin virtausarvoja. Laskettu painehäviö on venttiilin ja ilmatyönnyn välisessä 1,5 m:n pituisessa putkessa tapahtuva häviö. (2, s. 90.)

$$\Delta p = \frac{1,6 \cdot 10^{12} \cdot q_v^{1,85} \cdot l}{d^5 \cdot p} \quad (5.1)$$

$\Delta p =$  painehäviö, *kPa*

$q_v =$  tilavuusvirta, *m<sup>3</sup>/s*

$d =$  putken sisähalkaisija, *mm*

$l =$  putken pituus, *m*

$p =$  absoluuttinen työpaine, *kPa*

*lähtötiedot*

$q_v = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$

$d = 10 \text{ mm}$

$l = 1,5 \text{ m}$

$p = 1100, \text{ kPa}$

$$\Delta p = \frac{1,6 \cdot 10^{12} \cdot (0,03)^{1,85} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,5 \text{ m}}{10^5 \text{ mm} \cdot 1100 \text{ kPa}} = 33,22 \text{ kPa}$$

Painehäviö on 33,22 kPa eli noin 0,33 bar. Tulos on sallittujen rajojen sisällä. Valittu putken 10 mm:n halkaisija on sopiva käyttötarkoitusta varten.

## 5.2 Tyynyjen täyttymisnopeus

Laskeutumistyyntyt täytetään mahdollisimman nopeasti 10 bar:n paineisesta linjasta. Linja on nylonputkea, joka on sisähalkaisijaltaan 10 mm. Yhden tyynyn tilavuus on noin 60 litraa, ja tyynyjä on yhteensä kolme kappaletta. Niiden suurin täyttymisnopeus voidaan laskea seuraavalla tavalla:

- Määritellään virtauksen luonne sekä virtaavan kaasun tiheys.
- Virtaavan kaasun massavirran avulla määritellään putken päästä purkautuva tilavuusvirta redusoituna ilmakehän paineeseen.
- Ratkaistaan, rajoittaako virtaustien halkaisija tyynyjen täyttymisnopeutta.

Laskussa ei oteta huomioon tyynyn sisälle muodostuvaa ylipainetta eikä venttiilien tai putkistojen paine- ja virtaushäviöitä. Tyynyjä ei täytetä aivan täyteen, jolloin sisälle muodostuvan ylipaineen vastus on merkityksetön. Laskut ovat redusoitu ilmakehän paineeseen.

*lähtötiedot*

$$p_1 = 1 \text{ MPa}$$

$$p_2 = 0,1 \text{ MPa (ilmakehä)}$$

$$d = 0,01 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$n = 1,4 \text{ (ilmalle)}$$

$$\mu = 0,7 \text{ (virtauskerroin)}$$

Määritellään virtauksen luonne, eli todetaan, onko virtaus ylikriittistä vai alikriittistä. Virtaus muuttuu alikriittisestä ylikriittiseksi, kun saavutetaan kriittinen painesuhde  $b = 0,53$ .

$$b = \frac{0,1 \text{ MPa}}{1,1 \text{ MPa}} = 0,09 \tag{5.2}$$

Virtaus on siis ylikriittistä, koska  $b < 0,53$ .

Lasketaan paineilman tiheys paineelle  $p_1 = 1.1 \text{ MPa (abs)}$ .

$$p_1 = 1,1 \text{ MPa}$$

$$R_{(\text{kuiva ilma})} = 287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$T = 293 \text{ K}$$

$$\rho = \frac{p_1}{RT} = \frac{1,1 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}}{287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 293 \text{ K}} = 13,08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (5.3)$$

Kaavan (5.2) mukaan virtaus on ylikriittistä, jolloin virtaustarkisteluun voidaan käyttää kaavaa (3.7). Valitaan virtauskertoimeksi  $\mu = 0,7$  ja määritetään massavirta  $q_m$ .

$$q_m = \mu A \sqrt{2 \rho p_1 \frac{\gamma}{(\gamma+1)} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}}}$$

$$q_m = 0,7 \cdot 0,005^2 \pi \sqrt{2 \cdot 13,08 \cdot 1,1 \cdot 10^6 \frac{1,4}{(1,4+1)} \left( \frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{2}{1,4-1}}} = 0,142 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Lasketaan tilavuusvirta redusoituna normaali-ilmakehän paineeseen lämpötilan ollessa  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$q_N = \frac{q_m}{\rho_0} = \frac{0,142 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,11704 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Saavutettavissa oleva suurin tilavuusvirta on noin  $120 \text{ l/s}$  ja tyynjen yhteistilavuus on noin  $180 \text{ l}$ . Teoriassa täysin häviöttömässä tilanteessa tyynyt voivat täytyä  $1,5$  sekunnissa. Virtausta rajoittavat kuitenkin tyynyille menevien putkien painehäviöt ja venttiileistä muodostuvat häviöt.

Järjestelmään valitun yksittäisen venttiilin tilavuusvirta on maksimissaan  $30 \text{ l/s}$ . Käytettäessä kolmea venttiiliä yhtäaikaaisesti suurin tilavuusvirta on  $90 \text{ l/s}$ . Koska  $10 \text{ mm:n}$  putken suurin tilavuusvirta  $10 \text{ bar:n}$  paineella on noin  $120 \text{ l/s}$ , se riittää tuottamaan tarpeeksi virtausta kaikille kolmelle venttiilille yhtä aikaa. Valituilla venttiileillä on mahdollisuus päästä noin  $2 \text{ s:n}$  täyttöaikaan. Tyynyille tavoitteeksi asetettu  $5 \text{ s:n}$  täyttymisnopeus saavutetaan valituilla komponenteilla ongelmitta.

### 5.3 Paineilmasäiliön tilavuus

Järjestelmässä on kaksi erillistä paineilmasäiliötä, joiden yhteistilavuus on 2,4 l ja käyttöpaine on 300 bar. Säiliöistä pitää riittää paineilmaa tyynyjen täyttämiseen ja ylläpito-paineen ylläpitämiseen. Järjestelmän komponentit, kuten liittimet ja ilmatyyny, eivät välttämättä ole täysin ilmatiiviitä. Varman toiminnan takaamiseksi säiliöissä tulee olla enemmän ilmaa kuin järjestelmä teoriassa tarvitsee.

Painepullot täytetään suuremmasta säiliöstä, jonka paine on 232 bar. Täytössä käytetään tehostinta, jonka avulla pullojen paine saadaan nostettua 300 bar:n suuruiseen paineeseen.

Seuraavissa laskuissa tarkastellaan säiliöiden paineenalaisen ilman riittävyttä järjestelmän ylläpitämiseen. Laskuissa selvitetään säiliöiden tilavuus redusoituna ilmakehän paineeseen. Laskuissa selvitetään myös, riittäisikö paineilmapullojen tilavuus jo alhaisemmalla 200 bar:n paineella ylläpitämään järjestelmää.

Laskujen tilamuutoksien oletetaan olevan isotermisiä ja virtaavien kaasujen oletetaan olevan ideaalikaasuja. Isotermisessä muutoksessa paineen muutos vaikuttaa käänteisesti tilavuuteen lämpötilan pysyessä vakiona. Laskuissa käytetään isotermisen muutoksen tilayhtälöä (5.4). (3, s. 239.)

*lähtötiedot*

$$p_1 = 31 \text{ MPa (pullon paine abs)}$$

$$p_2 = 0,1 \text{ MPa (ilmakehä)}$$

$$V_1 = 2,4 \text{ l (säiliöt)}$$

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \tag{5.4}$$

$$V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{p_2}$$

$$V_2 = \frac{31 \text{ MPa} \cdot 2,4 \text{ l}}{0,1 \text{ MPa}} = 744 \text{ l}$$

Paineistettuna 300 bar:n paineeseen järjestelmä tuottaa ilmakehään redusoituna 744 l:n tilavuuden. Kapasiteetti riittää hyvin täyttämään tyynyt ja ylläpitämään painetta tyynyjen yhteistilavuuden ollessa noin 180 l. Lasketaan seuraavaksi järjestelmän ilmakehään redusoitu tilavuus, kun se on paineistettu 200 bar:n paineeseen.

$$p_1 = 21 \text{ MPa (pullon paine abs)}$$

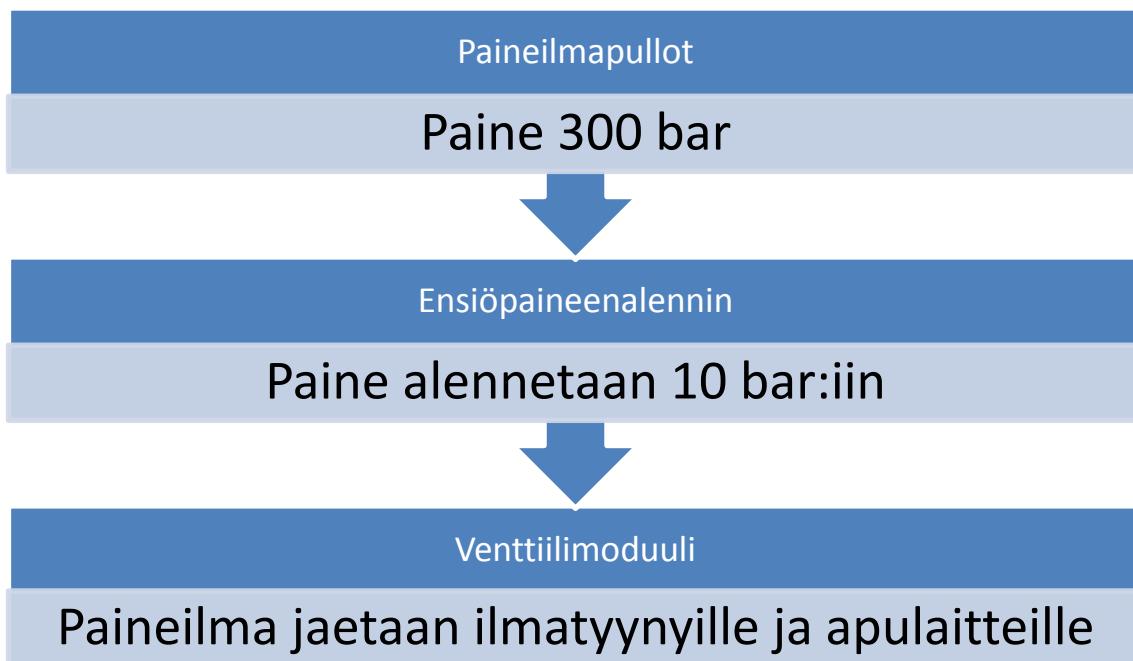
$$p_2 = 0,1 \text{ MPa (ilmakehä)}$$

$$V_1 = 2,4 \text{ l (säiliöt)}$$

$$V_2 = \frac{21 \text{ MPa} \cdot 2,4 \text{ l}}{0,1 \text{ MPa}} = 504 \text{ l}$$

200 bar:iin paineistettu järjestelmä tuottaa ilmakehään redusoituna 504 l:n tilavuuden. Kapasiteetti riittäisi hyvin täyttämään tyynyt ja ylläpitämään niissä painetta jo alhaisemmallakin täyttöpaineella.

## 6 JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU



Kaavio 1 Paineilmajärjestelmän toimintaperiaate

### 6.1 3D-mallintaminen

Kolmiulotteinen mallinnus mahdollistaa mallien nopean suunnittelun ja muokkaamisen sekä kappaleiden visuaalisen tarkastelun jo ennen prototyyppien valmistamista. Malleista voidaan tarvittaessa tehdä hyvinkin monimutkaisia ja yksityiskohtaisia. Oikeastaan ainoa mallien ja kokoonpanojen yksityiskohtaisuutta rajoittava tekijä on suunnitteluun käytettävän tietokoneen teho. Kolmiulotteisen mallintamisen suurimmat edut ovat suurien osakokonaisuuksien suunnittelut, lujuusanalyysit, virtaussimulaatiot, mekaaniset simulaatiot ja osien toisiinsa sopivuustarkastelut. Nykyiset tietokoneavusteiset valmistusmenetelmät voivat hyödyntää suoraan kolmiulotteisia malleja. Tämä pätee muun muassa NC-koneistukseen ja 3D-tulostamiseen.

Eurooppalaisen ilmailuteollisuuden käytetyin tietokoneavusteinen mallinnusohjelma on ranskalaisen Dassault Systemsin CATIA (*Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée*). Ohjelmisto on suunniteltu alun perin juuri lentokoneiteollisuutta varten. Opinnäytetyön järjestelmä mallinnettiin kokonaisuudessaan CATIA-ohjelmistolla, jolla suunnittelin yksittäiset komponentit, kokoonpanot, asennuskuvat ja piirustukset.

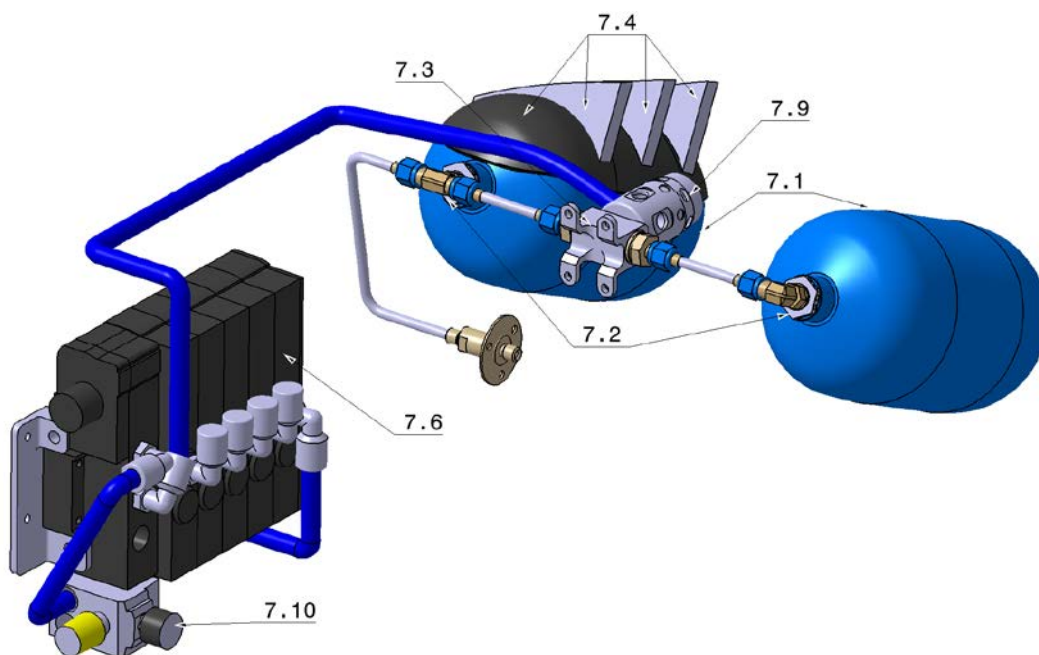


## 6.2 Ohjauslogiikan suunnittelu

Logiikkasuunnittelu tehtiin Microsoft Visio -ohjelmistolla. Koska ohjelma oli minulle uusi, käyttöliittymän opettelu vei aikansa. Pienen totuttelun jälkeen ohjelmaa oli yhtä helppo käyttää kuin mitä tahansa 2D-mallinnusohjelmaa. Ohjelmassa oli käytettävissä suoraan pneumatiikkasuunnittelussa tarvittavat piirrosmerkit, mikä helpotti kytkentöjen vaihtamista ja kokeilemista. Logiikkasuunnittelu oli kohtalaisen aikaa vievää, koska siitä oli kaikista vähiten kokemusta.

## 7 KOMPONENTIT

Alla olevassa kuvassa 2 on paineilmajärjestelmän kokoonpanokuva. Komponenttien numerointi on lisätty helpottamaan kuvan ja tekstin yhdistämistä. Kuvasta on jätetty joitain komponentteja pois kuvan selkeyttämiseksi. Kuvasta puuttuvat muun muassa oikeanpuoleisen painepullon kiinnitysrakenteet, ilmatyynyille menevät putkistot ja luukkuja avaavat työsylinterit.



Kuva 2 Paineilmajärjestelmän kokoonpanokuva

### 7.1 Pullo

Painepullo on järjestelmän suurin ja raskain yksittäinen komponentti. Sen painon optimointi on erityisen tärkeää, ja se vaikuttaa voimakkaasti myös koko järjestelmän painoon. Painepullolle on paljon erityisvaatimuksia. Sen tulisi olla kevyt mutta samalla kestää erittäin korkeaa painetta. Korkealla pullopaineella saadaan maksimaalinen määrä ilmaa käyttöön pullon pienestä koosta huolimatta.

Paineilmapulloiksi valitsin kuvassa 3 olevan Safer Cylindersin 1,2-litraiset hiilikuitu-kevlar-pullot. Pullojen maksimityöpaine on 300 bar, ja niiden massa on 0,69 kg/kpl. Pullot ovat polyuretaanilla pinnoitettuja, jolloin pullojen tahmea pinta parantaa kiinnitysominaisuuksia.



Kuva 3 (Safer Cylinders 2012)

Vertailukohtana komposiittipullon teknisiin ominaisuuksiin voidaan pitää esimerkiksi alumiinista pulloa. Lähes vastaavilla pneumaattisilla ominaisuuksilla oleva sukelluskäyttöön tarkoitettu alumiinipullo on kookkaampi ja huomattavasti painavampi kuin komposiittipullo. Luxferin valmistama 1,5-litrainen alumiinipullo painaa 2,6 kg, ja sen painekesto on 232 bar. Teräksiset pulloet ovat vielä noin 40 % painavampia kuin alumiiniset. (4.)

## 7.2 Adapteri

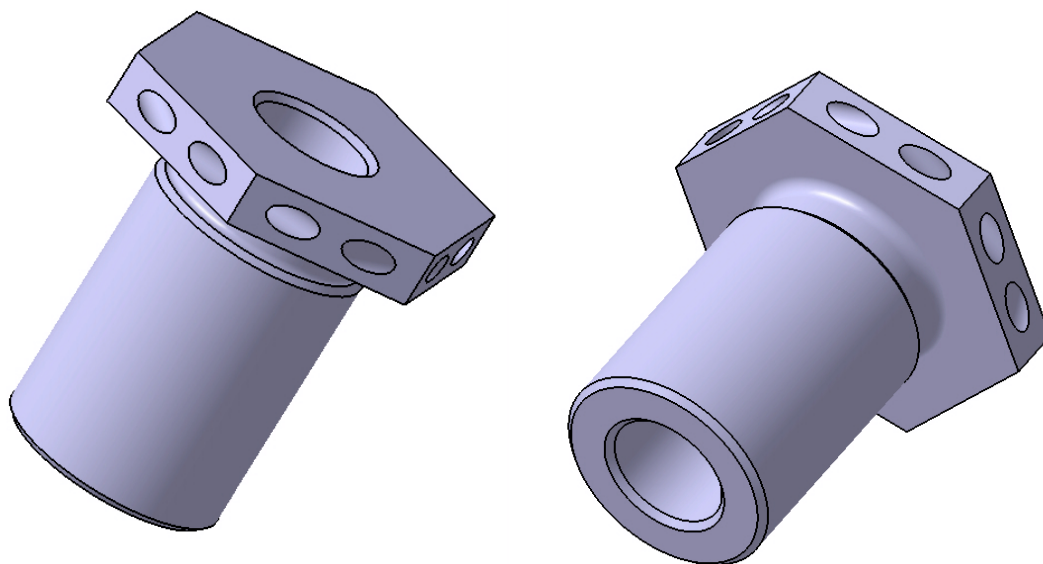
Painepulloihin suoraan yhteensopivia liittimiä ei löytynyt miltään valmistajalta. Pulloihin oli siis suunniteltava koneistettavat adapterit, joissa on pulloon sopiva ulkokierre ja perusliittimeen sopiva sisäkierre. Adapterien materiaaliksi valittiin ruostumaton teräs

AISI 321, jonka lujuusominaisuuksien ja valmistettavuuden suhde oli sopivin käyttötarkoitusta varten.

Adapteriin suunniteltiin myös varmistinlankojen läpiviennit. Venttiilejä käytettäessä adapterien läpi virtaa suuria määriä ilmaa, jolloin paineen aleneminen viilentää komponentteja. Viilenemisen vuoksi komponentit kutistuvat hieman ja kiinni pysyminen on syytä varmistaa. Varmistinlanka on tässä tapauksessa luotettavin tapa estää adapterin auki kiertyminen. Ruuvilukite olisi toinen vaihtoehto, mutta sen lujuusominaisuudet saattaisivat heiketä lämpötilan laskiessa.

Adapterin ja pullon välinen tiivistys toteutetaan o-rengastiivisteellä. Tiivistyspintana toimii pullossa oleva kartiopinta. Adapteriin kiinnitettävä perusliitin tiivistyy myös o-rengastiivisteiden avulla mutta adapterissa olevaan tasopintaan.

Adapterin piirustukset ovat liitteessä 2, ja alla kuvassa 4 on kaksi 3D-kuvantoa adaptereista.



Kuva 4 Adapterin 3D-kuvannot

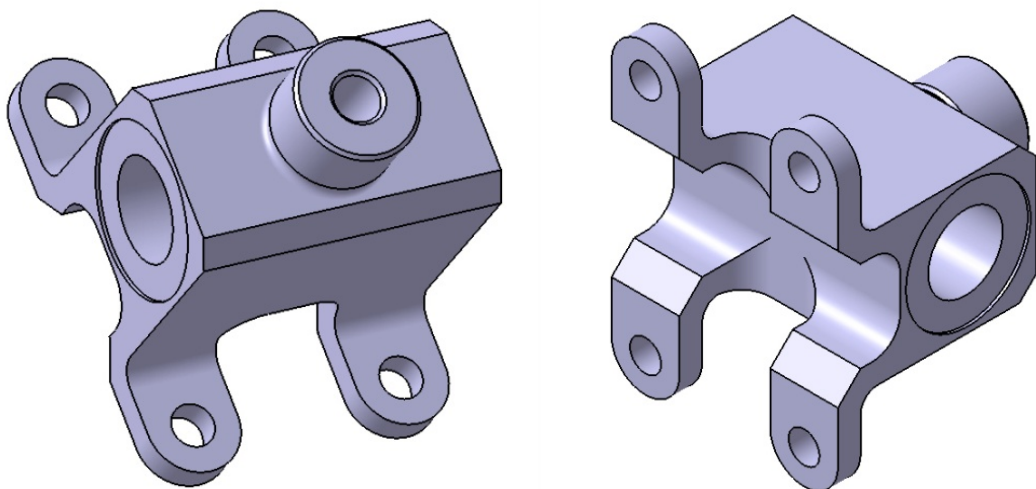
### 7.3 Korkeapainejakotukki

Korkeapainejakotukin tarkoituksena on jakaa pulloista saatava paine paineenalennusventtiilille. Kyseistä käyttötarkoitusta varten ei löytynyt valmiita komponentteja, joten osa oli suunniteltava itse alusta loppuun.

Jakotukille asetettiin useita vaatimuksia, kuten korkea paineensietokyky, helppo valmistettavuus, yksinkertainen asennettavuus, pieni koko ja keveys. Materiaalin tuli olla korroosion kestävä, ja sen tuli soveltua laajoihin paineenvaihteluihin. Sisäiset paineet vaihtelevat 0–300 bar:iin, mikä väsyttää materiaalia. Jakotukkiin kiinnitetään kaksi perusliitintä ja paineenalennusventtiili. Perusliittimet tarvitsevat sisäpuoliset kierteet ja paineenalennusventtiili ulkopuolisen. Perusliittimet tiivistyvät jakotukkiin koneistettuihin tasopintoihin, ja paineenalennusventtiilin tiivistys toteutettiin o-rengastiivisteellä.

Osan piti olla helposti kiinnitettävissä sekä irrotettavissa päärakenteesta. Suunnittelin jakotukkiin integroidut kiinnityskorvakkeet osien minimoimisen takia. Kiinnityskorvakkeiden tuli kestää jakotukin ja paineenalennusventtiilin yhteispaino erilaisissa kiihtyvyyksissä, jotka vaihtelevat 0–20 g:n välillä. Korvakkeen sisänurkat pyöristettiin lujuussyistä ja ulkonurkat viistettiin valmistusteknisistä syistä.

Jakotukin materiaaliksi valitsin ruostumattoman teräksen AISI 321, jonka korroosio- ja lujuusominaisuudet vastasivat parhaiten tavoitteita. Kyseistä terästä käytetään yleisesti lentokoneiden putkistojärjestelmissä. Materiaalin lujuusominaisuuksia on esitelty taulukossa 1. Osaa ei voitu valmistaa alumiinista, koska kierteille haluttiin runsaasti varmuuskerrointa. Kuvassa 5 on kaksi 3D-kuvantoa jakotukista, joissa näkyvät integroidut kiinnityskorvakkeet ja paino-optimoitu rakenne. Jakotukin piirustuksiin voi tutustua liitteessä 1.



Kuva 5 Korkeapainejakotukin 3D-kuvannot

Taulukko 1 Ruostumattoman teräksen AISI 321 mekaaniset ominaisuudet (5)

<b>AISI 321 Mekaaniset ominaisuudet</b>		
Kovuus	Rockwell B	80
Murtolujuus	MPa	620
Myötölujuus	MPa	240
Murtovenymä	%	45
Kimmomoduli	GPa	193
Iskusitkeys (charpy)	J	165
Iskusitkeys (izod)	J	135

#### 7.4 Pullon kiinnitysrakenteet

Pullojen kiinnittämistä hankaloittaa niiden lieriömäinen muoto. Pantakiinnitys ei yksistään riitä pitelemään pulloja paikoillaan lentoonlähdessä. Kiinnityksen tulisi olla mahdollisimman helposti valmistettavissa ja helposti asennettavissa. Pullojen tulisi olla myös kohtalaisen helposti irrotettavissa huoltoja varten.

Päädyin pullojen kiinnittämisessä hiilikuituiseen kuppirakenteeseen, johon pulloet kiinnitetään pantojen avulla. Pulloista tehdään muotti, johon hiilikuituinen kuppi laminoidaan. Kuppiin liimataan hiilikuituiset tukilevyt, jotka kiinnitetään koelennokin sisäpintaan.

#### 7.5 Paineanturi

Paineanturi on sijoitettu paineenalennusventtiiliin, ja se lähettää digitaalista signaalia valvontayksikölle.

#### 7.6 Venttiileistä yleisesti

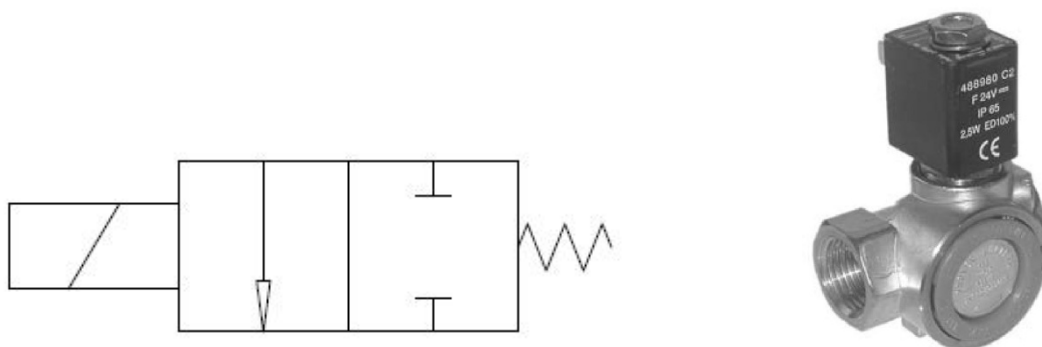
Pneumaattinen venttiili on yleisnimitys komponenteille, joilla ohjataan, säädetään ja hallitaan pneumaattista järjestelmää. Venttiilit sijaitsevat aina paineilmalähteen ja toimilaitteen välissä. Venttiilit voidaan yleisesti jaotella viiteen ryhmään:

- suuntaventtiileihin
- virtaventtiileihin
- paineventtiileihin
- sulkuventtiileihin
- vastaventtiileihin. (2, s. 60.)

Opinnäytetyön järjestelmässä käytetään suunta-, virtaus- ja vastaventtiilejä. Suuntaventtiilillä määrätään paineilman virtaussuunta, joka määrää toimilaitteen liikesuunnan. Venttiilejä voidaan ohjata usealla tavalla, kuten lihas-, sähkö- ja mekaanisella ohjauksella. Tarpeen vaatiessa voidaan valita automaattisesti alkuperäiseen asentoon palaava venttiili, jolloin toisessa tai molemmissa päissä käytetään jousiohjausta.

### 7.6.1 Suuntaventtiilien etsiminen

Järjestelmän venttiileiltä vaadittiin kevyttä painoa, mutta samalla korkeaa virtaavuutta. Venttiilien ensisijaisesti tavoiteltu toiminnallisuus oli 2/2 NC eli kaksitoiminen normaalitilassa suljettu venttiili. Yksittäisen venttiilin virtausvaatimukseksi asetettiin noin 20l/s. Korkeasti virtaavat venttiilit ovat normaalisti metallisia ja tästä syystä painavia. Kevyin virtausvaatimukset täyttävä 2/2-toiminen venttiili oli kuvan 6 mukainen Parker Lucifer SA -venttiili. Kyseinen venttiili on kuitenkin suhteellisen painava: yhden venttiilin massa on 380 gr. Venttiilin massa osoittautui liian suureksi tiukan massabudjetin takia, joten oli löydettävä kevyemmästä materiaalista valmistettu venttiili. Kuvassa 6 on 2/2 NC -venttiilin piirrosmerkki ja kuva messinkisestä venttiilistä.



Kuva 6 Parker Lucifer SA -venttiili ja sen piirrosmerkki

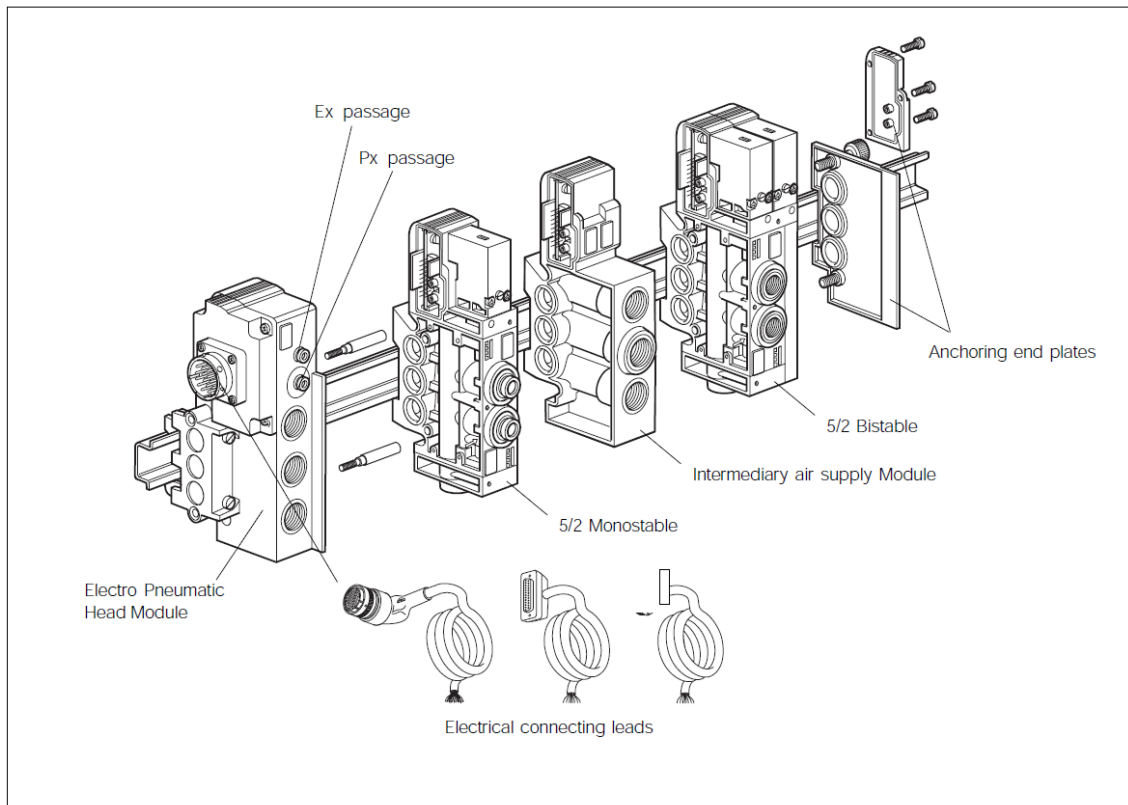
### 7.6.2 Suuntaventtiilien valinta

Venttiilien täytyy olla helposti kiinnitettäviä ja mahdollisimman yksinkertaisen muotoisia, jolloin ne täyttävät vaatimansa tilan optimaalisesti. Kuvan 6 mukaisten venttiilien kiinnittäminen on hankalaa, ja ne vievät paljon turhaa tilaa.

Käyttötarkoitukseen soveltuvimmat venttiilit löytyvät Parkerin PVL-sarjan modulaarisista venttiileistä. Modulaariset venttiilit ovat pinottavissa, eli niitä voidaan liittää toisiinsa suoraan ilman välikappaleita. PVL-sarjan venttiilit on valmistettu lasikuidulla vahvistetusta muovista, joka mahdollistaa kevyen, mutta lujan rakenteen. Venttiilit ovat muodoiltaan myös selkeitä, mikä helpottaa venttiilien sijoittamista koelennokin ahtaisiin tiloihin.

Venttiilimoduuli koostuu elektropneumaattisesta pääyksiköstä, venttiileistä ja päätylevystä. Elektropneumaattisen pääyksikön tehtävä on jakaa käyttöpaine venttiileille ja ohjata sähköä solenoidien ohjausta varten. Pääyksikkö käyttää portin 1 painetta venttiilien ohjauspaineena. Ohjauspaineporttia kutsutaan Px-portiksi ja ulostuloporttia Ex-portiksi. Ohjauspaine vapautuu ilmakehään äänenvaimentajan kautta, kun venttiilit sulkeutuvat. Venttiilit jakavat kolme kanavaa, jotka ovat portin 5, 1 ja 3 kanavat. Ne ovat eristettävissä toisistaan venttiilien väleihin asennettavilla tulpilla. Venttiilimoduulin päätykkappale estää paineen ulospurkautumisen, ja sen kiinnitysruuveilla kiristetään koko venttiilimoduuli tiiviiksi. Kuvassa 7 on havainnollistettu venttiilien pinoamisperiaate.





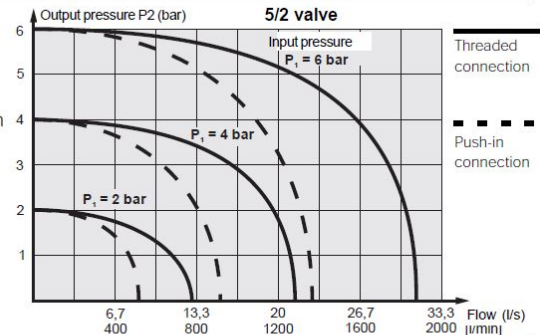
Kuva 7 Venttiilimoduulin rakenne (6)

Valitsemani venttiilit ovat jousipalautteisia 5/2-suuntaventtiilejä, ja niitä tulee järjestelmään yhteensä viisi kappaletta. Venttiilit toteuttivat hyvin niille asetetut virtausvaatimukset. Kuvassa 8 on valitun venttiilin virtausarvot ympyröitynä.

### Additional information

Modules for the DC version are protected against overvoltage up to 300 V. Protections on inductive loads connected to the same source are necessary.

Modules for the AC version fitted with a DC solenoid are compatible with PLC control card NPN protected.

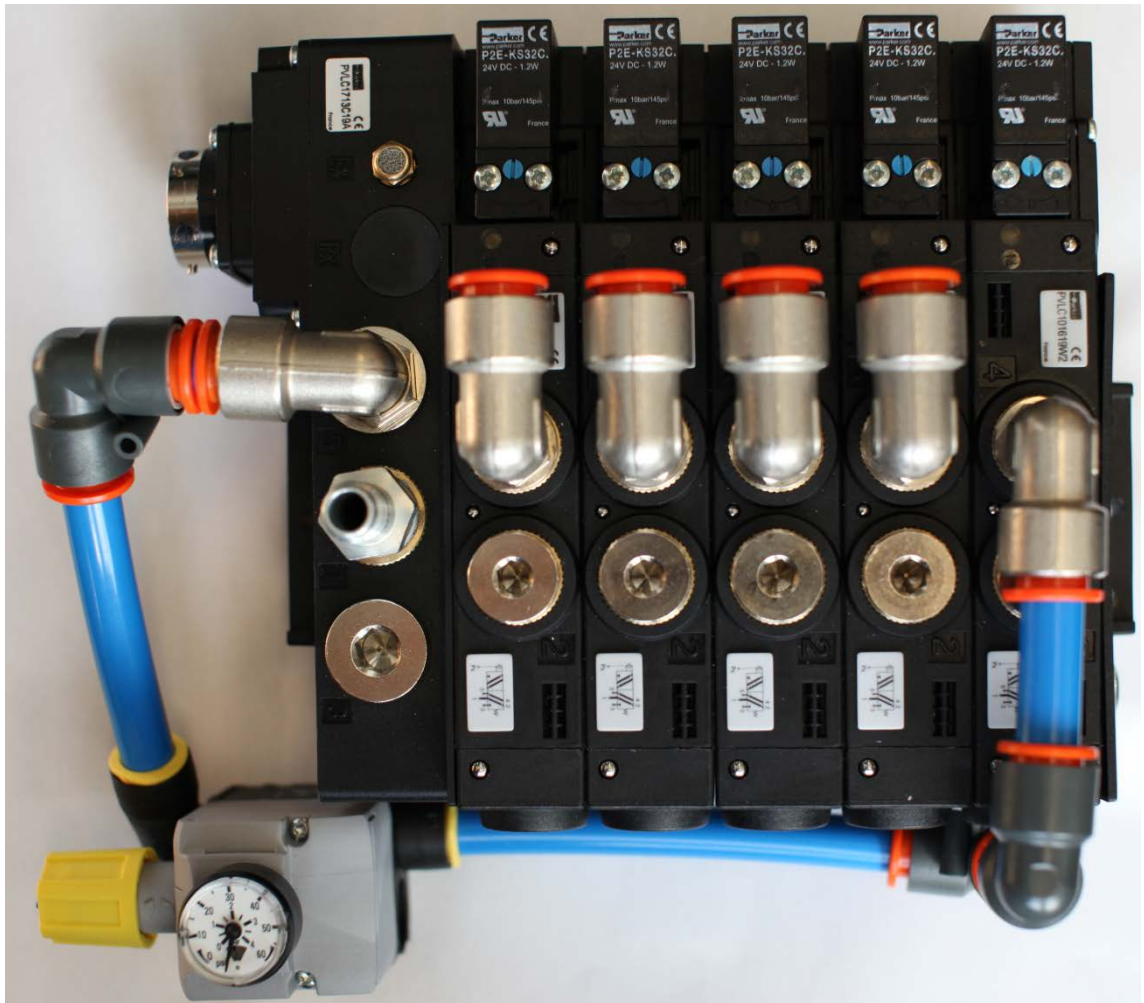


### Flow characteristics

	<b>Type 2 x 3/2 G1/8 threaded</b>	<b>Type 2 x 3/2 Push in Ø8 mm</b>	<b>Type 5/2 G1/4 threaded</b>	<b>Type 5/2 Push in Ø8 mm</b>
Qn	9,5 l/s (570 l/min)	9 l/s (540 l/min)	18,33 l/s (1100 l/min)	14 l/s (840 l/min)
Qmax	15,8 l/s (950 l/min)	15 l/s (900 l/min)	30,83 l/s (1850 l/min)	23,3 l/s (1400 l/min)
Cv	0,58	0,55	1,11	0,86
Kv	8,3	7,8	16	12,2
	<b>Type 5/3 closed centre G1/4 threaded</b>	<b>Type 5/3 closed centre Push in Ø8 mm</b>	<b>Type 5/3 vented centre G1/4 threaded</b>	<b>Type 5/3 vented centre Push in Ø8 mm</b>
Qn	13 l/s (780 l/min)	11,6 l/s (700 l/min)	18,33 l/s (1100 l/min)	14 l/s (840 l/min)
Qmax	21,66 l/s (1300 l/min)	19,5 l/s (1170 l/min)	30,83 l/s (1850 l/min)	23,3 l/s (1400 l/min)
Cv	0,79	0,71	1,11	0,86
Kv	11,3	10,2	16	12,2

Kuva 8 Valitun venttiilin virtausarvoja (6)

Alla olevassa kuvassa 9 on kasattuna valmis venttiilimoduuli ja toisiopaineenlennusventtiili.



Kuva 9 Valmis venttiilimoduuli ja toisiopaineenlennusventtiili

## 7.7 Putkisto

Korkeapaineputkisto pulloilta jakotukille on valmistettu korkean paineen takia alumiinista. Putket on valmistettu 6061-T6-alumiinista ja vastaavaa putkea käytetään myös ilmailussa. Putkisto on ulkohalkaisijaltaan 6 mm ja sisähalkaisijaltaan 4 mm, ja se kestää painetta 300 bar:iin asti.

Ensiopaineenlennusventtiililtä eteenpäin putkisto on nylonmuovista pneumatiikkaputkea. Järjestelmässä on käytetty kolmea erivahvuista putkea. Ilmatyynyille menevät putket ovat ulkohalkaisijaltaan 12 mm ja sisähalkaisijaltaan 10 mm. Koko putkisto on pää-

piirteissään edellä mainitun vahvuista, paitsi työsylinterille menevät putket, jotka ovat ulkohalkaisijaltaan 4 mm.

## **7.8 Työsylinteri**

Työsylinterien tarkoituksena on avata paineilmatyynyjen ja laskuvarjon luukut. Työsylinterit työntävät nivellettyjä kiinnityshakasia, jolloin luukut irtoavat lennokista.

## **7.9 Ensiöpaineenalennusventtiili**

Ensiöpaineenalennusventtiilinä toimii monilähtöinen sukelluskäyttöön suunniteltu paineenalennusventtiili. Siinä on neljä matalapainelähtöä, jotka antavat 10 bar:n paineen, ja yksi täyspainainen liitin, johon on liitetty digitaalinen paineanturi. Paineenalennusventtiili muuttaa painepulloilta saatavan 300 bar:n paineen matalammaksi eli 10 bar:n paineeksi. Paine alennetaan, koska venttiilimoduulin maksimikäyttöpaine on juuri tuo 10 bar.

Tämän suuruusluokan paineille ja vaatimuksille ei ole tarjolla useita vaihtoehtoja. Sukelluskäyttöön tarkoitetuissa paineenalennusventtiileissä on standardikierteet, jolloin ne ovat yhteensopivia keskenään. Sukelluskäyttöön tarkoitettut komponentit ovat myös hyvin testattuja, luotettavia ja kohtalaisen helposti saatavissa olevia.

## **7.10 Toisiopaineenalennusventtiili**

Toisiopaineenalennusventtiilin tehtävä on alentaa 10 bar:n paine 1.3 bar:n paineeseen. Tätä painetta käytetään ylläpitotilassa ilmatyynyjen ylläpitopaineena. Venttiiliksi valitsin Parkerin valmistaman paineenalennusventtiilin, jonka ulostulopaine on säädettävissä 0–2 bar:iin. Venttiilissä on myös mekaaninen painemittari, jonka avulla ylläpitopaine voidaan säätää oikeaksi.

## **7.11 Liittimet**

Korkeapaineputkiston liitännät on toteutettu lentokonekäyttöön suunnitelluilla AN-normin mukaisilla putkiliittimillä. AN-liittimet on suunniteltu korkeisiin käyttöpaineisiin. Liittimet on valmistettu alumiinista, jonka ansiosta ne ovat kevyitä. Putkiliitosten

tiivistys tapahtuu korkeisiin paineisiin suunnitellulla JIC-kartioliitoksella. Tiivistuspinta muodostuu liittimen ulkopuolisen ja putken sisäpuolisen kartion välille.

## **7.12 Komponenttien huollettavuus**

Järjestelmän huollettavuuteen tulee kiinnittää erityistä huomiota jo suunnitteluvaiheessa. Suunnittelupöydällä voidaan tehdä huollettavuutta helpottavia ratkaisuja, joten suunnittelijan tulee huomioida myös käyttäjän näkökulmia. Monet asiat näyttävät tietokoneen ruudulla helposti huollettavilta ja valmistettavilta. Yleensä ilman prototyyppien valmistusta suunnittelija ei voi hahmottaa komponenttien todellista kokoa eikä niiden välisiä etäisyyksiä. Prototyyppinä voidaan valmistaa esimerkiksi 3D-tulostamalla tai kartongista. Prototyyppien testaamisen yhteydessä voidaan ilmenneet ongelmat vielä korjata.

Järjestelmän huollettavuus otettiin huomioon jo suunnitteluvaiheessa valitsemalla helposti saatavia komponentteja ja sijoittamalla komponentit siten, että ne olisivat helposti vaihdettavissa.

## 8 JÄRJESTELMÄN OHJAUSLOGIIKKA

### 8.1 Normaalitila

Paineilmajärjestelmän normaalitilan kytkentöihin voi tutustua liitteessä 3. Normaalitilassa paineilmapullot ovat täytettyinä ja niissä vallitsee 300 bar:n suuruinen paine. Paine kulkeutuu korkeapaineputkistoa pitkin jakotukille, johon on liitetty molemmat pullot sekä ensiöpaineenalennin. Paineenalennin muuttaa korkeapaineen 10 bar:n suuruiseksi paineeksi. Paineenalentimelta paine johdatetaan nylonputkea pitkin venttiilimoduulin porttiin 1. Venttiilit ovat suljetussa asennossa, jolloin portin 1 paine lepää portin 2 tulpia vastaan. Venttiilimoduulin kaikki portin 2 ulostulot ovat tulpattuja. Paine ei pääse virtaamaan mistään ulos, jolloin järjestelmä on valmiutilassa. Venttiilit eivät tarvitse sähköä pysyäkseen kiinni, koska ne ovat jousipalautteisia ja normaalitilassa suljettuja.

### 8.2 Täyttö

Paineilmajärjestelmän täyttötilan kytkentöihin voi tutustua liitteessä 4. Täyttötilassa ilmatyynyjen olisi tarkoitus täytyä mahdollisimman nopeasti. Ensimmäiseksi täytyy avata ilmatyynyjen sekä laskuvarjon luukut. Luukkujen avaus on toteutettu ylläpitoventtiilin avulla. Ylläpitoventtiili on haaroitettu kulkemaan toisiopaineenalentimelle ja luukkujen sylintereille. Venttiilin auetessa sylintereille kulkeutuu 10 bar:n paine ja tyynyille kulkeutuu 1.3 bar:n paine. Venttiili avataan sekunnin ajaksi, jolloin luukkuja kiinnipitävät sylinterit avautuvat ja ilmatyynyt esitäyttyvät hieman.

Tämän jälkeen laskeutumistyynyille ja laskuvarjon tyynylle syötetään kolmen sekunnin ajan 10 bar:n täyttä painetta. Tänä aikana varjo työntyy ulos kotelostaan ja laskeutumistyynyt täyttyvät kokonaan. Venttiilien sulkeuduttua järjestelmä on valmis ylläpitotilaa varten.

### 8.3 Ylläpito

Paineilmajärjestelmän ylläpitotilan kytkentöihin voi tutustua liitteessä 5. Ylläpitotilassa laskeutumistyynyissä ylläpidetään 1.3 bar:n painetta, joka on sopiva paine laskeutumiseen. Paine tuotetaan ylläpitoventtiilin kautta ja toisiopaineenalentimen läpi. Pai-

neenalentimen jälkeen paine ohjataan venttiilimoduulin porttiin numero 5. Paine ohjautuu kaikille tyynyille venttiilimoduulin yhteistä kanavaa pitkin.

#### **8.4 Pullojen täyttö**

Pullot voidaan täyttää, kun venttiilit ovat normaalitilassa eli liitteen 3 mukaisessa tilassa. Tässä tilassa paine ei pääse vapautumaan ulos järjestelmästä.

## 9 JÄRJESTELMÄN TESTAAMINEN

Järjestelmän toimintaa testattiin alustavissa testeissä ilman koelennokkia. Testeissä ilmeni, että järjestelmä toimii oletetulla tavalla. Tyynyt täyttyivät nopeasti, ja järjestelmän ohjauslogiikka toimi järkevästi. Alustavien testien perusteella venttiileissä riittävät virtaukset niin täytön kuin ylläpidon osalta. Testilaitteistona toimivat kompressori, painesäiliö, tietokone solenoidien ohjausta varten ja yksi laskeutumistyyny.

Järjestelmän todelliset testaukset aloitetaan vasta tämän opinnäytetyön valmistumisen jälkeen. Niissä testataan järjestelmää kokonaisuudessaan, kaikki tyynyt ja muut komponentit kytkettyinä. Testauksia suoritetaan lennokista tehdyn vanerimallin avulla ja lopulta itse koelennokissa.

Tärkeimpiä testausmenetelmin selvitettäviä asioita ovat liitoksien tiiveys ja pudotuskoheet. Tärkeää on myös todentaa, riittääkö laskuvarjotyynyssä voima heittää varjo ulos kotelostaan. Lisäksi testeihin kuuluu komponenttien kiinnityksien kestävyys testaminen koelennokin rakenteissa.

Järjestelmää tullaan mahdollisesti jatkokehittämään, varsinkin jos ilmenee jonkinlaisia vikoja tai puutteita. Jokainen järjestelmä on kuitenkin aina uuden kehittämisen pohja. Alustavissa testeissä vikoja ei ilmennyt, joten järjestelmän suunnittelua voi pitää varsin onnistuneena.



## 10 POHDINTA

Maailmassa on lukuisia pneumatiikkakomponenttien toimittajia ja vielä enemmän itse komponentteja. Eri valmistajien katalogien läpikäyminen ja komponenttien ominaisuuksien vertailu oli yllättävän aikaa vievää ja raskasta. Järjestelmän tuli olla mahdollisimman kevyt mutta nimenomaan kuluttajille tai koneteollisuuteen suunnatuista komponenteista valmistettu. Teollisuudessa ei tarvitse yleisesti ottaa huomioon venttiilien ja komponenttien painoa, mikä lisäsi haasteita entisestään. Lentokonekäyttöön suunniteltuja komponentteja ei voitu käyttää niiden korkean hinnan ja vaikean saatavuuden takia. Kyseessä on kuitenkin vain tutkielma, ja siksi komponenttien tuli olla kohtuullisen halpoja. Pitkän etsimisen jälkeen sopivat komponentit kuitenkin löytyivät ja järjestelmä saatiin rakennettua.

Paineilmajärjestelmän suunnittelu oli erittäin mielenkiintoinen ja opettavainen projekti. Sain työtä tehdessäni paljon uutta tietoa ja osaamista usealta osa-alueelta. Eniten haasteita loi optimaalisimpien komponenttien löytäminen. Työn monipuolisuus aiheutti myös omat haasteensa. Järjestelmäsuunnittelussa ei riitä, että keskittyy vain yhteen asiaan, kuten koneistusosiin, vaan järjestelmää täytyy koko ajan suunnitella kokonaisuutena. Yllätyksenä itselleni tuli myös, kuinka paljon aikaa kuluu alihankkijoiden kanssa asioimiseen ja komponenttien toimittamiseen. Vain omasta etenemisestä huolehtiminen ei riittänytkään jouduttamaan järjestelmän valmistumista.

Työn tavoitteet saavutettiin hyvin. Järjestelmän logiikasta tuli kevyt ja kompakti. Komponentit ovat normaalissa teollisuudessa käytettyjä ja tätä kautta edullisia ja nopeasti saatavilla olevia. Komponentit ovat myös kevyimpiä mahdollisia, mitä vaadituista virtausluokista löytyi. Järjestelmän toiminnallisuus vastaa vähintään edellisiä prototyyppjä, mikä olikin yksi tärkeimmistä tavoitteista.

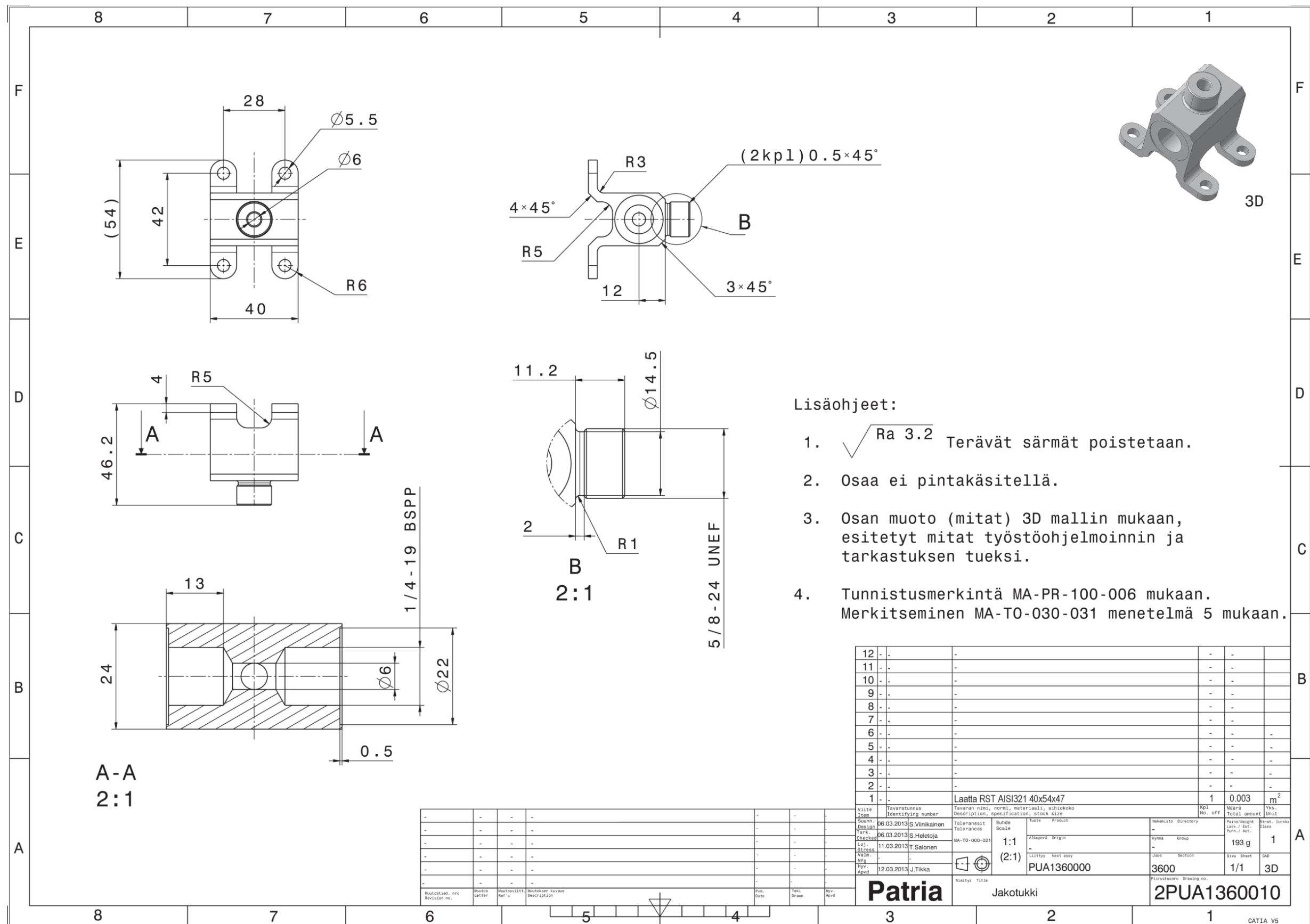
Järjestelmä osoittautui alustavissa testeissä toimivaksi ja kytkentälogiikka järkeväksi. Järjestelmän todelliset testaukset eivät ole vielä tätä kirjoittaessani alkaneet. Tulen jatkamaan työskentelyä järjestelmän parissa vielä tämän opinnäytetyön valmistumisen jälkeenkin ja mahdollisesti myös jatkossa kehittämään sitä eteenpäin.

**LÄHTEET**

- 1 Fonselius, J. & al.: Koneautomaatio pneumatiikka. 8. uudistettu painos. Helsinki 1997. Edita 166 s. ISBN 951-37-2225-2.
- 2 Keinänen, Toimi & Kärkkäinen, Pentti: Automaatiojärjestelmien hydrauliiikka ja pneumatiikka. 1. painos. Helsinki 2005. Werner Söderström Osakeyhtiö 338 s. ISBN 951-0-29881-6.
- 3 Valtanen, Esko: Tekniikan taulukkokirja. 19. painos. Mikkeli 2012. Genesis-Kirjat Oy 1200 s. ISBN 978-9529867-36-3.
- 4 Tietoa alumiinipulloista. Luettu 05.04.2013.  
[www.luxfercylinders.com/products](http://www.luxfercylinders.com/products)
- 5 AISI 321 mekaaniset ominaisuudet. Luettu 04.03.2013.  
[www.limatherm.com](http://www.limatherm.com)
- 6 Parker valvetronic technical catalogue PD0C99002GB02-ev. Sähköposti 11.02.2013.

**LIITTEET**

Liite 1. Korkeapainejakotukin piirustukset



**Lisäohjeet:**

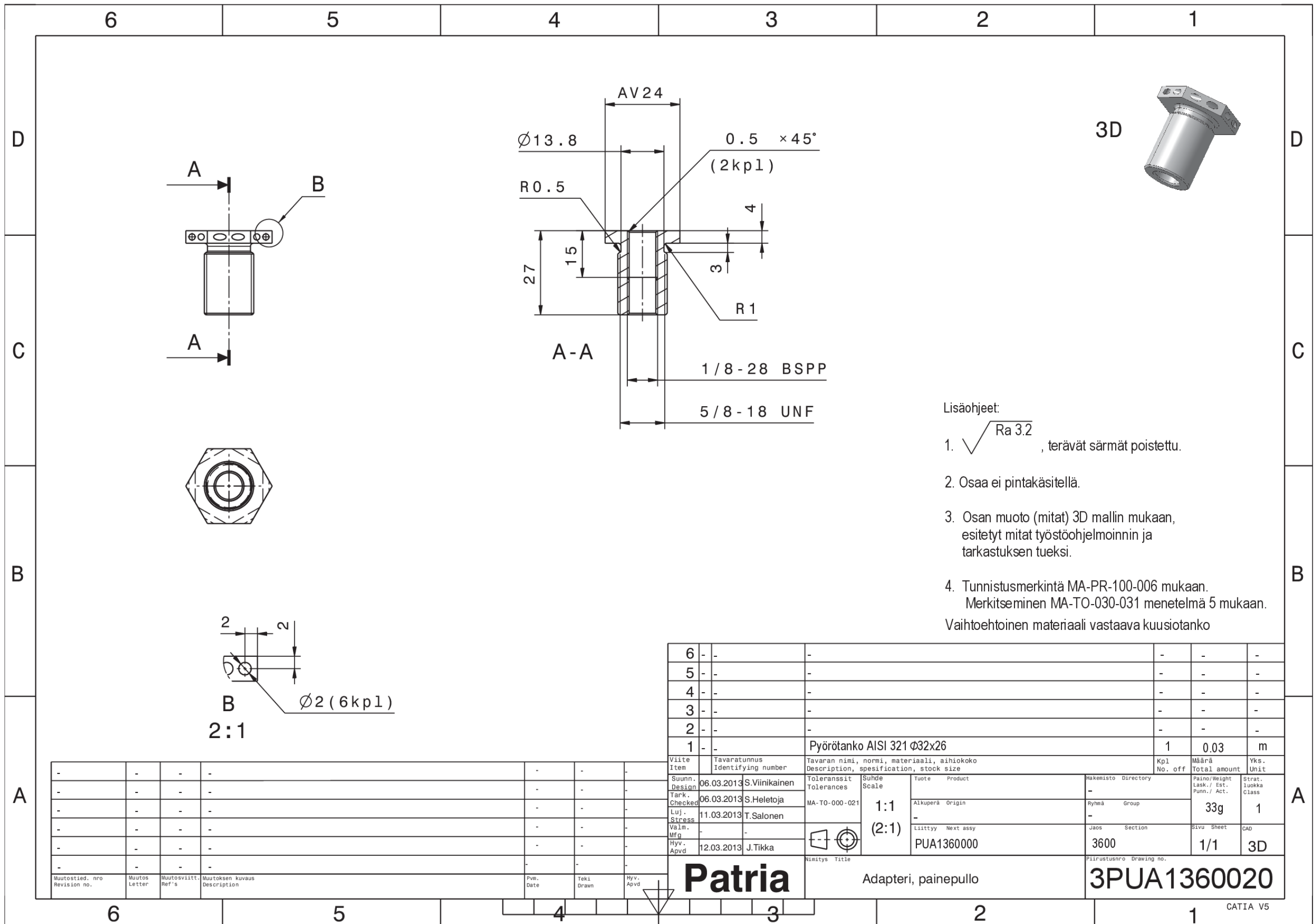
1.  $\sqrt{Ra 3.2}$  Terävät särmät poistetaan.
2. Osaa ei pintakäsitellä.
3. Osan muoto (mitat) 3D mallin mukaan, esitetyt mitat työstöohjelmoinnin ja tarkastuksen tueksi.
4. Tunnistusmerkintä MA-PR-100-006 mukaan. Merkitseminen MA-TO-030-031 menetelmä 5 mukaan.

12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	1	0.003 m <sup>2</sup>

Muutosilmi. nro	Muutos	Muutosviesti	Muutoksen kuvaus	Pvm.	Tekijä	Hyväksyjä
Revision no.	Letter	Ref.'s	Description	Date	Drawn	App'd
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

Laatta RST AISI321 40x54x47	1	0.003	m <sup>2</sup>
Laatta RST AISI321 40x54x47	1	0.003	m <sup>2</sup>
MA-TO-000-021	1:1	193 g	1
PUA1360000	3600	1/1	3D
<b>Patria</b>	Jakotukki	<b>2PUA1360010</b>	

Liite 2. Adapterin piirustukset



Lisäohjeet:

1.  $\sqrt{Ra 3.2}$ , terävät särmät poistettu.
2. Osaa ei pintakäsitellä.
3. Osan muoto (mitat) 3D mallin mukaan, esitetyt mitat työstöohjelmoinnin ja tarkastuksen tueksi.
4. Tunnistusmerkintä MA-PR-100-006 mukaan. Merkitseminen MA-TO-030-031 menetelmä 5 mukaan. Vaihtoehtoinen materiaali vastaava kuusiotanko

Muutostied. nro Revision no.	Muutos Letter	Muutosviitt. Ref's	Muutoksen kuvaus Description	Pvm. Date	Tekijä Drawn	Hyväks. Apvd
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

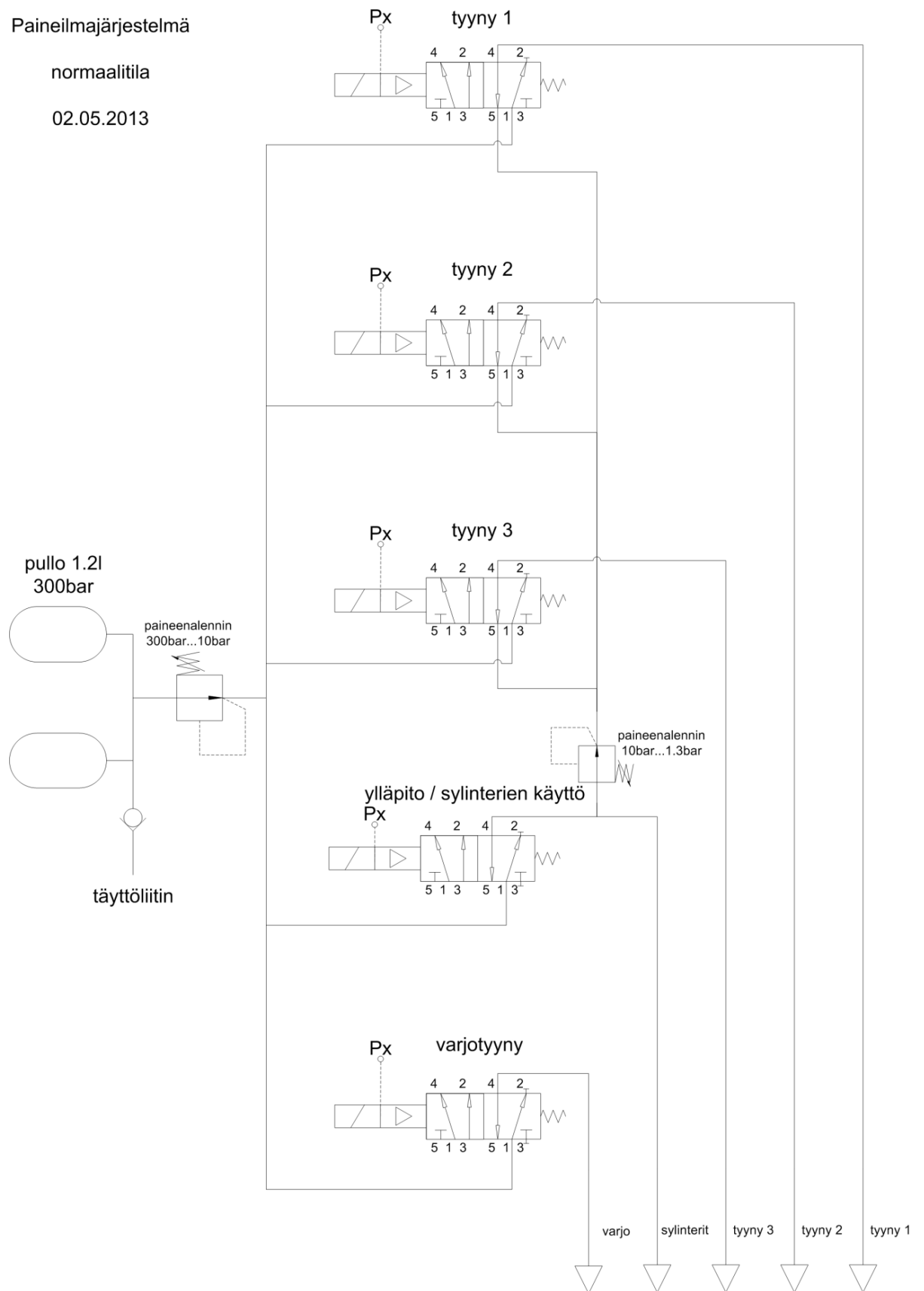
6	-	-	-	-	-	-					
5	-	-	-	-	-	-					
4	-	-	-	-	-	-					
3	-	-	-	-	-	-					
2	-	-	-	-	-	-					
1	-	-	Pyörötanko AISI 321 Ø32x26	1	0.03	m					
Viite Item	Tavaratunnus Identifying number	Tavaran nimi, normi, materiaali, aihkokoko Description, specification, stock size			Kpl No. off	Määrä Total amount	Yks. Unit				
Suunn. Design	06.03.2013	S.Viinikainen	Toleranssit Tolerances	Suhde Scale	Tuote Product	Hakemisto Directory	Paino/Weight Lask./ Est. Punn./ Act.	Strat. luokka Class			
Tark. Checked	06.03.2013	S.Heletoja	MA-TO-000-021	1:1 (2:1)	Alkuperä Origin	Ryhmä Group	33g	1			
Luj. Stress	11.03.2013	T.Salonen			Liittyä Next assy	Jaos Section	Sivu Sheet	CAD			
Valm. Mfg	-	-			PUA1360000	3600	1/1	3D			
Hyv. Apvd	12.03.2013	J.Tikka									
Muutostied. nro Revision no.			Muutos Letter			Muutosviitt. Ref's			Muutoksen kuvaus Description		
Pvm. Date			Tekijä Drawn			Hyväks. Apvd			Nimitys Title		
Patria			Adapteri, painepullo			Piirustusno Drawing no.			3PUA1360020		

## Liite 3. Kytkentälogiikka normaalitilassa

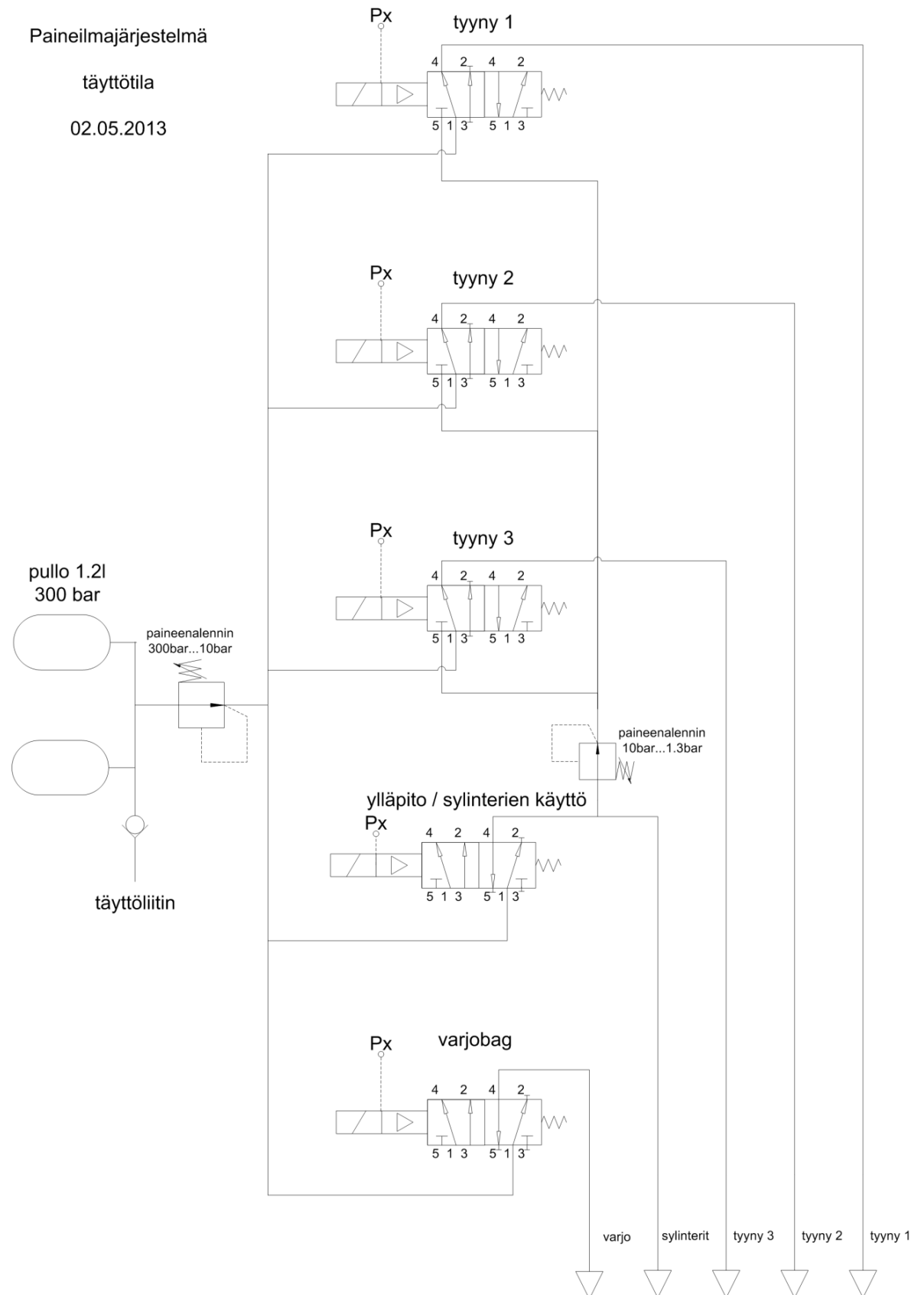
Paineilmajärjestelmä

normaalitila

02.05.2013



## Liite 4. Kytkenälogiikka täyttötilassa



## Liite 5. Kytkentälogiikka ylläpitotilassa

