

Vili Lindqvist

# 3D-tulostamalla valmistettavan hydraulisen paineenkohottimen suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

20.5.2018

<p>Tekijä Otsikko</p> <p>Sivumäärä Aika</p>	<p>Vili Lindqvist 3D-tulostamalla valmistettavan hydraulisen paineenkohottimen suunnittelu</p> <p>37 sivua + 5 liitettä 20.5.2018</p>
<p>Tutkinto</p>	<p>Insinööri (AMK)</p>
<p>Tutkinto-ohjelma</p>	<p>Konetekniikka</p>
<p>Ammatillinen pääaine</p>	<p>Koneensuunnittelu</p>
<p>Ohjaajat</p>	<p>AM-Specialist Johannes Karjalainen Lehtori Heikki Paavilainen</p>
<p>Tässä insinööriyössä suunniteltiin hydraulinen paineenkohotin valmistettavaksi 3D-tulostamalla metallista. Raportissa käydään läpi Siemens NX:n topologiaoptimointityötilan käyttöä, sekä yleisesti 3D-tulostamiseen liittyviä suunnittelu- ja rajoitteita.</p> <p>Raportissa käsitellään 3D-tulostusta vain SLM-teknologian näkökulmasta. Ainetta lisäävää valmistusta käydään läpi yleisesti, sekä SLM-teknologian teoriaa syvällisemmin.</p> <p>Työn tavoitteena oli luoda kilpaileva konsepti perinteisin tavoin, kuten takomalla tai valamalla valmistettujen hydraulikkalohkojen rinnalle. Työssä ei syvennytä rakenteen täydelliseen standardit täyttävään suunnitteluun, vaan pyrittiin luomaan lähes valmis konsepti, jonka pystyisi pienillä muutoksilla viemään loppuun.</p> <p>Hydrauliikkalohkon suunnittelussa huomioidaan myös DFA-periaatetta, sillä lohko valmistettiin esiteltäväksi Advanced Engineering-messuille (2018), joilla robottikokoonpanosolun tehtävänä oli koota ja purkaa paineenkohottajaa.</p>	
<p>Avainsanat</p>	<p>3D-tulostaminen, Siemens NX, topologian optimointi</p>

Author Title	Vili Lindqvist Designing a 3D-Printed Hydraulic Pressure Intensifier
Number of Pages Date	37 pages + 5 appendices 20 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Johannes Karjalainen, AM Specialist Heikki Paavilainen, Senior Lecturer
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to design a hydraulic pressure intensifier to be manufactured using additive manufacturing methods capable of producing metal parts. The report examines the use of the Siemens NX topology optimization workspace, as well as the general design rules and constraints associated with 3D printing.</p> <p>The report covers 3D printing mostly from the perspective of SLM technology, although it covers the general principles of most AM-technologies concisely as well.</p> <p>The design objective was to create a competitive concept when compared to hydraulic blocks manufactured using regular production methods, such as forging and casting. The goal was not to design a perfectly functioning device that would fulfill all the required standards and regulations, but instead to create an almost ready concept that could be finished with minor changes.</p> <p>The design of the hydraulic block also considers the DFA principle, since the block was designed and manufactured to be presented at the Advanced Engineering Fair (2018), where an industrial robot or robots would assemble and dismantle the block.</p>	
Keywords	3D printing, Siemens NX, Topology Optimization

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Ainetta lisäävä valmistus	1
2.1	Edut ja rajoitteet	2
2.2	LPBF-teknologia	3
2.2.1	Toimintaperiaate	3
2.2.2	Huomioitavaa	4
3	Työn tavoitteet	7
3.1	Tavoitteet yleisesti	7
3.2	DFA-periaatteen huomioiminen	7
3.3	Topologiaoptimointi yleisesti	8
4	Konseptointi	9
4.1	Rajoitteet	9
4.2	Konseptin valinta	10
5	Suunnittelutyö	12
5.1	Komponenttien valinta	13
5.1.1	4/2 - suuntaventtiili	13
5.1.2	Vastaventtiilit	14
5.2	Lohkon suunnittelu	15
5.2.1	Männän mitoitus	15
5.2.2	Tulostussuunnan valinta	15
5.2.3	Tukimateriaalin käyttö	16
5.2.4	Kanaviston suunnittelu	18
5.2.5	Siemens NX TopOpt	20
5.2.6	Tiivisteiden suunnittelu	27
5.2.7	Mallin jälkikäsitteily	27
5.2.8	Valmistuskuvat	27
5.3	Kappaleen tilaaminen	27
5.4	Päätelmät	28
5.4.1	Mekaaniset osat	28
5.4.2	Seinämävahvuudet	29

5.5	Lopullinen versio	34
6	Yhteenveto	35
	Lähteet	36
	Liitteet (Vain työn tilaajan käyttöön)	
	Liite 1. Männän koneistuskuva	
	Liite 2. Kannen koneistuskuva	
	Liite 3. Rungon valmistuksen yleisohje	
	Liite 4. Rungon AM-ohje	
	Liite 5. Rungon koneistuskuva	

## Lyhenteet

AM	Additive Manufacturing. Ainetta lisäävä valmistus.
CNC	Computerized Numerical Control. Tietokoneistettu numeerinen ohjaus, jolla viitataan usein mm. koneistukseen, levyn leikkaamiseen tai muihin työstöprosesseihin.
DFA	Design for Assembly. Suunnittelu kokoonpanoa varten.
FEM	Finite Element Method. Elementtimenetelmä.
LPBF	Laser Powder Bed Fusion. Jauhepetitulosus.
NX	Siemens NX. 3D-suunnitteluohjelmisto.
SLM	Selective Laser Melting. Eräs LPBF-menetelmä.

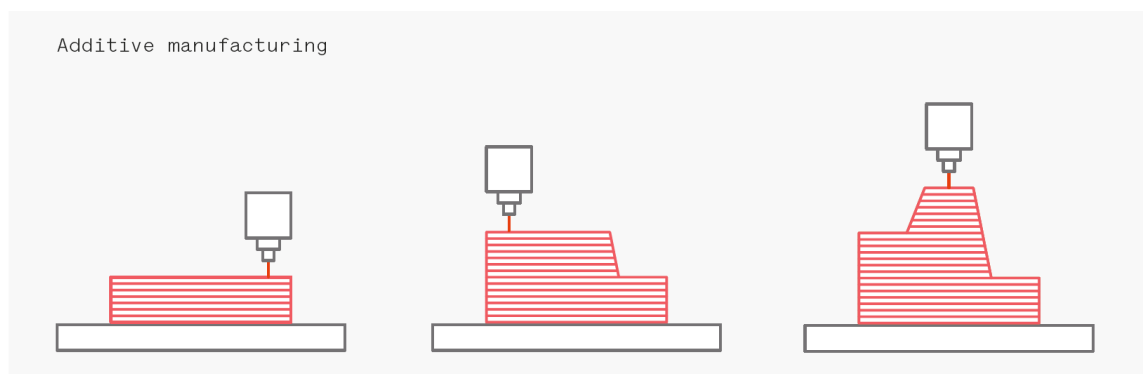
## 1 Johdanto

Insinööriyön aiheena oli suunnitella topologiaoptimoitu, 3D-tulostamalla valmistettu täysin hydraulisesti toimiva paineenkohotin Etteplan Oyj:lle Advanced Engineering -tapahutumaan (2018) esiteltäväksi. Yrityksen toimesta annettiin selkeät reunaehdot komponentin suunnitteluun, muun muassa ääriimitat, tilavuusvirta sekä painetaso.

Etteplan Oyj on kasvava yritys, joka työllistää yli 2 800 suunnittelualojen asiantuntijaa ympäri maailman. Palveluita tarjotaan teollisuudessa laite- ja laitossuunnittelun, sulautettujen järjestelmien ja teknisten dokumentointiratkaisujen tarpeisiin. Yhtiöllä on toimintaa Suomessa, Saksassa, Ruotsissa, Puolassa, Alankomaissa ja Kiinassa.<sup>[1]</sup>

## 2 Ainetta lisäävä valmistus

Kaikki ainetta lisäävät valmistusmenetelmät pohjautuvat samaan periaatteeseen. Kappaleen malli viipaloidaan ohuiksi siivuiksi, ja jokaiselle kerrokselle luodaan oma työstöratansa (kuva 1), jonka jälkeen tiedosto siirretään tulostimelle. Tämän jälkeen tulostin käyttää luotua tiedostoa valmistaakseen kappaleen kerros kerrokselta käyttäen lämmön lähdettä (laser, elektronisuihku, valoakaari, ultraääni yms.) ja syöttömateriaalia (metallijauhe, lanka, levy yms.).



Kuva 1.<sup>[2]</sup> Yksinkertaistettu esimerkki kerrosmaisesta tulostuksesta.

## 2.1 Edut ja rajoitteet

Pääasiallinen etu ainetta lisäävässä valmistuksessa on mahdollisuus valmistaa geometrisesti hankalia kappaleita. Ainetta lisäävä valmistus ei vaadi päästöjä kuten valaminen, eikä runsasta työstöä, kuten perinteisesti valetusta tai taotusta aihioista koneistetut kappaleet. Menetelmä mahdollistaa aikaisempaa kevyempien rakenteiden valmistamisen. Lisäksi kappaleen sisäisten kanavien valmistaminen on mahdollista, joskin kanavista halutaan yleisesti poistaa ylimääräinen metallijauhe. Lisäksi useista osista koostuvat kokoonpanot voidaan toisinaan korvata yhdellä kappaleella. Menetelmä on kilpailukykyinen erityisesti pienten sarjojen, sekä erikoiskappaleiden valmistuksessa. <sup>[3]</sup>

Menetelmillä on myös rajoitteensa, kuten tukimateriaalin tarve tulostuksen aikana, ja niiden poistaminen sen jälkeen (ei koske aivan kaikkia menetelmiä). Lisäksi valmistusmenetelmien ollessa kohtuullisen uusia ja jatkuvasti kehittyviä, suunnitteluun liittyviä ohjeita ja sääntöjä on saatavilla heikosti. Menetelmillä ei toistaiseksi myöskään saada aikaan yhtä hyvää pinnanlaatua kuin koneistamalla tai hiomalla, mistä johtuen hienoa pinnanlaatua tarvittaessa joudutaan edelleen turvautumaan muihin menetelmiin <sup>[4]</sup>. Jo suunnitteluvaiheessa on huomioitava käytettävän menetelmän rajoitteet, kuten tukimateriaalin käyttö ja suurten materiaalikeskittymien ehkäisy. <sup>[5]</sup>

Rajoittavana tekijänä toimii myös hinta, sillä ainetta lisäävillä menetelmillä kappaleiden valmistushinnat ovat korkeita. Taulukossa 1 on hyvin karkea, suuntaa antava ohje, jossa vertaillaan eri valmistusmenetelmien kannattavuutta valmistettavan kappalemäärän ja materiaalin perusteella.

Taulukko 1. <sup>[2]</sup> Eri valmistusmenetelmien valintaa helpottava taulukko.

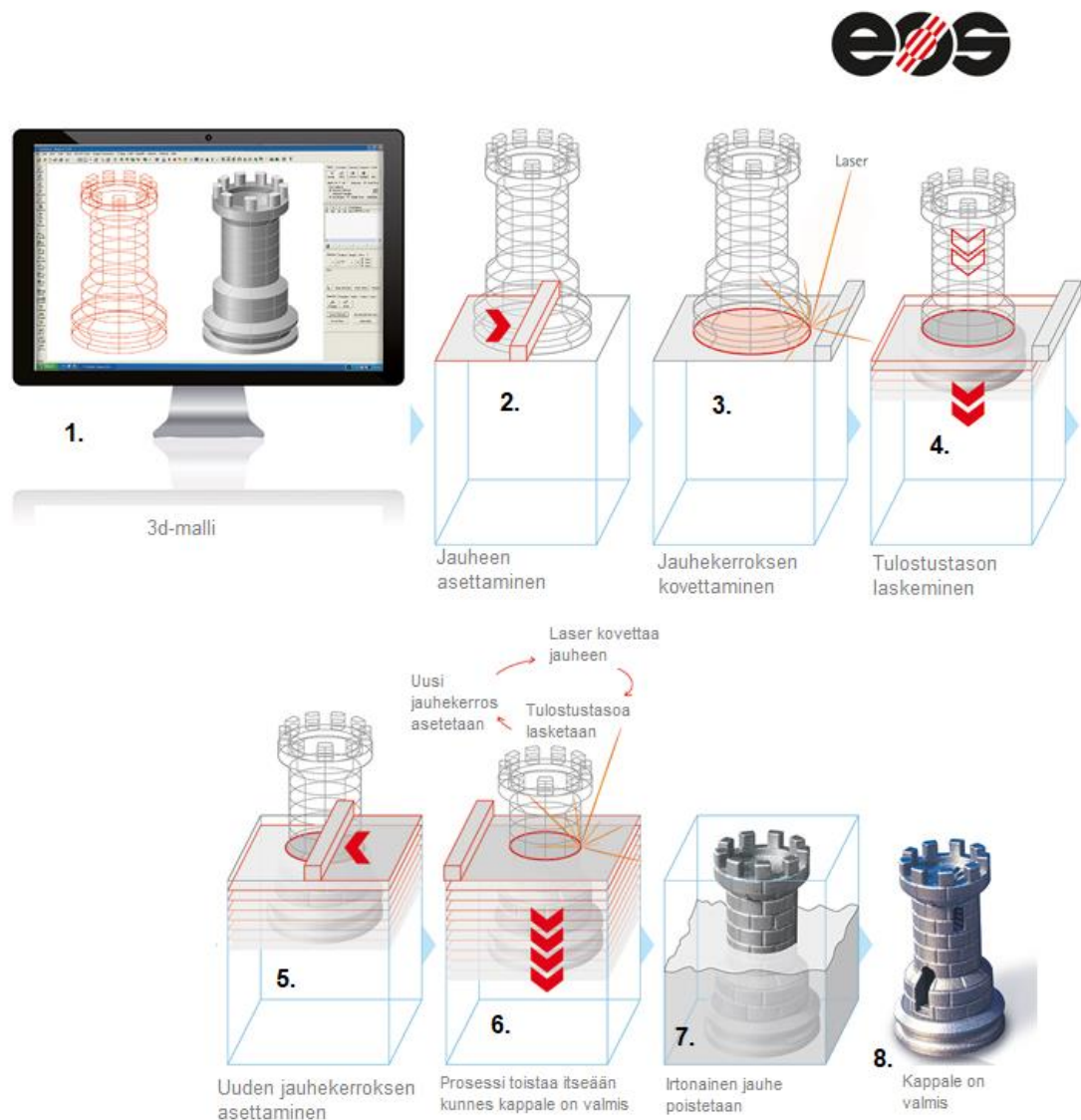
Osien lukumäärä	muutamia	kymmeniä	satoja	tuhansia
<b>Muovi</b>	3D-tulostaminen	3D tulostaminen tai CNC	CNC tai ruiskuvalaminen	ruiskuvalaminen
<b>Metalli</b>	3D-tulostaminen ja CNC*	3D-tulostaminen tai CNC	CNC, mahdollisesti vahamallivalaminen	Paine- tai vahamallivalaminen

\* : riippuu vahvasti kappaleen geometriasta ja vaatimuksista.

## 2.2 LPBF-teknologia

### 2.2.1 Toimintaperiaate

LPBF, eli Laser Powder Bed Fusion on ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jota käytetään 3D-metalliosien valmistamiseen käyttäen suuritehoisia lasersäteitä. Valmistusprosessin ensimmäisessä vaiheessa tulostustasolle (kutsutaan usein myös tulostuspediksi) lisätään ohut kerros jauhetta käyttäen apuna esimerkiksi pyyhintä. Laser, joka pystyy nostamaan lämpötilan jopa 1260 asteiseksi sulattaa metallijauheen CAD-tiedostossa määritettyjen koordinaattien mukaisesti. Työstötila on täytetty inertillä kaasulla koko valmistusprosessin ajan metallin hapettumisen estämiseksi. Kuvassa 2 SLM-tulostusprosessin (Selective Laser Melting) vaiheet numeroituna. [6]



Kuva 2. [muk. 6] SLM-tulostusprosessi havainnollistettuna kuvasarjan avulla.

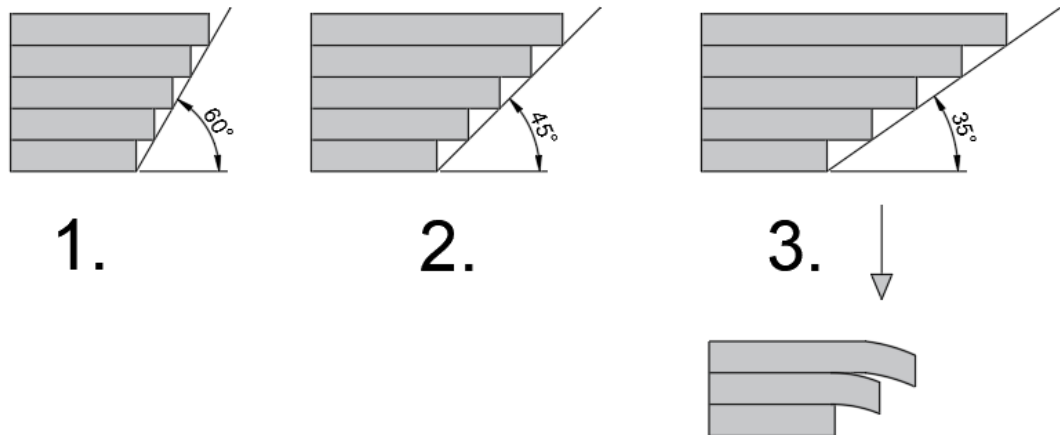
### 2.2.2 Huomioitavaa

Suunnitellessa LPBF-menetelmällä tulostettavaa kappaletta tulee huomioida useita asioita. Johtuen suurista lämpötilaeroista työstettävänä olevan kerroksen ja jo jäähtyneiden kerrosten välillä, tulostuksen aikana voi tapahtua ei-toivottuja ilmiöitä, kuten kappaleen vääristymiä, palamista tai kappaleen reunojen vääntymistä. Tämän välttämiseksi kappaleet tulostetaan riittävän paksun pohjalevyn päälle, joka joudutaan jälkikäteen irrottamaan. Kuvassa 3 nähdään esimerkki pohjalevyn päälle tulostetusta kappaleesta. [5]



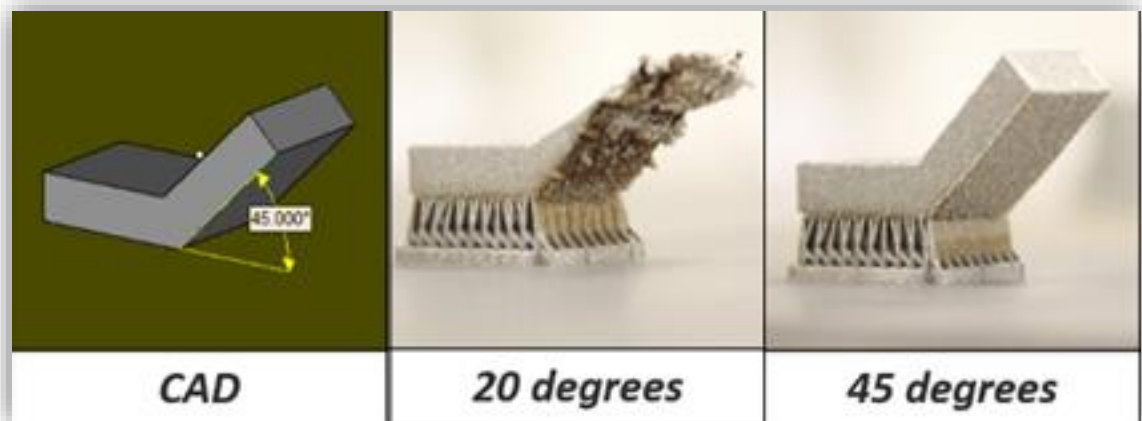
Kuva 3. [4] Pohjalevyn päälle tulostettu kappale.

Kuten aiemmin on mainittu, tulostus tapahtuu kerroksittain, ensimmäisen tulostuskerroksen kiinnittyessä pohjalevyyn, ja sen jälkeisten kerrosten niitä edeltäviin kerroksiin. Mikäli pyritään tulostamaan kappaletta, jonka reuna muodostaa liian pienen kulman vaakatasoon nähden (tulostustasoon) nähden, tulostaminen ei yleensä onnistu ilman tukimateriaalia. Yksinkertaisena pääsääntönä voidaan pitää "45 asteen sääntöä", joka tarkoittaa, että tulostaessa ei saisi syntyä alle 45 asteen kulmaa pohjalevyn ja tulostettavan geometrian välille (kuva 4)



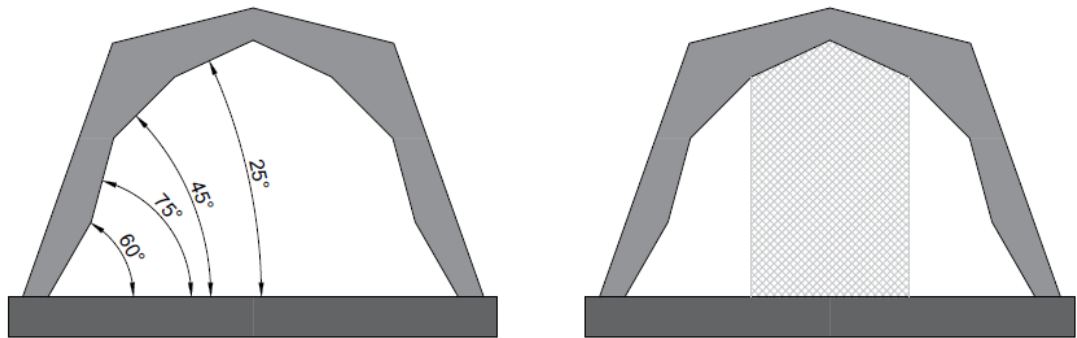
Kuva 4. Vasemmalta oikealle kaksi ensimmäistä tulostusta onnistuu ongelmitta. Kolmanteen geometriaan tarvitaan tukimateriaalia, sillä sen kulma vaakatasoon nähden alittaa 45 astetta reilusti. Mikäli tukimateriaalia ei käytetä, päällimmäiset materiaalikerrokset alkavat romahtamaan jauhepetiin.

Kuvassa 5 nähdään epäonnistuneesti tulostettu koekappale.



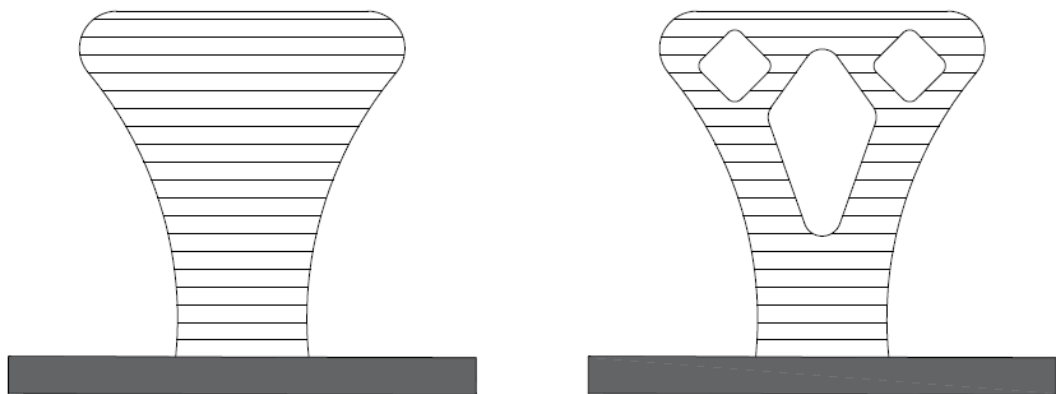
Kuva 5. [muk. 7] Ilman tukimateriaalia tulostettu yksinkertainen testikappale. Kappale ei ole tukenut itseään riittävästi, joten materiaali alkaa romahtamaan. Riittävän jyrkällä kulmalla tulostus onnistuu ongelmitta.

Kuvassa 6 havainnollistetaan piirretyn kappaleen avulla konkreettista tapausta, jossa tukimateriaalia on jouduttu lisäämään, jotta tulostaminen olisi mahdollista.



Kuva 6. Vasemmalla on ilmoitettu kunkin tason kulma pohjalevyyn nähden (kappale on symmetrinen). Oikealla olevassa kuvassa kappaletta on jouduttu valmistamaan käyttäen tukimateriaalia kohdassa, jossa 45 asteen sääntö ei täyty.

Kappaleissa ei tulisi myöskään olla suurta kasvua tulostuspinta-alassa kerrosten välillä. Prosessissa syntyvän lämmön haluttaisiin johtuvan tulostuksen pohjalevyn kautta koneen runkoon. Mikäli lämmöntuonti kasvaa äkillisesti, kaikki lämpö ei johdu toivotulla tavalla kappaleen läpi, vaan kappaleeseen syntyy suuria lämpökeskittymiä, ja siitä aiheutuneita jännityksiä. Liian suuret jännitykset puolestaan aiheuttavat kappaleisiin muodonmuutoksia, ja pahimmillaan tulostuksen epäonnistumisen. Kuvassa 7 havainnollistetaan esimerkkitapausta, jossa suunnittelussa on huomioitu kappaleen valmistusmenetelmän olevan 3D-tulostaminen.



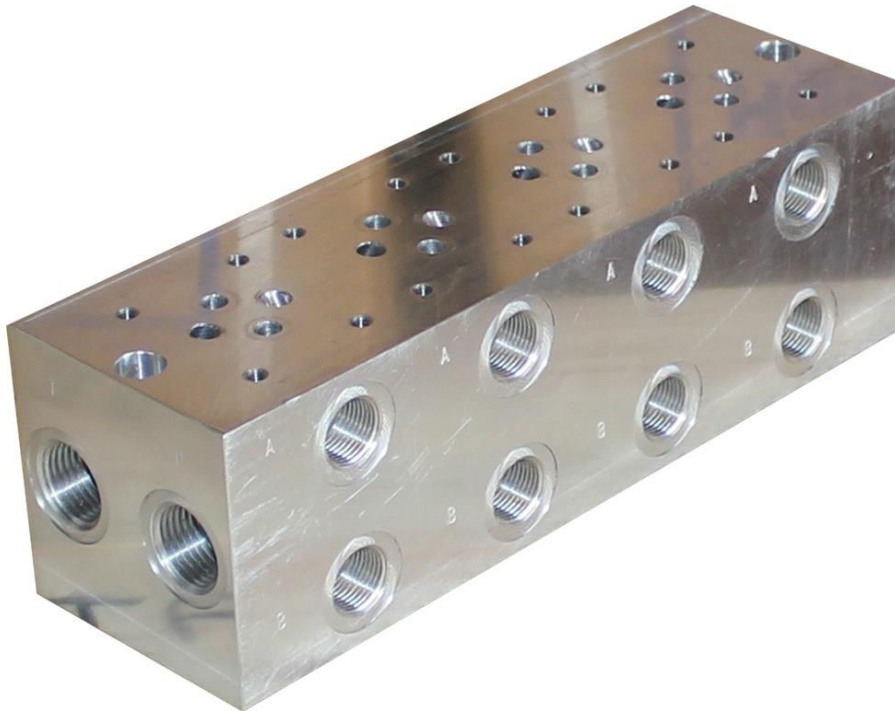
Kuva 7. Kappaleen sisäistä rakennetta kevennetty suurten materiaalikeskittymien välttämiseksi. Sisäisissä muodoissa on otettu huomioon tukimateriaalin käytön välttäminen.

### 3 Työn tavoitteet

#### 3.1 Tavoitteet yleisesti

Suunnittelussa tuli noudattaa DFA-periaatetta, sillä työ oli osa laajempaa kokonaisuutta, jossa robottikokoonpanosolu koota ja purkaa paineenkohotinta.

Paineenkohottimen topologia tuli optimoida 3D-tulostamista varten. Topologiaoptimoinnilla tavoiteltiin perinteistä hydraulikkalohkoa (kuva 8) kevyempää rakennetta. Topologian optimointi joudutaan huomioimaan jo suunnitteluvaiheessa, jotta tulos täyttää vaaditut kriteerit.



Kuva 8. <sup>[8]</sup> Perinteinen hydraulikkalohko. Kappaleen kokonaismassa on usein suuri, sillä kappale on valmistettu koneistamalla umpinaiseen lohkoon kanavia, ja seinämäpaksuus jää useissa kohdissa tarpeettoman suureksi.

#### 3.2 DFA-periaatteen huomioiminen

DFA (Design for Assembly) yksinkertaistettuna tarkoittaa suunnittelua kokoonpanoa varten. Paineenkohottimen suunnittelussa tuli ottaa huomioon automaattinen kokoonpantavuus robotin avulla, joten osien tuli olla helposti tartuttavia ja asennettavia, sekä niiden lukumäärä tuli minimoida.

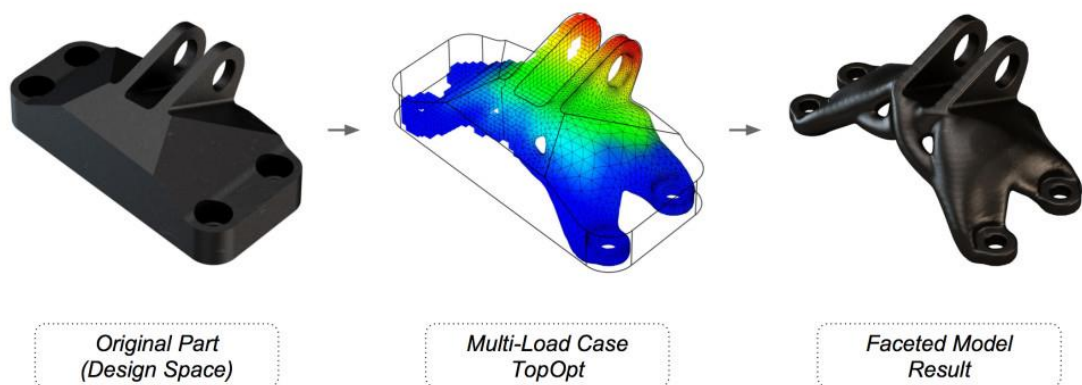
### 3.3 Topologiaoptimointi yleisesti

Topologian optimointi tarkoittaa rakenteiden optimointia. 3D-tulostaminen tarjoaa mahdollisuuksia valmistaa hankalan muotoisia kappaleita, joista saadaan huomattavasti kevyempirakenteisia kuin perinteisillä valmistustavoilla, kuten valamalla tai takomalla. Nykymarkkinoilla on tarjolla useita eri ohjelmistoja, joiden avulla optimoinnin voi suorittaa.

Optimoinnissa ohjelmisto pyrkii luomaan mallista verkkomaisen ristikkorakenteen, jossa kuormia kantavat sauvaelementit. Ohjelmistot pyrkivät itse selvittämään tarpeellimmat sijainnit materiaalille, eikä rakenteen muotoja ole etukäteen määrätty. Optimointi ei kuitenkaan onnistu ilman osaavia suunnittelijoita, sillä suunnittelijan tulee asettaa reunaehdot optimoinnille. Reunaehtoja ovat esimerkiksi tietyt alueet, joita optimointi ei saa poistaa, esimerkiksi kiinnityspisteet, sekä suurimmat sallitut jännitykset annettujen kuormitusten alaisena.<sup>[9]</sup>

Tulokseksi saatu geometria ei yleensä sovellu sellaisenaan valmistettavaksi, sillä rakenne on usein epäesteettinen ja liian yksityiskohtainen (kuva 9). Suunnittelija voi kuitenkin analyysin pohjalta kehittää esteettisen, mutta optimoidun rakenteen.<sup>[9]</sup>

Suunnittelussa valittiin käytettäväksi topologian optimointiin Siemens NX -mallinnusohjelmistoon integroitua topologiaoptimointityötilaa. Suunnitellessa optimoitavaa rakennetta joudutaan huomioimaan ohjelmiston mahdollisuudet ja rajoitteet.



Kuva 9.<sup>[10]</sup> Kappale on optimoitu 3D-tulostamista varten Generate-ohjelmistolla. Vasemmalla alkuperäinen suunniteltu rakenne, keskellä rakenteelle on luotu kuormitustilanteita, joiden avulla on suoritettu topologian optimointi. Rakenne on kuitenkin sellaisenaan kelpaamaton valmistettavaksi, ja lopullinen optimoitu kappale näkyy oikealla.

## 4 Konseptointi

### 4.1 Rajoitteet

Konseptin, eli paineenkohottimen tyyppi tuli valita muutamassa päivässä, ja toimittaa välittömästi robottisolun parissa työskentelevälle projektiryhmälle.

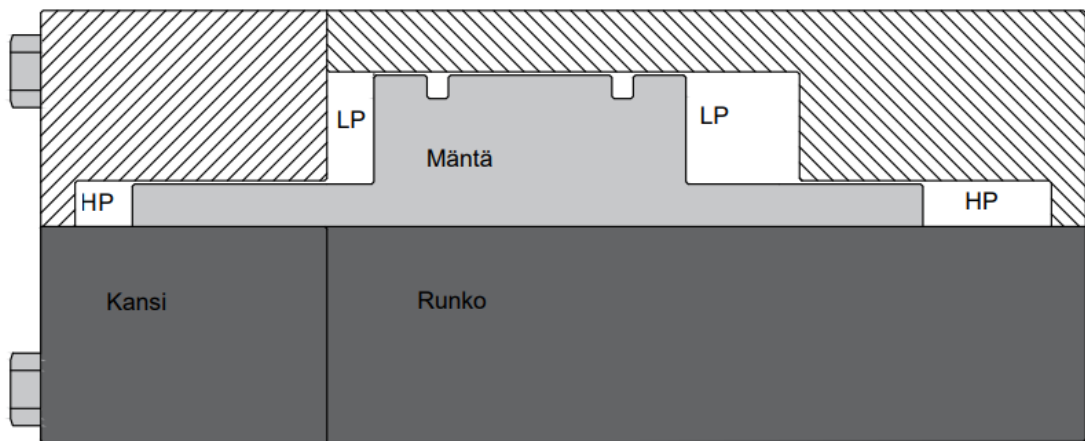
Etteplan Oyj:n toimesta annettiin taulukossa 2 esiintyvät reunaehdot;

Taulukko 2. Työn reunaehdot.

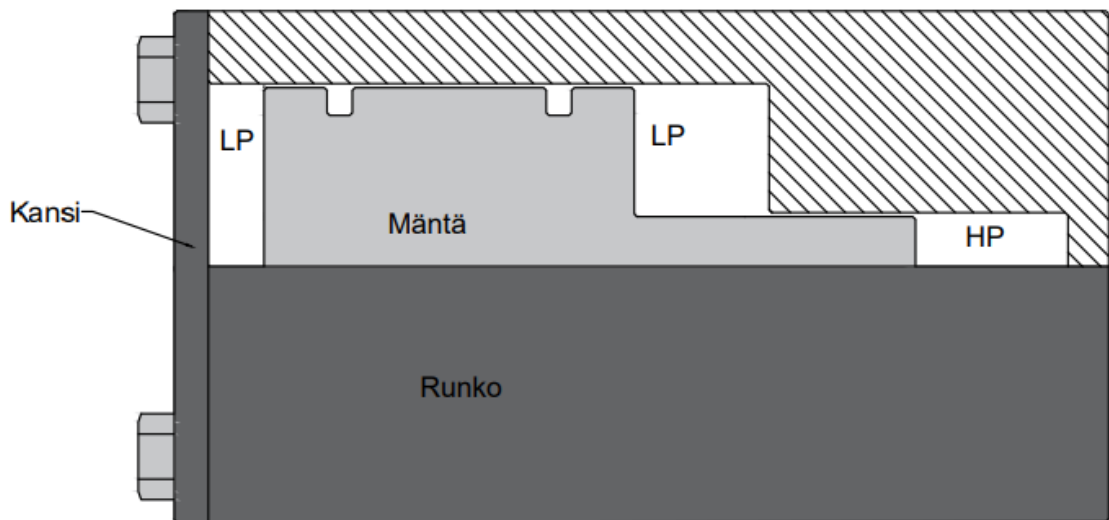
Tilavuusvirta (pumpun)	20 l / min
Tulopuolen paine	330 bar
Korkeapaine	700 bar
Mallinnusohjelmisto	Siemens NX
3D-tulostusteknologia	LPBF (SLM)
Tulostusmateriaali	AISI 316L / EOS MS1 / Titaani (UNS R56401)

## 4.2 Konseptin valinta

Valinta tapahtui kahden konseptin väliltä: läpimenevällä männänvarrella varustettu, kaksitoiminen paineenkohottaja (kuva 10), tai yksitoiminen sylinterirakenne (kuva 11). Toimintaperiaate molemmissa rakenteissa on sama, joskin kaksitoiminen rakenne vaatii komponentilta huomattavasti enemmän pituutta, sekä hankaloittaa kanavoinnin suunnittelua, kun korkeapainelinjoja joudutaan viemään tiivistetyn kannen läpi. Signaali venttiilille vietään uritetun männän avulla.



Kuva 10. Käytettäessä läpimenevää männänvartta joudutaan korkeapainekanavat (HP) yhdistämään yhteen ulostulolinjaan. Korkeapainelinjan tulee kestää 700 barin painetta, eikä vuotoja saisi esiintyä.



Kuva 11. Yksitoiminen sylinterirakenne ei vaadi korkeapainelinjan viemistä tiivistetyn kannen läpi.

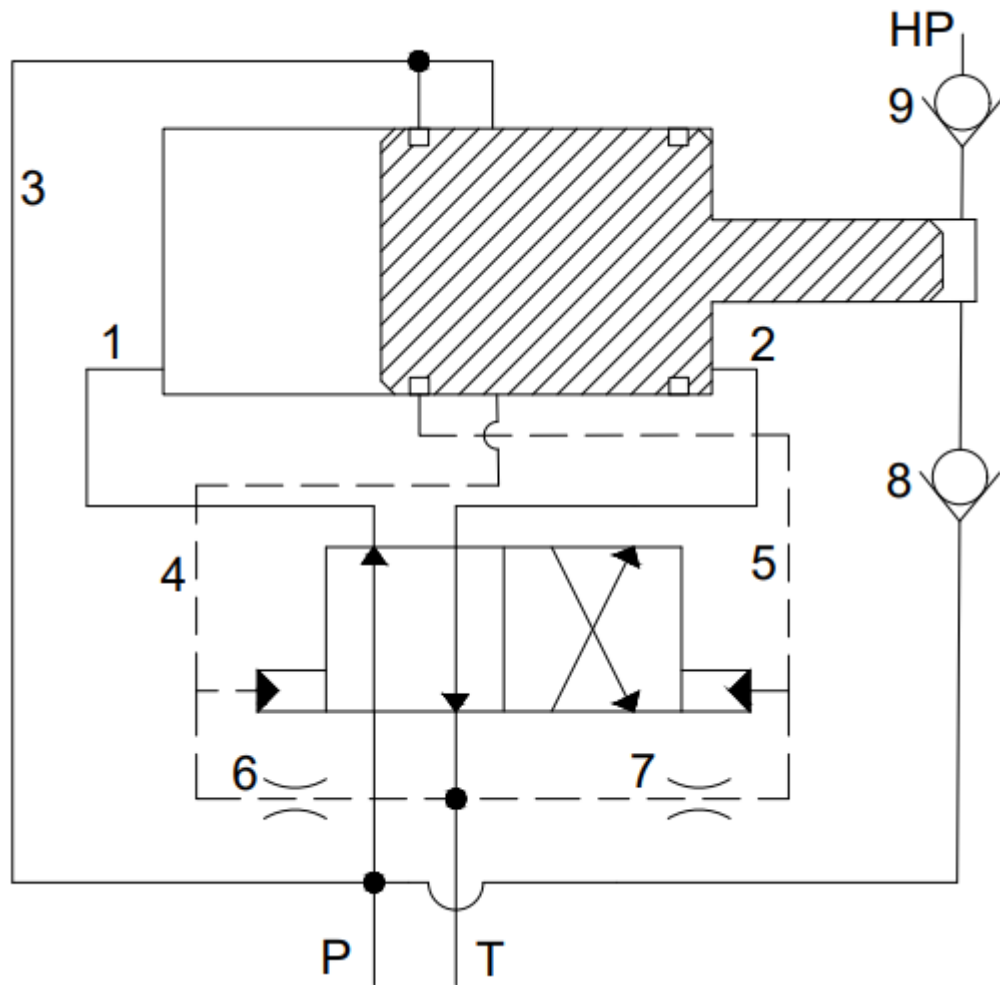
Paineenkohottajan toiminta perustuu edestakaiseen sylinterin liikkeeseen, jossa isompaan kammioon tuodaan pumpun tuottama paine, joka puristaa pienemmän kammion fluidin korkeampaan paineeseen pinta-alasuhteen mukaisesti. Paineiden suhde on siis suoraan verrannollinen pinta-alojen suhteeseen, joka on annettujen reunaehtojen puitteissa  $\sim 2,15$ .

Rakenteiden välinen valinta osoittautui hankalaksi, sillä molemmilla rakenteilla oli sekä hyviä että huonoja ominaisuuksia. Sylinteri tulee kummassakin tapauksessa tiivistää hydraulikkalohkon sisälle, joten jonkinlainen kansi on rakenteelle välttämätön. Kaksitoiminen rakenne vaatii tästä johtuen osan kanavistosta kulkevan tiivistävän kannen läpi, joka puolestaan luo lisää mahdollisia vuotoreittejä ja kasvattaa vaadittujen osien lukumäärää. Etuina kaksitoimisessa rakenteessa on jatkuva ja tasainen tilavuusvirran tuotto, sekä alhaisempi värähtelytaajuus verrattuna yksitoimiseen rakenteeseen, sillä kaksitoimisessa rakenteessa jokainen isku tekee hyödyllistä työtä, kun puolestaan yksitoimisessa rakenteessa vain joka toinen liike on työtä tekevä.

Konseptiksi valittiin yksitoiminen sylinterirakenne, jota puolsivat DFA-periaatteen noudattaminen, sen tarjoama lyhyempi rakennepituus sekä helpompi kanaviston suunnittelu. Haittapuolina rakenteessa on korkeampi värähtelytaajuus, epätasaisempi massan jakautuminen, sekä huonompi kokonaistuotto komponentin kokonaismassaan suhteutettuna.

## 5 Suunnittelutyö

Suunnittelutyön aluksi luotiin hydraulikkakaavio laitteesta (kuva 12).



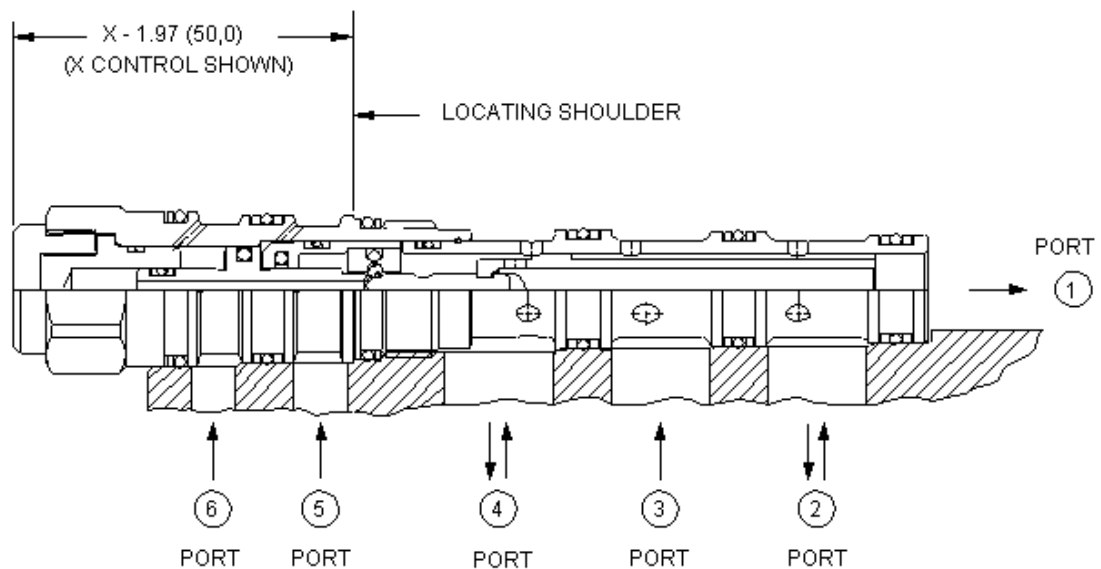
Kuva 12. Alustava hydraulikkakaavio. Linjat 1 ja 2 kulkevat venttiililtä sylinterille, ja saavat aikaan sylinterin edestakaisen liikkeen. Linjassa 3 on jatkuva paine, ja sopivasti uritetun männän osuessa sylinterissä olevien liityntöjen kohdalle, fluidi pääsee antamaan signaalin venttiilille vaihtaa asentonsa kanavien 4 ja 5 kautta. Kanaville 4 ja 5 on suunniteltu pienet vuototiehyet, jotka on varustettu kuristimin (6 ja 7), jotta mahdollisesti kanavaan jäänyt paine ei pääse jumiuttamaan venttiiliä. Lisäksi tuloliitynnästä lähtee oikeaa laitaa pitkin liityntä, joka täyttää pienen sylinterikammion öljyllä männän tehdessä palautusliikettä. Pieni sylinterikammio on varustettu molemmin puolin vastaventtiilein, jotta fluidi ei pääse virtaamaan väärin suuntiin.

## 5.1 Komponenttien valinta

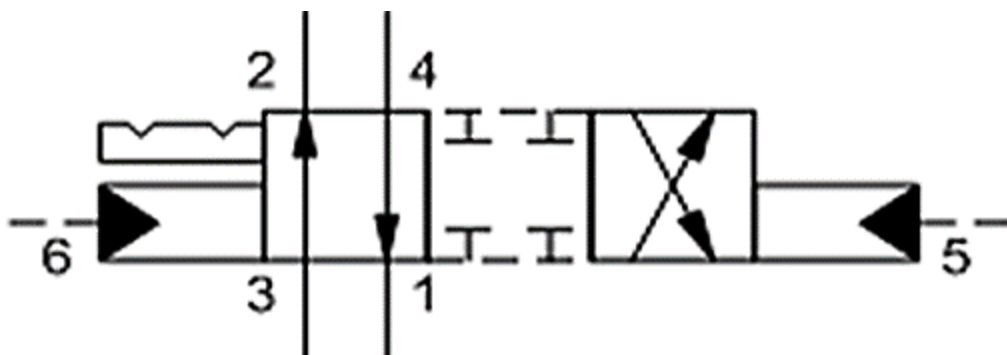
Hydrauliikkakaavion valmistuttua punnittiin mitkä komponentit kannattaa suunnitella ja valmistaa itse, ja mitkä tilata ulkoisilta tahoilta. Aikataulun ollessa erittäin kiireinen, mahdollisimman paljon osia pyrittiin tilaamaan ulkoisilta toimijoilta.

### 5.1.1 4/2 - suuntaventtiili

Suuntaventtiiliksi valittiin Sun Hydraulicsin bi-stabiili patruunaventtiili (kuvat 13 ja 14). Venttiilin maksimivirtauskapasiteetti on 37,85 - 49,21 l/min, paineenkesto 350 bar, ja päämitat  $\varnothing 25,7 \times 130,5$  mm. <sup>[11]</sup> Tässä vaiheessa päätettiin samalla lohkon tulo- ja poistoliityntöjen kierrekooksi G3/8 ”.



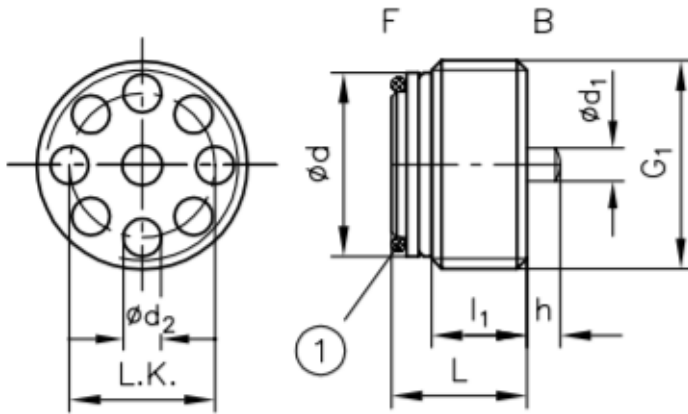
Kuva 13. <sup>[11]</sup> Havainnekuva patruunaventtiilin ulkomuodosta ja liityntöjen sijainneista. Kuvaan 12 vertaamalla nähdään porttien merkitykset.



Kuva 14. <sup>[11]</sup> Sun Hydraulicsin tyyppin DCCD suuntaventtiilin piirrosmerkki.

### 5.1.2 Vastaventtiilit

Vastaventtiilit valittiin HAWEn katalogista (kuvat 15 ja 16). Kriteereinä olivat paineenkesto 700 bar, matala aukeamispaine, pieni koko sekä riittävä virtauskapasiteetti. Venttiilit olivat tyyppiä RK1<sup>[13]</sup>, joka tarkoittaa, että kierteen asennus tapahtuu virtaussuuntaa vasten. Venttiileiden paineenkesto on 700 bar, avautumispaine 0,18 bar, ulkokierre G1/4"-19, kokonaispituus 11,5 mm, ja virtauskapasiteetti 20 l / min.



Kuva 15. <sup>[12]</sup> Havainnekuva vastaventtiilin ulkomuodosta.



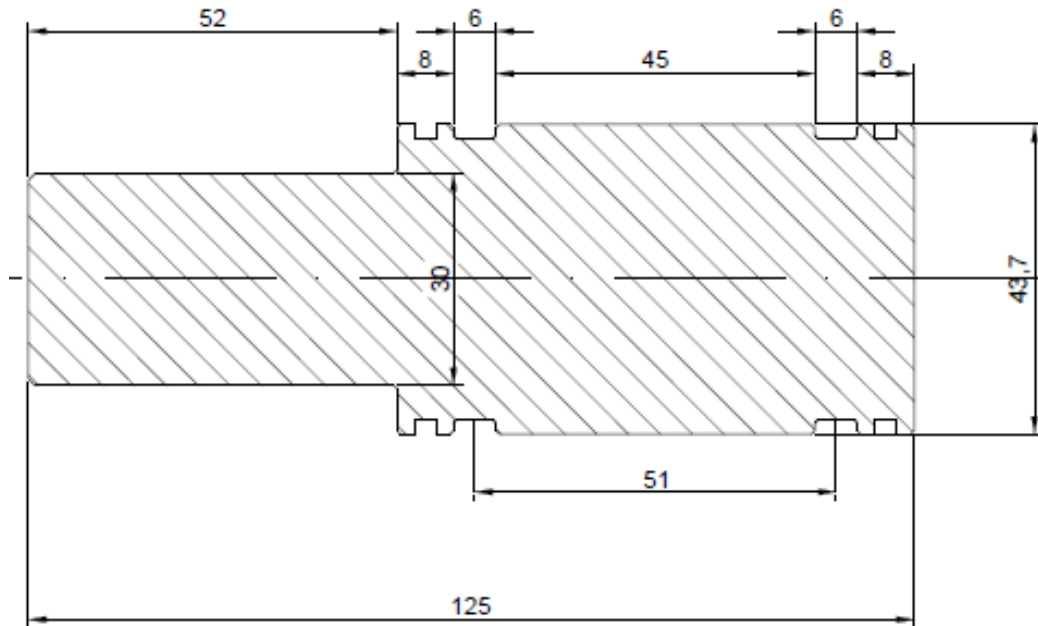
*Screw-in cartridge*

Kuva 16. <sup>[12]</sup> HAWEn katalogista haettu kuva vastaventtiilistä.

## 5.2 Lohkon suunnittelu

### 5.2.1 Männän mitoitus

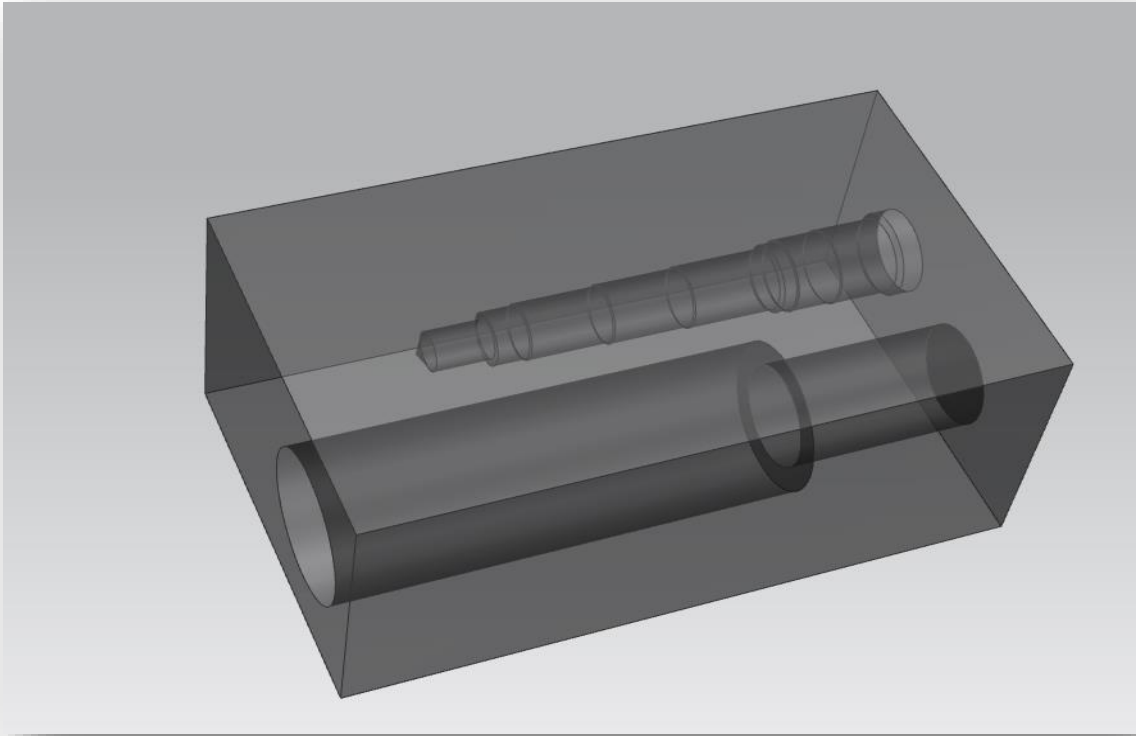
Männän mitoituksessa tuli ottaa huomioon värähtelytaajuus, massa sekä ulkomitat. Eri-laisia arvoja kokeilemalla päästiin hyvään tasapainoon tilavuuden ja värähtelytaajuuden suhteen. Pienemmän männän halkaisijaksi valittiin 30 mm, ja isomman männän halkai-sijaksi sen seurauksena tuli ~ 43,7 mm (kuva 17). Iskunpituudeksi valittiin 35 mm.



Kuva 17. Hahmotelma männän mitoituksesta (poikkileikkaus).

### 5.2.2 Tulostussuunnan valinta

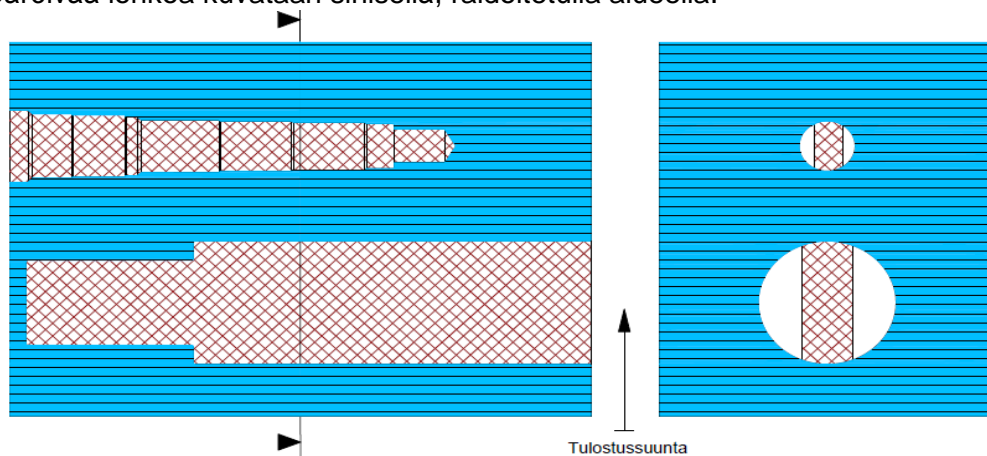
Sylinterikammion, sekä Sunin patruunaventtiin sijainnit valittiin ensin. Mallinnusohjel-mistoon piirrettiin aluksi reunaehtojen mukainen lohko, johon sijoitettiin edellä mainitut poterot (kuva 18). Tulostussuunta oli valittava jo tässä vaiheessa, johtuen tulostamisen teknisistä rajoitteista, sillä muun muassa kanavisto on suunniteltava niin, että sen tulos-taminen onnistuu käyttämättä tukimateriaalia. Tukimateriaalin poistaminen lohkon sisäi-sistä kanavista on lähes mahdotonta.



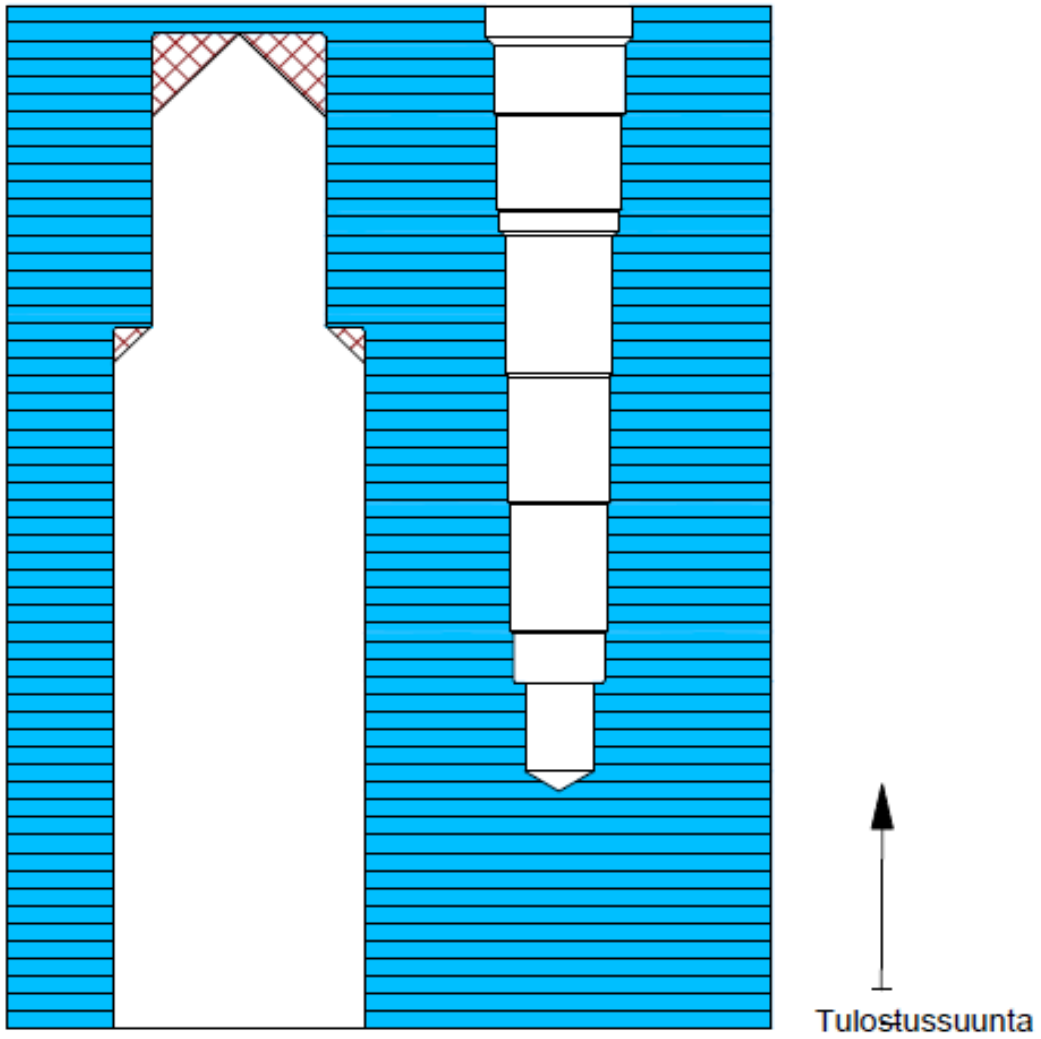
Kuva 18. Reunaehdoiksi annettujen mittojen kokoinen lohko, johon on tehty mäntää ja patruunaventtiiliä varten sopivat poterot.

### 5.2.3 Tukimateriaalin käyttö

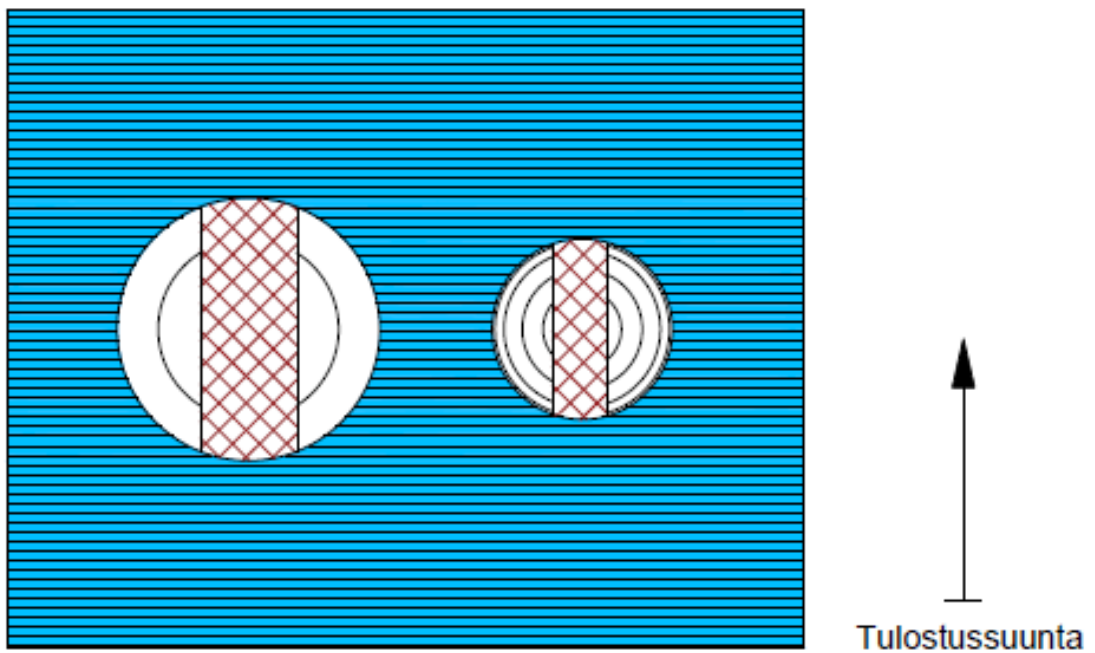
Tulostettaessa sylinterikammiota ja patruunaventtiin poteroa pystysuunnassa, tukimateriaalia tarvitaan vain vähäinen määrä. Huomioon otettiin kuitenkin myös tulostuskorkeus, sillä kyseessä oli yksittäiskappale, joka veisi vain vähän tulostuspinta-alaa. Tulostussuunnaksi rajattiin sen seurauksena poteroiden vaakatasossa tulostaminen (kuvat 19 ja 21). Kuvissa 19-21 punainen verkotus kuvastaa tarvittavaa tukimateriaalia, ja sitä ympäröivää lohkoa kuvataan sinisellä, raidoitetulla alueella.



Kuva 19. Vaihtoehto 1, molemmat kammiot täynnä tukimateriaalia, joka joudutaan poistamaan koneistamalla, lisäksi tulostuksesta tulee kohtuullisen korkea.



Kuva 20. Vaihtoehto 2, rakenteesta tulisi todella korkea, tukimateriaalin määrä vähäinen.

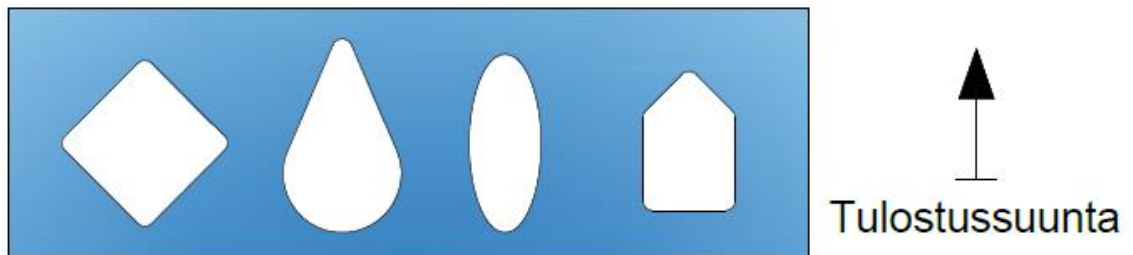


Kuva 21. Vaihtoehto 3, käytännössä samat tukimateriaalit kuin kuvassa 19, mutta tulostuskorkeus

Vaihtoehtoja puitiin yhdessä opinnäytetyön ohjaajan kanssa, ja päädyttiin valitsemaan tulostussuunnaksi kuvassa 21 esiintyvä tulostussuunta (vaihtoehto 3). Päätöstä tukivat seuraavat seikat: kammiot joudutaan joka tapauksessa koneistamaan puhtaiksi tulostamisen jälkeen, joten kammiossa oleva ylimääräinen tukimateriaali ei aiheuttaisi suurta haittaa. Vaihtoehdon 2 tulostuskorkeus oli todella pitkä, joten kyseinen vaihtoehto rajattiin pois. Vaihtoehtojen 1 ja 3 välinen valinta tehtiin tulostuskorkeuden perusteella.

#### 5.2.4 Kanaviston suunnittelu

Kanaviston suunnittelussa oli huomioitava virtausnopeudet, kanavien kulmat (virtausvastukset), kanavien pituus sekä tukimateriaalin tarve. Aluksi kartoitettiin itsensä tukevat profiilit virtauskanaville. Joitakin vaihtoehtoja nähdään kuvassa 22. Kuvassa 23 on puolestaan profiileja, joiden tulostaminen ei onnistu ilman tukimateriaalia. <sup>[4]</sup>



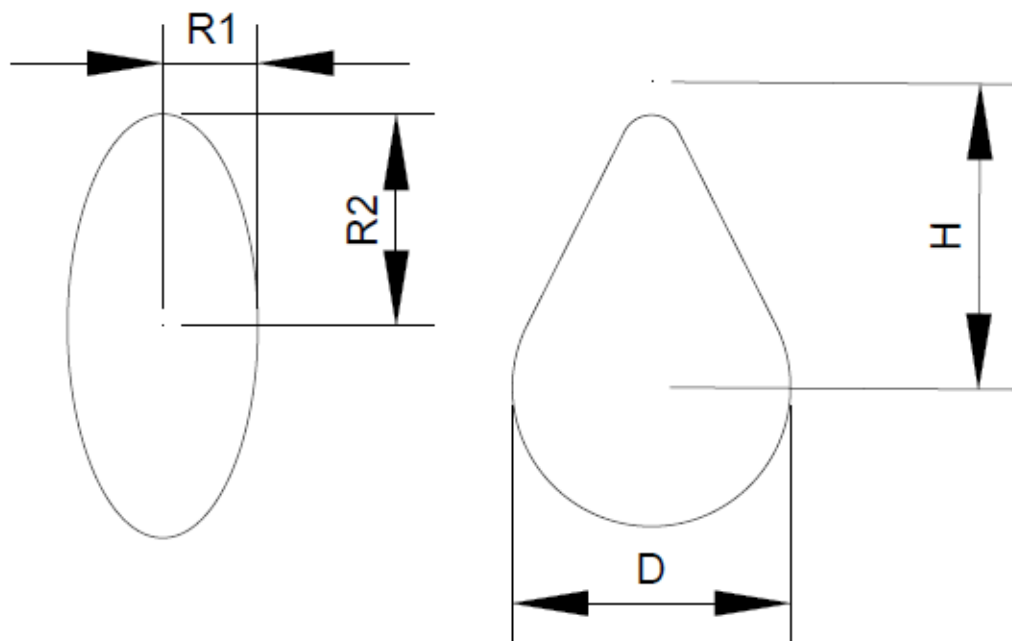
Kuva 22. Tulostussuunnan ollessa alhaalta ylös, kuvassa näkyvien muotoisten kanavien tulostaminen onnistuu ilman tukimateriaalia. Myös pyöreitä reikiä, joiden halkaisija on hyvin pieni, on tulostettu onnistuneesti käyttämättä tukimateriaalia. <sup>[4]</sup>



Kuva 23. Kuvassa näkyvien profiilien muotoisten kanavien tulostaminen käyttämättä tukimateriaalia ei onnistu ongelmitta.

Kanavistossa käytettiin kyynel- ja ellipsiprofiileja. Lisäksi pyrittiin suosimaan alle 90 asteen käännöksiä ja suuria pyöristyssäteitä nurkissa, jotta virtausvastukset eivät olisi suuria.

Kanavat mitoitettiin niin, että niissä esiintyvät virtausnopeudet olisivat sopivia, tavoitteena oli saavuttaa nopeudeksi 5 - 7 m/s. <sup>[14]</sup> Isoon sylinterikammioon kytkeytyneet työntö- ja palautusliikkeen kanavat mitoitettiin tilavuusvirran 20 l/min mukaisesti, ja pienen sylinterikammion liittynät 10 l/min mukaan. Poikkileikkauksen muodoksi molempiin kanaviin valittiin elliptinen profiili, ja lisäksi pientä sylinterikammiota täyttävä korkeapainelinjaa edeltävä matalapainelinja mallinnettiin käyttäen kyynelprofiilia. Kuvassa 24 nähdään profiilien muodot, ja taulukossa 3 niihin liittyviä arvoja.



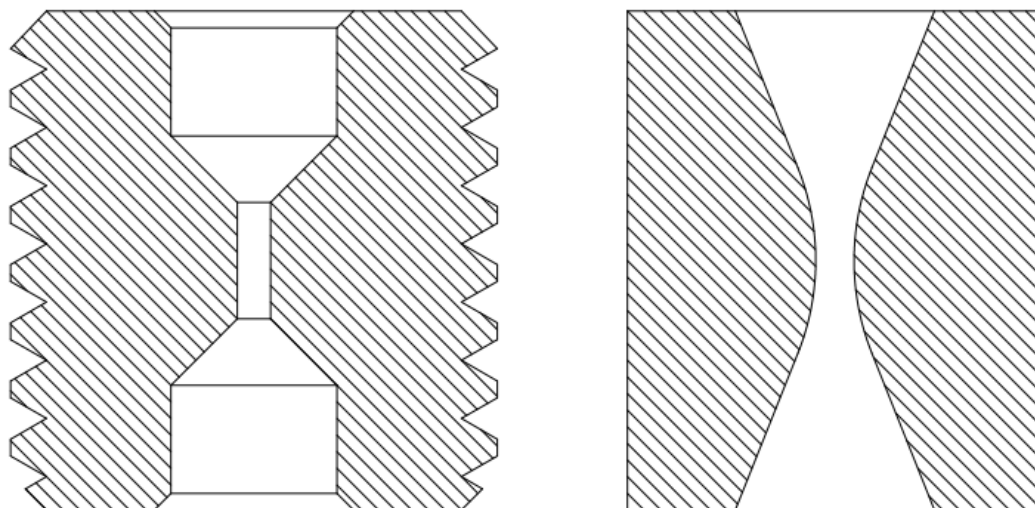
Kuva 24. Profiilien havainnekuvat taulukkoa 3 varten. Huom. kyynelkanavan pyöristyssäde ylhäällä on R0,5 mm.

Taulukko 3. Virtauskanavien profiilit ja virtausnopeudet.

Profiili	Mitat	Pinta-ala (mm <sup>2</sup> )	Tilavuusvirta (l/min)	Virtausnopeus (m/s)
Ellipsi	R1 = 2,5 R2 = 3,5	27,5	10	6,1
Ellipsi	R1 = 3 R2 = 6	56,5	20	5,9
Kyynel	D = 6 H = 4,5	30,7	10	5,4

Kesken projektin myös havaittiin, että virtaventtiileiden (kuristimien) korvaaminen sopivasti tulostettujen kanavien avulla (kuva 25) vähentäisi onnistuessaan tarvittavien osien, ja koneistusvaiheiden lukumäärää. Virtaventtiilit asennetaan normaalisti kierteitettyyn reikään, ja reikä tulpataan erillisellä tulpalla, mutta rakenteen sisälle tulostetun kanavan voi esimerkiksi johtaa suoraan poistoliityntään mikä poistaa tulpan ja kuristimen tarpeen

ja vähentää tarvittavien osien lukumäärää. Asiassa kuitenkin aiheutti pientä huolta kanavien puhdistaminen, sillä ne jäisivät tulostuksen jälkeen täyteen metallijauhetta. Kuristukset päätettiin kuitenkin valmistaa, sillä onnistuessaan menetelmä olisi erityisen hyödyllinen.



Kuva 25. Vasemmalla perinteisissä hydraulikkalohkoissa käytetty pienikokoinen kuristin. Oikealla vaihtoehtoinen menettelytapa, kun kanava valmistetaan AM-menetelmillä. Kanavan kuristaminen ei vaadi erillisiä työkaluja, eikä ulkoista tulppaa. On kuitenkin huomioitava, että mikäli käytetään pyöreää poikkileikkausta, pienten kuristimien tulostus onnistuu parhaiten pystysuunnassa.

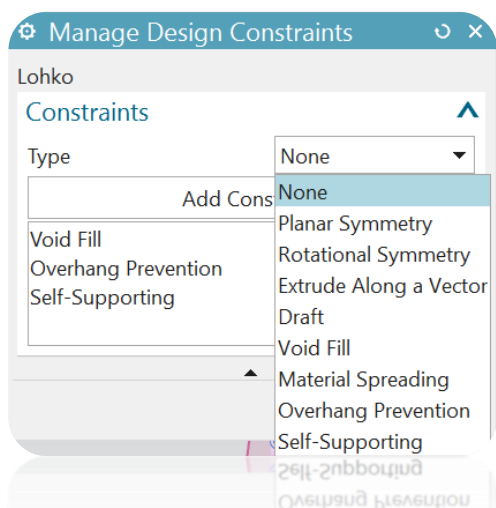
### 5.2.5 Siemens NX TopOpt

Siemens NX sisältää kaksi erilaista topologiaoptimointityökalua. Toinen löytyy FEM-työtilan puolelta, ja soveltuu paremmin erilaisiin käyttökohteisiin, sillä kyseisen optimoinnin päätteeksi ei saada kuin laskennallisia tuloksia. Toinen työkaluista on Frustumin valmistama Generate-optimointityökalu, joka soveltuu erittäin hyvin 3D-tulostettavien kappaleiden suunnitteluun, ja ohjelmiston avulla on mahdollista saada aikaiseksi jopa CAD-malleja, jotka eivät vaadi jälkikäsittelyä. Generate-ohjelmisto on integroitu Siemens NX:n käyttöliittymään, ja sen työkalut löytyvät TopOpt-nimisen valikon alta.

Työtilassa määritetään seuraavat asiat; suunnitteluehdot: (Design constraints), optimoitavien piirteiden ehdot (Optimization feature constraints), kuormat (Load cases) ja materiaali.

Topologian optimointi käyttäen Siemens NX- ohjelmistoon rakennettua topologiaoptimointityötilaa on varsin suoraviivaista.

Ensin valitaan kappaleita, joista yksi valitaan suunnittelualueeksi (Design space), joka rajaa tilan, minkä sisällä optimointi tapahtuu. Kappaleelle tulee valita materiaali, ja ohjelmistossa onkin kattava materiaalikirjasto, josta useimmat yleiset materiaalit löytyvätkin kirjastosta jo valmiiksi. Lisäksi voidaan valita suunnittelu-ehdoja (kuva 26), joita ovat taso-symmetria (Planar symmetry), pyörähdyssymmetria (Rotational symmetry), Extrude Along a Vector (vektorin suuntainen pursotus), päästökulma ja -taso (Draft), tyhjiöiden täyttö (Void Fill), materiaalin levittäminen (Material spreading), ulkonemien ehkäisy (Overhang Prevention) ja itsensä tukeva rakenne (Self supporting).



Kuva 26. Suunnittelu-ehdovalikko NX:n topologiaoptimointityötilassa.

*Self-Supporting vaihtoehto on erittäin hyödyllinen suunnittellessa 3D-tulostettavaa kappaletta. Vaihtoehdon ollessa päällä optimointi pyrkii luomaan geometrian sellaiseksi, ettei tukimateriaalia tarvita.*

Seuraavaksi asetetaan halutuille piirteille ehtoja. Ehtoja on kolmenlaisia, säilyttää piirre muuttumattomana alueen sisällä (In), poistaa piirre alueelta täysin (Out), tai luoda kuori piirteen ympärille (Shell). Lisäksi kaikille piirteille voi antaa siirtoetäisyyden (Offset). Jos esim. putken ympärille halutaan tietyn paksuinen kuori (kun käytetään Shell-valintaa), annetaan mitta Offset-kenttään. Lisäksi tässä vaiheessa on annettava sopivat reunaehdot piirteille, eli kiinnitettävä jokin piirre.

Seuraavaksi asetetaan piirteille kuormat. Vaihtoehtoina ovat voima (Force), paine (Pressure), tai vääntömomentti (Torque).

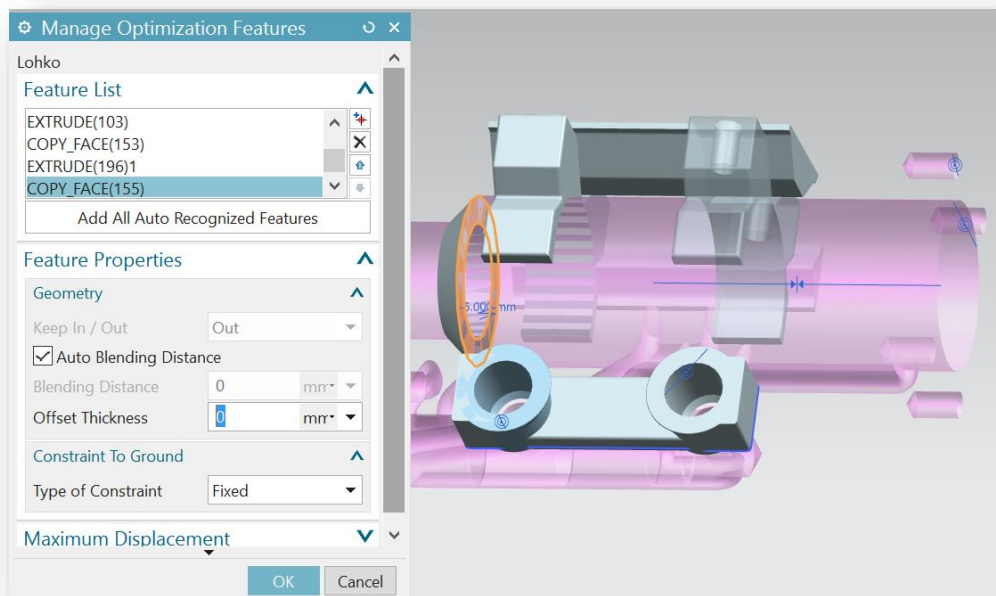
Kun kaikki ehdot on täytetty, päästään itse optimoinnin aloitukseen. Tavoitteita on kolme erilaista: minimoidaan muodonmuutosenergia massatavoitteen puitteissa (Minimize strain energy subject to mass target), pyritään luomaan mahdollisimman vähän tilaa vievä rakenne noudattaen tiettyä minimivarmuuslukua (Minimize volume subject to material safety factor) tai pyrkiä mahdollisimman suureen ominaisvärähtelytaajuuteen rakenteen massatavoitteen puitteissa (Maximize natural frequency subject to mass target).

Optimoinnissa ei voi valita lujuuslaskennassa käytettyä elementtityyppiä, eikä siihen liittyviä parametreja. Ainoana muuttujana ohjelmistossa valitaan geometriaelementtien minimikoko. Kun optimointi on valmis, saadaan tuloksiksi venymät, Von Misesin vertaalu-jännitykset sekä itse kappaleen pintamalli.

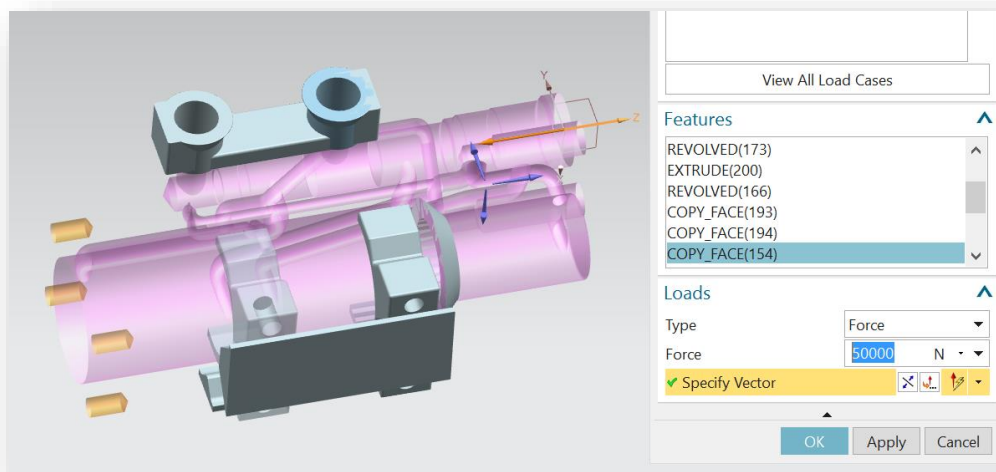
Tässä työssä reunaehdoiksi asetettiin itsensä tukeva rakenne, ulkonemien ehkäisy, sekä tyhjiöiden täyttäminen. Materiaaliksi valittiin valmiista materiaalikirjastosta titaaniseos (Titanium Alloy).

Seinämävahvuudet määriteltiin seuraaviksi: sylinterikammion kevyemmän paineen puoli ja patruunaventtiin potero 3,25 mm, matalapainekanaavisto 2 mm, korkeapainepuoli sylinterikammion ja korkeapainekanaavat 4 mm, liittimien ympärykset 5 mm. Lisäksi lohkon sisälle asetettiin säilytettäväksi useita piirteitä koneistamista, robotin tartuntaa ja kappaleen kiinnittämistä varten. Lisäksi koneistettaville sisäpinnoille jätettiin 0,5 mm seinämävahvuutta koneistustyötä varten, mikä perustui ohjaavan yrityksen ohjeistukseen. Seinämävahvuudet valittiin kanaaviston osalta hieman tarpeettoman paksuiksi, sillä topologiaoptimointeja jouduttiin tehdä useita kymmeniä, ja niiden kesto oli riippuvaista piirteiden tarkkuudesta (pienet piirteet vaativat pienen elementtikoon, joka puolestaan kasvattaa laskenta-aikaa merkittävästi). Myöskään liittimien ympärykset eivät lujuuden puolesta vaatisi viiden millimetrin seinämää, mutta tiivisteensä puolesta kylläkin. Lisäksi oli huolehdittava rakenteen jäykkyydestä koneistusta ajatellen.

Sylinderikammion pohja kiinnitettiin jäykästi optimoinnissa (kuva 27). Kuormitustapauksiksi asetettiin korkeapainekanaaviin 700 bar, matalapainekanaaviin 330 bar oikeille pinoille, 50 kN voima kannen kierteisiin poispäin lohkosta (kuva 28), jolla pyrittiin korvaamaan tiivistetyn kannen aiheuttamaa vetovoimaa (laskettu paineen ja kannen painepinta-alan avulla) sekä 75 Nm vääntömomentti patruunaventtiilin kierteen. Optimointi suoritettiin käyttäen vaihtoehtoa ”Minimize strain energy subject to mass target”, ja elementtikokoa 7,5 mm. Massatavoitteeksi asetettiin 1,55 kg. Varmuusluvaksi myötörajan suhteen toivottiin saavan ~ 2.

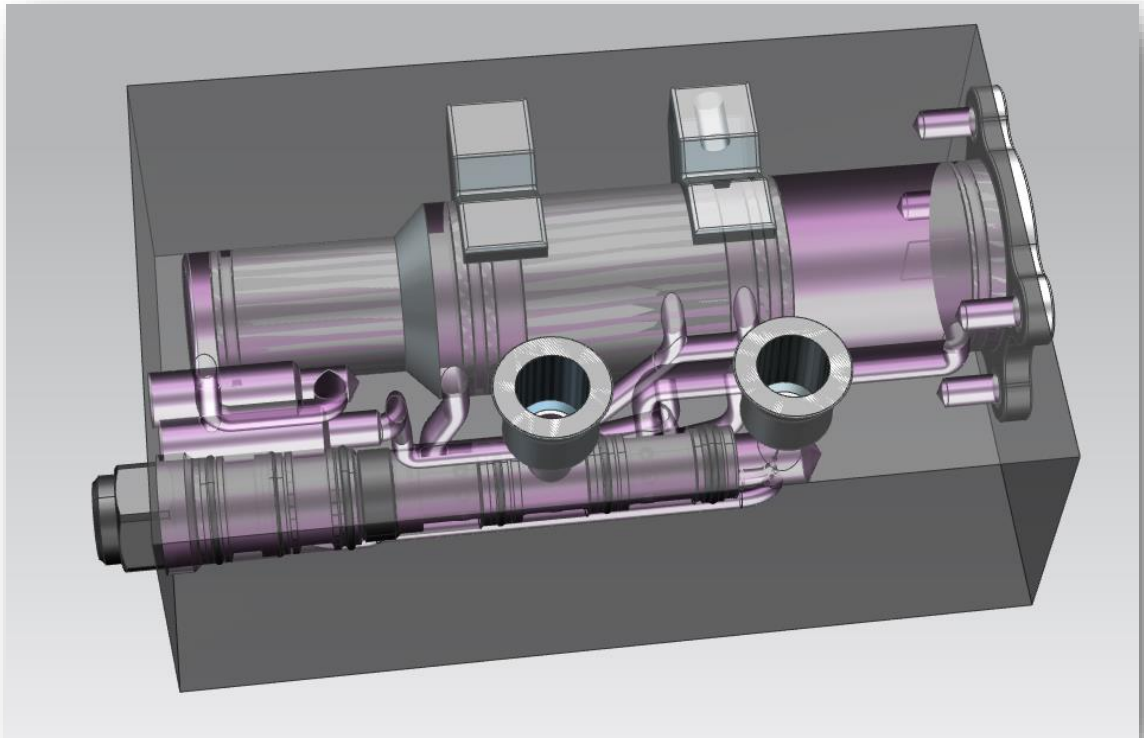


Kuva 27. Valittu kiinnityspinta korostettu oranssilla.

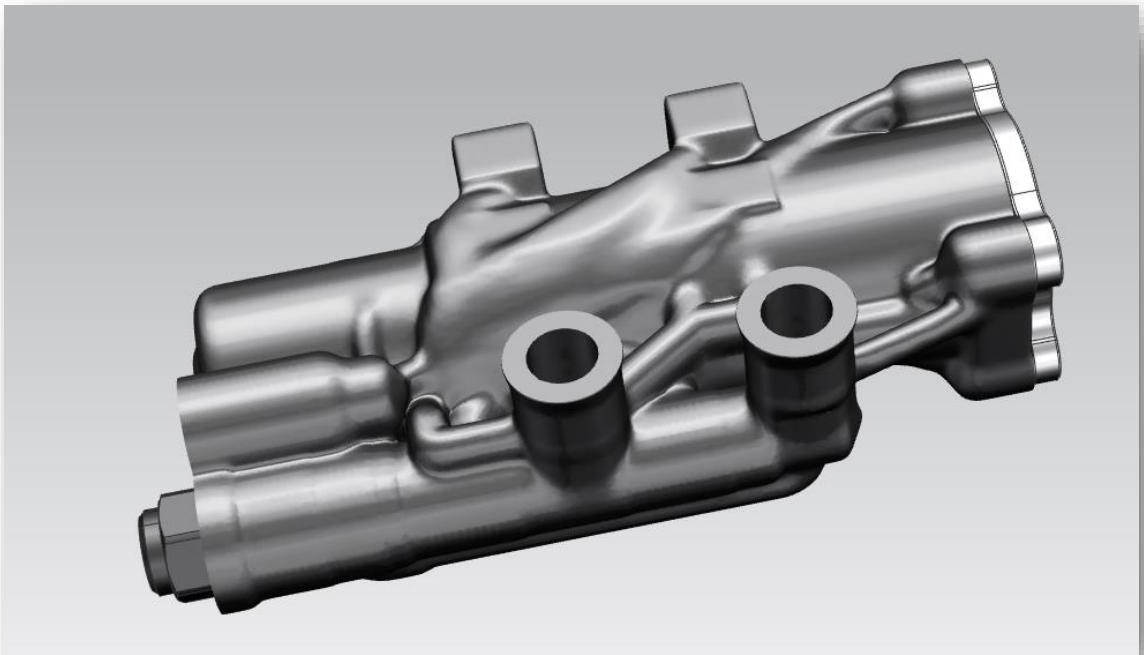


Kuva 28. Kuvassa on valittu kannen reikien pinnat (oranssi korostus), ja niihin on kohdistettu kuvassa näkyvän oranssin vektorin suuntainen voima, 50 000 N. Topologiaoptimointi huomioi kuormitukset, ja pyrkii muodostamaan tavoiteltujen kriteerien mukaisen rakenteen.

Kuvissa 29 ja 30 nähdään kuvat ennen topologiaoptimointia, ja sen jälkeen.



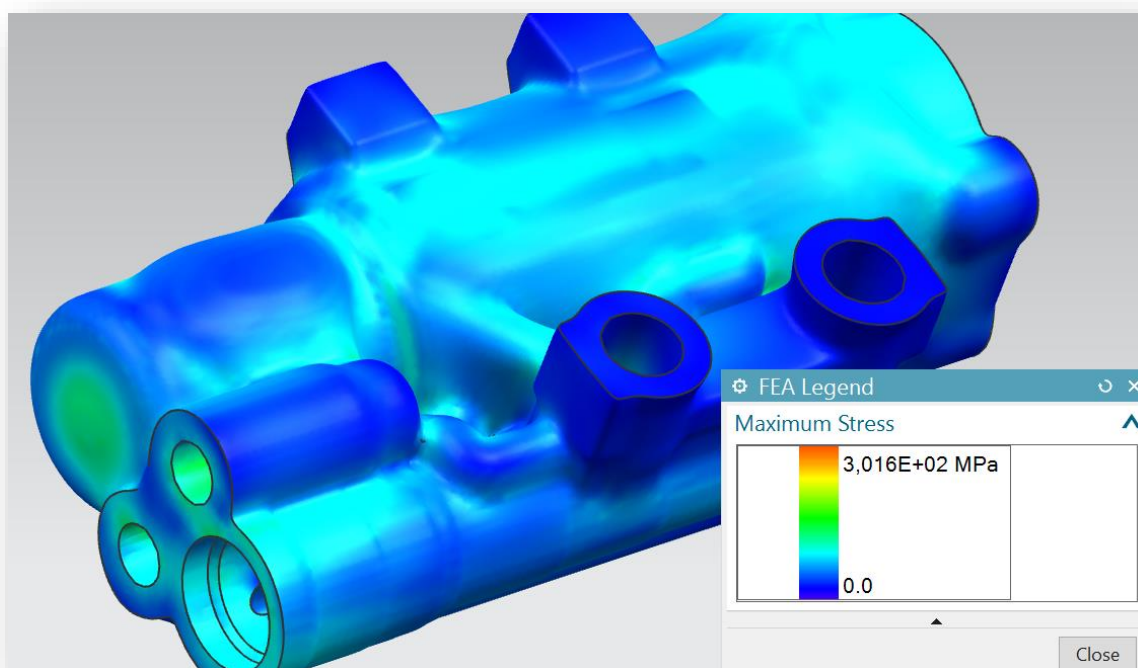
Kuva 29. Tilanne ennen topologiaoptimointia, paikalleen asennetut osat (mäntä, kansi, patruunaventtiili) eivät liity optimointiin, mutta ovat paikoillaan selkeyden vuoksi. Edessä näkyvät kaksi harmaata liityntäkohtaa ovat tuloliityntä (vasen) ja poistoliityntä (vrt. kuva 8).



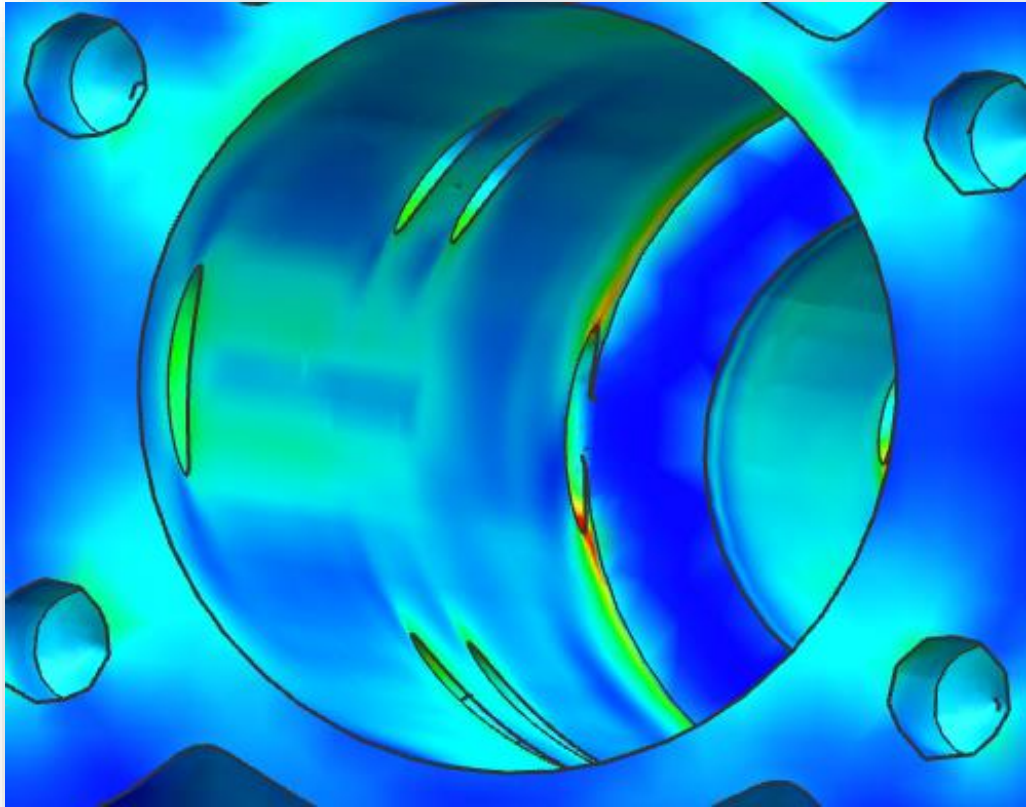
Kuva 30. Havainnekuva topologiaoptimoidusta hydraulikkalohkosta. Huom. kuvassa näkyvä kapale ei ole valmis versio, vaan yksi monista optimoinnin tuloksista.

Lohkoon valittiin yhdessä robottisoluryhmän kanssa paikat, joihin lisättiin tasaiset pinnat helpottamaan kappaleen siirtelemistä robotilla. Lopullisessa versiossa seinämävahvuudet pysyivät samana kuin aikaisemmin listatut. Materiaaliksi valittiin NX:n omasta tietokannasta Titanium Alloy (titaaniseos), jonka myötöraja oli 20 asteen lämpötilassa ~760 MPa, kimmokerroin 117 GPa ja Poissonin luku 0,33.

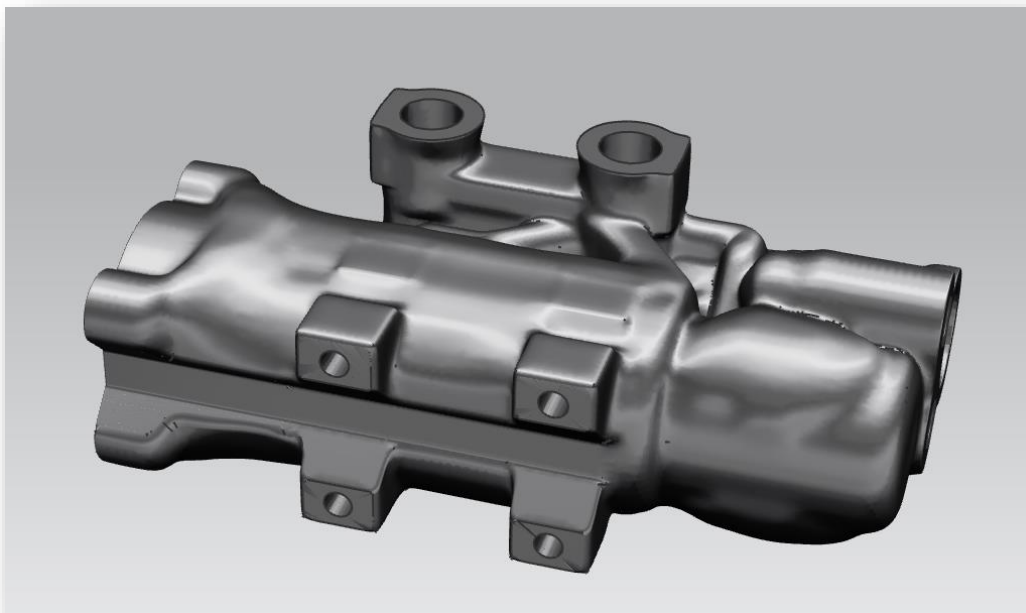
Suurimmaksi jännitykseksi saatiin 300 MPa (kuvat 31 & 32), joten varmuusluvuksi myötörajan suhteen saatiin hieman yli 2. Kuvassa 33 nähdään valmis malli.



Kuva 31. Jännitysjakautumaa kuvastava malli.



Kuva 32. Suurin jännitys, ~300 MPa sijaitsee isomman sylinterikammion pohjalla, palautuskanavan reunoilla. Kappale on sama kuin kuvassa 31.



Kuva 33. Valmis paineenkohottajan malli.

### 5.2.6 Tiivisteiden suunnittelu

Vaadittujen tiivisteiden suunnittelua ei suoritettu, sillä tiivisteiden sovittiin jäävän pois messuilla, jotta osien asentaminen robotilla olisi sujuvaa. Osiin mallinnettiin kuitenkin tiivisteurat, sekä jätettiin tilaa tiivisteille, jotta niiden suunnittelu tulevaisuudessa onnistuisi ilman suuria muutoksia.

### 5.2.7 Mallin jälkikäsittely

Topologiaoptimoitua mallia pystytään muokkaamaan laajalla valikoimalla erilaisia työkaluja. Materiaalin poistaminen ja lisääminen tapahtuu käyttämällä perinteisiä pursotus- (Extrude) ja pyöräytystyökaluja (Revolve). Lisäksi pintamalla voi muokata lukuisilla käänteissuunnittelutyökaluilla (Reverse Engineering). Mallista ei kuitenkaan saa luotua muita kuin .STL- ja .3mf-tiedostotyyppisiä, jotka ovat soveltuvia lähinnä 3D-tulostamiseen. Uuden lujuuslaskennan suorittaminen jälkikäsittelyn jälkeen ei siis käytännössä ole mahdollista, joten vaihtoehtoisiksi jäävät optimoinnin alkuehtojen muuttaminen, tai täysin erillisen mallin luominen topologiaoptimoinnin tulosten pohjalta. Erilliselle kappaleelle joka on solidi, voidaan suorittaa tavallinen lujuuslaskenta.

Tässä työssä jälkikäsittelynä pyöristettiin teräviä reunoja, tasoitettiin kuoppaisia pintoja, sekä lisättiin kiinnityslaipan reiät.

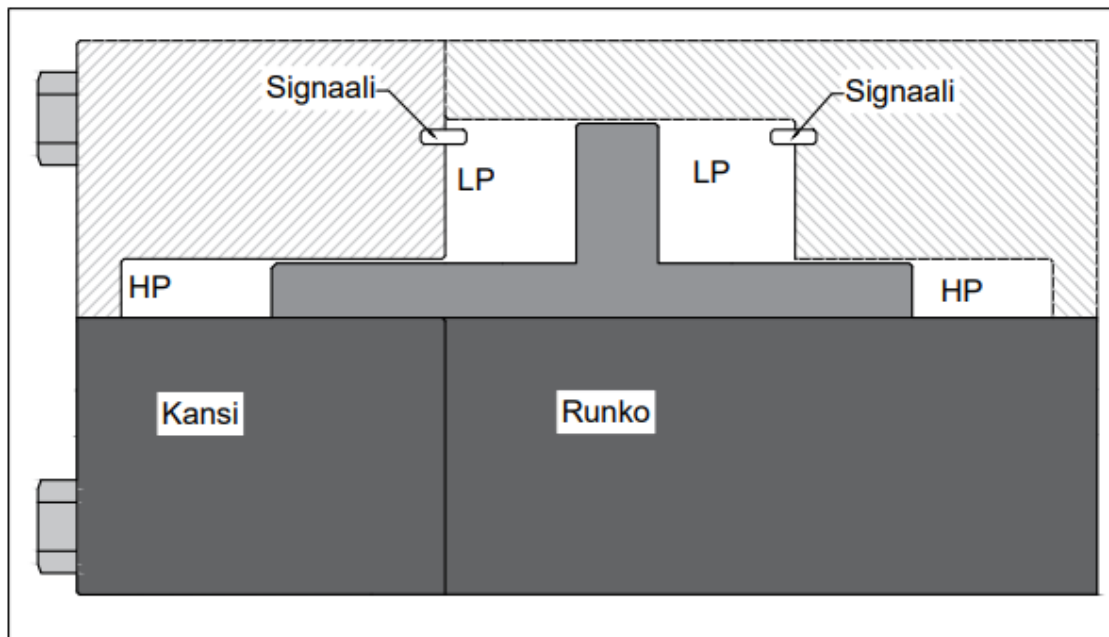
### 5.2.8 Valmistuskuvat

Seuraava vaihe oli luoda valmistuskuvat tarjouspyyntöjä varten. Kuvat löytyvät insinööriyön liitteet-osiosta. Osa kuvista luotiin käyttämällä AutoCad -mallinnusohjelmistoa, ja osa käyttäen Siemens NX -ohjelmistoa.

## 5.3 Kappaleen tilaaminen

Tarvittavien dokumenttien valmistuttua lähetettiin tarjouspyyntöjä sekä tarvittavista komponenteista, eli venttiileistä ja liittimistä että itse lohkoista. Kappaleen kokonaishinta todettiin valitulla rakenteella liian kalliiksi, ja kappaleen tilaamisesta luovuttiin. Hinta oli suhteessa jo markkinoilla oleviin perinteisin tavoin valmistettuihin lohkoihin nähden liian suuri, mikä johtui pitkälti rungon suuresta massasta (~ 1,5 kg, materiaali titaania).





Kuva 35. Havainnekuva, mäntää kyettäisiin ohentamaan erittäin ohueksi käytettäessä sylinterikammion päätyihin asennettuja signaaliventtiileitä, tai muita signaalin antavia komponentteja. Tästä seuraisi myös kappaleen kokonaispituuden lyheneminen, ja massan keveneminen.

#### 5.4.2 Seinämävahvuudet

Seinämien paksuus vaikuttaa kappaleen kokonaismassaan ratkaisevasti. Koska AM-valmistuksen (Additive Manufacturing) hinta riippuu myös tulostettavan materiaalin tilavuudesta, kannattaa materiaalin määrä pyrkiä minimoimaan. Titaani jauheen ollessa teräs jauhetta kalliimpaa, muun muassa työstettävien alueiden työstövarojen tulostaminen tulee suhteessa kalliimmaksi titaanista. Titaanin myötörajan ollessa korkeampi kuin teräksen, seinämävahvuuksia voidaan valita ohuemmiksi, sekä jännitysten sallia olevan korkeampia. On kuitenkin huomattava, että titaanin kimmokerroin on huomattavasti pienempi kuin teräksen, ja sen seurauksena venymät kasvavat suuremmiksi kuin terästä käyttäessä.

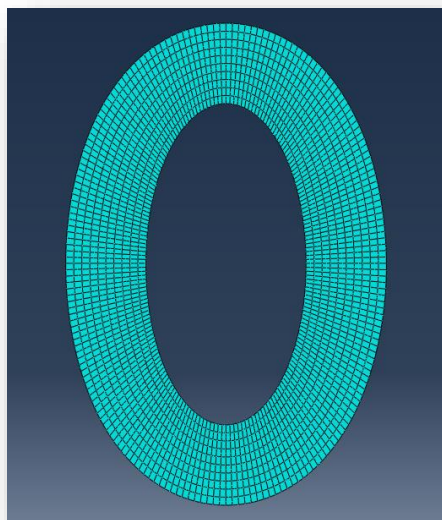
Projektissa käytetyissä seinämävahvuuksissa luotettiin NX:n TopOpt-työtilan antamiin Von Misesin vertailujännityksiin, jotka pysyivät riittävän maltillisina varmuusluvun suhteen. Jälkikäteen suoritettiin kuitenkin erillisiä lujuusanalyyskejä FEM-ohjelmistolla (Abaqus) vertailukohteeksi. Tarkastelussa on käytetty oletuksena tasovenymätilaa, jossa oletuksena on, että pitkittäissuuntaista (kohtisuoraan poikkileikkausta vasten) jännitystä ei esiinny. Oletus soveltuu hyvin pitkille kappaleille, joiden poikkileikkaus ei muutu.

Vertailua suoritettiin teräkselle, ja titaanille, joille annetut materiaalivakiot löytyvät taulukosta 4. On kuitenkin huomioitava, että tulostettavan materiaalin ominaisuudet vaihtelevat suuresti valmistajasta riippuen. Tulostetuilla kappaleilla on usein myös eri myötörajat eri suunnissa. Taulukosta 4 löytyvät arvot eivät poikenneet kappaleessa käytetyistä arvoista merkittävästi, joten tulosten voidaan olettaa olevan vertailukelpoisia NX:n automaattisen laskennan kanssa.

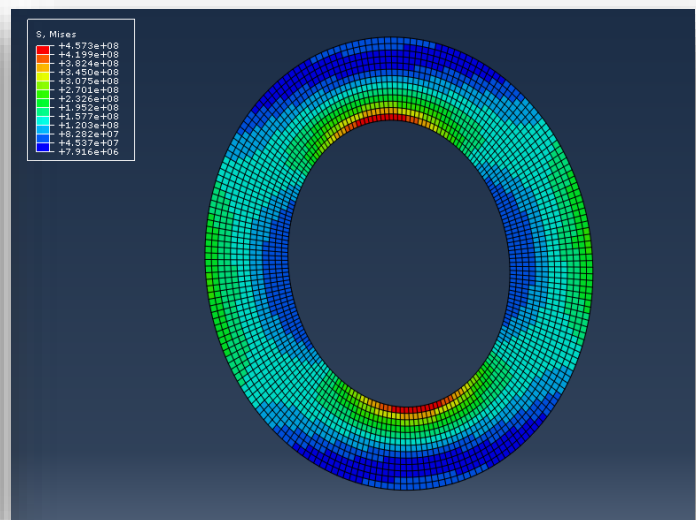
Taulukko 4. Vertailun materiaalivakiot.

Materiaali	Poissonin luku	Kimmokerroin
Titaani (UNS R56401) <sup>[14]</sup>	0,342	113 GPa
Teräs <sup>[15, s.151]</sup>	0,3	210 GPa

Kuormitusilanteelle ei ole asetettu reunaehtoja, ja kuorma on annettu paineena profiilin sisäreunalle. On huomattava, että tuloksiksi saadut seinämävahvuudet ovat vain suuntaa antavia, eivätkä välttämättä sovellu käytettäväksi muun muassa kanaviston jyrkissä käänöskohdissa. Kuvissa 36 ja 37 nähdään esimerkki laskennassa käytetystä verkosta, sekä tulokseksi saadusta jännitysjaumasta.



Kuva 36. Lujuusanalysissä käytetty elementtiverkko.



Kuva 37. Graafinen esitys profiilin jännitysjaumasta, venymät ovat rajusti skaalattuja. Suurin jännitys syntyy ellipsiprofiilin kapeaan kärkeen.

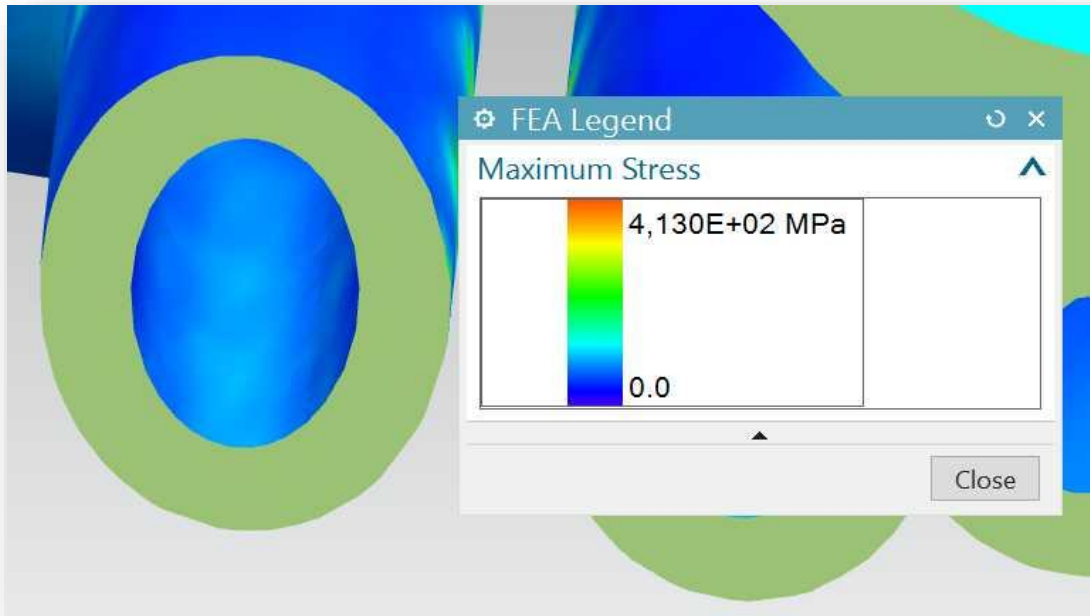
Taulukkoon 5 on listattu kanaviston profiileille suoritettujen analyysien pohjalta saatuja tuloksia, joiden pohjalta on mahdollista arvioida tarvittavaa seinämävahvuutta samantyyppisille kanavistoille, kun varmuusluvuksi myötörajan suhteen haluttaisiin ~ 2. Analyysissä on käytetty samoja profiileja, jotka esitettiin kuvassa 24.

Taulukko 5. Lujuusanalyysin tuloksia.

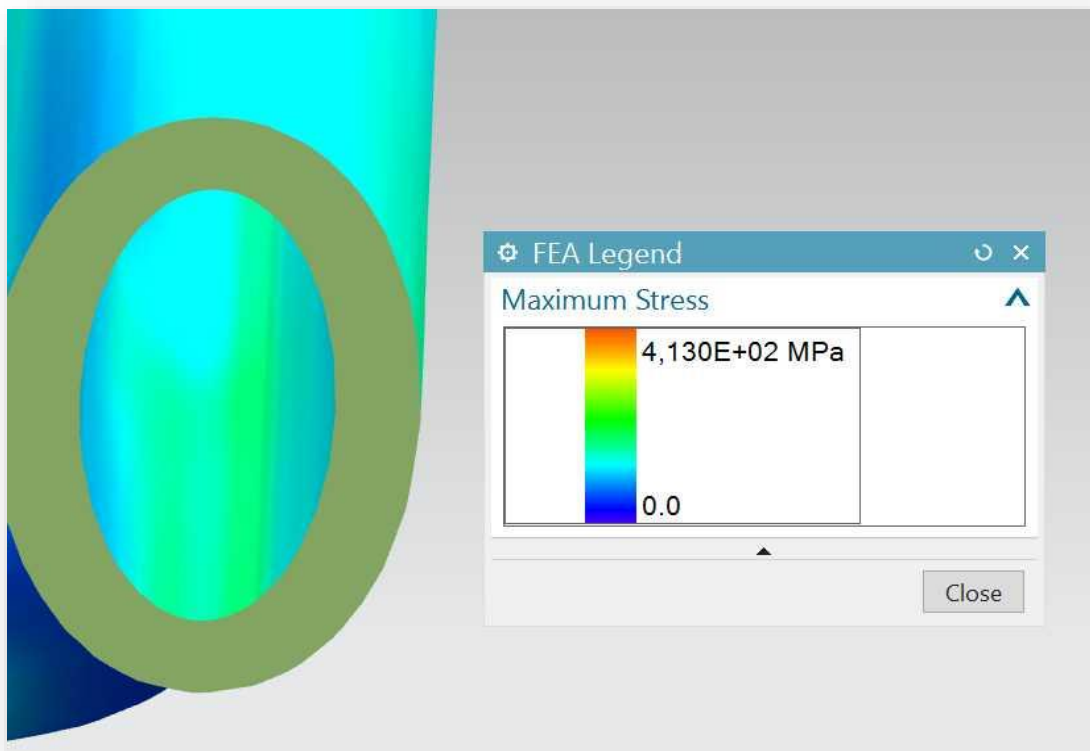
Profiili	Materiaali	Seinämävahvuus (mm)	Paine (bar)	Suurin jännitys (Von Mises) (MPa)
Ellipsi (R2,5 x R3,5)	Teräs	2	330	203
Ellipsi (R2,5 x R3,5)	Titaani	1,2	330	413
Ellipsi (R2,5 x R3,5)	Teräs	5	700	209
Ellipsi (R2,5 x R3,5)	Titaani	2	700	457
Ellipsi (R3 x R6)	Teräs	5,5	330	218
Ellipsi (R3 x R6)	Titaani	3	330	413
Kyynel (D6 H4,5)	Teräs	4,5	330	204
Kyynel (D6 H4,5)	Titaani	2	330	438
Sylinteri (D30)	Teräs	7	700	226*
Sylinteri (D30)	Titaani	3	700	402*
Sylinteri (D43,7)	Teräs	4	330	202*
Sylinteri (D43,7)	Titaani	1,75	330	409*

\* : Sylinteriin kohdistuu paineen lisäksi myös merkittävän suuria tason suuntaisia voimia, tulokset eivät ole sovellettavia sellaisenaan. Huom. Kyynelkanavassa suurin jännitys kohdistuu kyynelprofiilin ”terävään” kulmaan.

Vertailukohteena kuvissa 38 ja 39 nähdään paineen alaiset ellipsikanavat 2 mm:n seinävahvuudella, materiaalina NX:n kirjaston "Titanium Alloy". Topologiaoptimoinnissa käytetty minimelementtikoko oli ~6 mm, ja rasitukseksi asetettiin 330 bar painetta profiilin sisäpinnalle. *Huom. Kuvien 38 ja 39 maksimijännitys on koko rakenteessa esiintyvä suurin jännitys.*

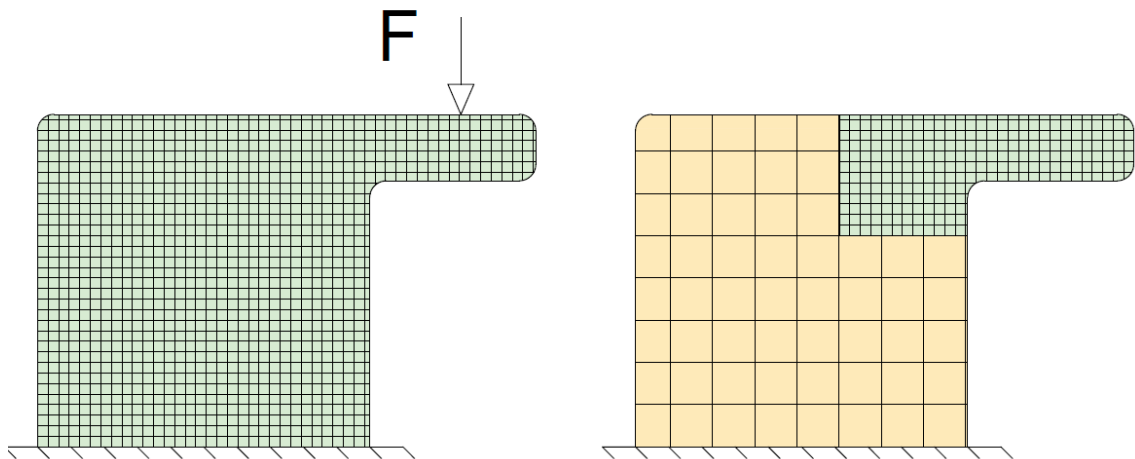


Kuva 38. Pienempi ellipsiprofiili, säteet 3 & 6 mm. Jännitykset sisäpinnalla jäävät siniselle alueelle, eli alle 150 MPa suuruisiksi.



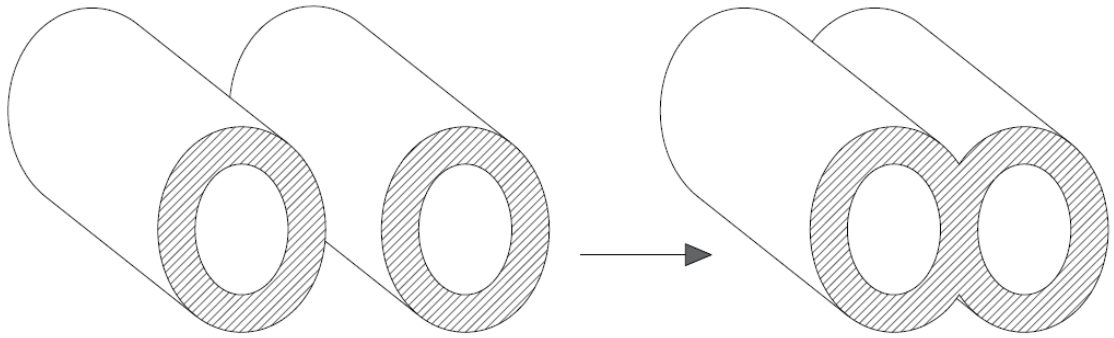
Kuva 39. Isompi ellipsiprofiili, säteet 2,5 & 3,5 mm. Jännitykset nousevat suurimmillaan vihreälle tai hieman kellertävälle alueelle, suurimmillaan ~300 MPa.

Tuloksista voidaan päätellä, että NX:n topologiaoptimointityötilaan sisäänrakennettu jännitysanalyysi ei aina anna riittävän luotettavia tuloksia kaikissa tapauksissa, vaikka sen tulokset ovatkin kohtuullisen tarkkoja. Rakennetta voisi mahdollisesti vielä keventää myös ohentamalla seinämävahvuuksia. Yksi merkittävä ero on kappaleen kiinnittäminen. Tehdessä staattista analyysiä, tässä insinööriyössä käsiteltävä kappale ei varsinaisesti ole jäykästi kiinnitetty mihinkään, vaan kaikki kuormat ovat rakenteen sisäisiä paineita. NX:n työtila ei kuitenkaan suostu suorittamaan optimointia ilman kappaleen kiinnittämistä, joten kappaleelle valittiin mahdollisimman harmiton kiinnityskohta (kuva 26), kun taas Abaqus ei tätä reunaehtoaa vaadi. Toinen vertailua hankaloittava asia on seinämävahvuuksien tasaisuus. Etenkin käyttäessä suunnitteluohjelmaa ”Overhang Prevention”, kappale pyrkii keräämään kanavien ympärille melkoisesti ylimääräistä seinämävahvuutta täyttääkseen ehdon. Erillistä lujuuslaskentaan sopivaa ohjelmistoa käytettäessä voidaan myös verkotuksen (elementtien) koko valita lokaalisti (kuva 40), kun taas topologiaoptimointityötilassa elementtikoko valitaan globaalisti koko rakenteelle.



**Kuva 40.** Vasemmalla pienistä elementeistä koostuva verkotus. Tarkan verkotuksen käyttö koko kappaleella vie paljon laskenta-aikaa, eikä muuta tulosten tarkkuutta, sillä kriittinen alue on tiedossa. Kaupallisissa lujuuslaskentaohjelmistoissa alueet voidaan verkottaa lokaalisti, joka mahdollistaa tehokkaamman ajankäytön lujuuslaskentaa ajatellen. Optimoidessa topologiaa NX TopOpt-työkaluilla, elementtien tarkkuus vaikuttaa kuitenkin myös optimoinnin tulokseksi saatavan geometrian tarkkuuteen, joten ohjelmistoa käytettäessä tulee tasapainotella halutun laadun ja laskenta-ajan välillä.

Etenkin titaanista tulostettujen komponenttien suurimpiin vahvuuksiin kuuluu niiden kevyt massa verrattuna kilpaileviin kappaleisiin, joten seinämävahvuuksien mitoittaminen mahdollisimman pieneksi kannattaa suorittaa huolellisesti. Suuntaa antavat seinämävahvuudet kanaville kannattaisikin laskea jo ennen topologian optimointia, sillä sen perusteella voitaisiin sijoittaa kanavia jo valmiiksi lähelle toisiaan, mahdollisesti jakamaan yhteistä seinää, mikä pienentää kappaleen tilavuutta (kuva 41).



**Kuva 41.** Putkiprofiilien keskilinjan joutuu asettamaan topologiaoptimoinnissa jo etukäteen. Mikäli riittävä seinämävahvuus onkin paljon ohjelmistolle syötettyä arvoa pienempi, putket jäävät erilleen toisistaan. Kun sopiva seinämävahvuus on tiedossa, putkisto pystytään sijoittamaan tiiviimmin jo etukäteen, pienentäen kappaleen äärimittoja, ja keventäen sen massaa.

## 5.5 Lopullinen versio

Uutta versiota varten sovittiin suunniteltavan muovista tulostettavat komponentit, joihin sovittiin jätettäväksi runsaat välykset, jotta kokoonpanorobotin työkierto olisi mahdollisimman sujuvaa. Seinämävahvuudet pysyivät entisellään, mutta koneistusvaraa ei tällä kertaa jätetty. Lisäksi päätettiin, että liittimet ja tulpat liimattaisiin paikoilleen, ja robotisolun kokoonpantavaksi jäisivät enää mäntä, kansi ja 4/2-venttiili.

Robottisolun parissa työskentelevän projektiryhmän kanssa pohdittiin mistä robotin olisi kaikkein helpointa tarttua kappaleesta kiinni, ja sovittiin, että valitut pinnat ja paikat jätettäisiin tasaisiksi, jotta robotin toiminta olisi mahdollisimman helppoa ja toimintavarmaa.

Ohjaavan yrityksen puolelta pyydettiin lisäämään runkoon yrityksen logo, ja sovittiin yhdessä sopiva paikka sille, kappaleen pohja (tulostusasennossa). Muovisen version tulostaminen tapahtui ongelmitta, ja kuristuskanavat saatiin puhdistettua.

## 6 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli suunnitella lähes valmis hydraulinen paineenkohotin, joka valmistettaisiin joko titaanista tai teräksestä 3D-tulostamalla. Työssä tavoiteltiin kevyttä rakennetta, ja mahdollisimman vähäistä osien lukumäärää.

Työ osoittautui alkuperäisiä odotuksia haastavammaksi, sillä NX:n TopOpt-työtila oli kohtuullisen uusi, ja sen käyttöön liittyvää opetusmateriaalia ei ollut juurikaan saatavilla. Itse suunnittelutyössä olisi kannattanut valita tulostusmateriaali jo ennen optimoinnin suorittamista, sillä kanaviston ja muiden komponenttien tiivis sijoittaminen edellyttää seinämävahvuuksien tehokasta hyödyntämistä, joka puolestaan on vahvasti riippuvaista materiaalista.

Päätös puoltaa DFA-periaatetta suunnittelussa saattoi johtaa liian suureen massaan, sillä sen seurauksena männän ja sen vaatiman kammion tilavuudet kasvoivat. Valinta oli kuitenkin tehtävä jo varhaisessa vaiheessa projektia, ja sen seuraukset pysyivät mukana loppuun asti.

Kokonaisuudessaan projekti kuitenkin onnistui, ja messuille saatiin esittelykelpoinen, AM-menetelmin valmistettavaksi suunniteltu paineenkohottaja.

## Lähteet

- 1 Etteplan Oyj, Etteplan Lyhyesti. Verkkoaineisto. <<https://www.etteplan.com/fi/etteplan-lyhyesti>>. Luettu 24.4.2018.
- 2 Bournias-Varotsis, Alkaios. 2018. 3D Printing vs. CNC machining. 3D HUBS. Verkkoaineisto. <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-vs-cnc-machining>> Luettu 24.4.2018.
- 3 Kokkonen Petteri ym. 2016. Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process. VTT. Tutkimusraportti. Verkkoaineisto. <<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2016/VTT-R-03160-16.pdf>> Luettu 24.4.2018.
- 4 Metal 3D Printing Technology: Selective Laser Melting (SLM). Sculpteo. Verkkoaineisto. <<https://www.sculpteo.com/en/materials/slm-material/>> Luettu 24.4.2018.
- 5 Selektives Laserschmelzen. Protiq. Verkkoaineisto. <<https://www.protiq.com/3d-druck/verfahren/laserschmelzen/>> Luettu 24.4.2018.
- 6 Our Technology. Eos. Verkkoaineisto. <[https://www.eos.info/additive\\_manufacturing/for\\_technology\\_interested](https://www.eos.info/additive_manufacturing/for_technology_interested)> Luettu 24.4.2018.
- 7 Utley, Eric. 2010. An Introduction to Designing for Metal 3D Printing. Verkkoaineisto. <<http://my.solidworks.com/reader/wpress-blogs/2017%252F06%252Fintroduction-designing-metal-3d-printing.html/an-introduction-to-designing-for-metal-3d-printing>> Luettu 4.4.2018.
- 8 Indiamart. Verkkoaineisto. <<https://dir.indiamart.com/impcat/hydraulic-manifold-block.htm>> Luettu 24.4.2018.
- 9 Westerlund, Ville. 2017. Topologian optimoinnin hyödyntäminen. RDvelho. Verkkoaineisto. <<https://rdvelho.com/fi/blogi/topologian-optimoinnin-hy%C3%B6dynt%C3%A4minen>> Luettu 24.4.2018.

- 10 Molitch-Hou, Michael. 2016. Topology Optimization for 3D Printing Hits the Cloud with Generate. Engineering.com. Verkkoaineisto. <<https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/13803/Topology-Optimization-for-3D-Printing-Hits-the-Cloud-with-Generate.aspx>> Luettu 24.4.2018.
- 11 Sun Hydraulics. Verkkoaineisto. <<http://www.sunhydraulics.com/model/DCCD>> Luettu 24.4.2018.
- 12 Hawe Hydraulik. Tuotekatalogi (Verkkoaineisto). <<http://downloads.hawe.com/7/4/D7445-en.pdf>> Luettu 24.4.2018.
- 13 Suositellut virtausnopeudet. Salhydro Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.salhydro.fi/fi/virtausnopeus>> Luettu 26.4.2018.
- 14 Titanium Alloys – Physical Properties. Azo Materials. Verkkoaineisto. <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1341>> Luettu 26.4.2018.
- 15 Mäkelä, Mikko; Soininen, Lauri, Tuomola, Seppo; Öistämö, Juhani. Tekniikan kaavasto, 3. painos.