

# **Kattilalaitoksen ilma- ja savukaasu- kanavien parametrisoidun suunnittelu- työkalun kehittäminen**

Vesse Kaukonen

Opinnäytetyö

---



Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Vesse Kaukonen	
Työn nimi Kattilalaitoksen ilma- ja savukaasukanavien parametrisoidun suunnittelutyökalun kehittäminen	
Päiväys 29.5.2012	Sivumäärä/Liitteet 61
Ohjaaja(t) Lauri Toropainen, Seppo Ryyänen, Heikki Salkinoja	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Rantotek Oy	
<p><b>Tiivistelmä</b></p> <p>Opinnäytetyön päätavoitteena oli kehittää parametrinen suunnittelutyökalu, joka automatisoi kattilalaitoksen ilma- ja savukaasukanavien mallintamista. Lisäksi tarkoituksena oli antaa lukijalle hyvä yleiskäsitys BFB-Kattilan sekä ilma- ja savukaasukanavien toiminnasta. Automaation avulla suunnittelutyöhön kuluva aikaa on mahdollista vähentää huomattavasti.</p> <p>Käytännön osuutta tehtiin Autodesk Inventor-ohjelmalla ja työn lopputuloksena saatiin valikoima yleisimpiä kanavistoissa käytettyjä elementtejä, jotka luodaan automaattisesti, kun mallien ominaisuudet määrittävät parametrit on syötetty. Lopuksi suunnitteluprojektissa kulloinkin tarvittavat kanavan osat on tarkoitus tuoda kokoonpanotilaan, missä ne yhdistetään toisiinsa manuaalisesti rajoitteiden avulla.</p> <p>Etu AutoCAD-ohjelmalla mallintamiseen verrattuna, jota Rantotek Oy:llä yleisesti käytetään, on mallin luomisen nopeus ja sääntöjen ja rajoitteiden avulla saavutettu mallien odotusten mukainen ja luotettava käyttäytyminen.</p> <p>Tulevaisuudessa kehittämiskelpoisia ideoita voisi olla mm. eristeiden lisääminen kanaviin tilavaruuksena niin, että ne voidaan kytkeä päälle ja pois yhden parametrin avulla kokoonpanossa. Olisi hyvä kasvattaa mallien valikoimaa erikoisemmilla kanavan osilla ja tutkia mahdollisuutta luoda kanavia AutoCAD-ohjelmasta tuotujen kanavan keskiviivojen ympärille. Lisäksi toteuttamisen arvoinen idea olisi parametrinen työkuvien kehittäminen.</p>	
Avainsanat 3D, BFB, Inventor, kanava, kattila, leijupeti, malli, parametri	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Vesse Kaukonen			
Title of Thesis Development of a Parametric Design Tool for Boiler Plant's Air and Flue Gas Ducts			
Date	29.5.2012	Pages/Appendices	61
Supervisor(s) Lauri Toropainen, Seppo Rynnänen, Heikki Salkinoja			
Client Organisation /Partners Rantotek Oy			
<p><b>Abstract</b></p> <p>The main objective of this thesis was to develop a parametric design tool that will automate the modelling of boiler plant's air and flue gas ducts. Additionally the purpose was to give the reader a good general understanding of how BFB-boilers and air and flue gas ducts function. With the help of automation, the time that goes into design work can be reduced noticeably.</p> <p>Autodesk Inventor was used in the practical part of this work and as an end result we got a selection of the most common duct elements that are automatically created after the input of model defining parameters. Lastly each duct part needed in the design project is meant to be brought into assembly where the parts will be put together manually with the help of constraints.</p> <p>The advantage compared to modeling with AutoCAD which is commonly used in Rantotek Oy, is the speed of model creation and the expected and trustworthy model behavior that is achieved with rules and restrictions.</p> <p>Ideas for future development could include for example adding of insulation in the models as a space reservation so that it could be turned on and off in the assembly with the help of a single parameter. It would be good to increase the number of models with more special duct parts and investigate the possibilities of creating ducts over duct centerlines imported from AutoCAD. Also worth of implementing would be the developing of parametric work drawings.</p>			
<p><b>Keywords</b></p> <p>3D, BFB, boiler, bubbling fluidized bed, duct, inventor, model, parameter</p>			

## ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on toteutettu Rantotek Oy:lle Varkauden toimipisteessä. Haluan kiittää Rantotek Oy:n toimitusjohtaja Jouni Tuonosta ja muita asianosaisia opinnäytetyön aiheen löytämisessä. Lisäksi työn ohjaajille Lauri Toropaiselle, Seppo Ryynäselle ja Heikki Salkinojalle sekä Rantotek Oy:n henkilökunnalle kuuluvat kiitokset tuesta ja ohjeista opinnäytetyön eri vaiheissa.

Varkaudessa 29.5.2012

## SYMBOLIT, KÄSITTEET JA LYHENTEET

Ø	Halkaisija
2D Sketch	2-ulotteinen luonnos
3D Sketch	3-ulotteinen luonnos
Assembly	Kokoonpano
BFB	Bubbling fluidized bed, leijupeti
Circular Pattern	Ympyrämäinen monistus
Constrain	Rajoite
Draft	Päästökulma
Driven Dimension	Geometrian ohjaama mitta
Driving Dimension	Geometriaa ohjaava mitta
ε	Leijukerroksen tyhjän tilan osuus
Extrude	Pursotustoiminto
Feature	Piirre, 3D-toiminnon lopputulos
Happokastepiste	Lämpötila, jossa rikkidioksidi ja rikkiatrioksidi muodostavat tiivistyneen veden kanssa rikkihappoa
iLogic	Inventor-osio sääntöjen luomiseen ja muokkaamiseen
iPart	Taulukko-ohjattu alkuperäisosa, josta konfiguroidaan standardiosia eri kokoihin ja tiloihin
Loft	Pursotustoiminto kahden tai useamman profiilin kautta
Luvo	Luftvorwärmer, ilman esilämmitin
Mirror	Peilaustoiminto
Parametri	Luodulle elementille annettu arvo
Rectangular Pattern	Suorakaiteen muotoinen monistus
Revolve	Pyöräytystoiminto
Rs	Mutkakappaleen sisäsäde
Ru	Mutkakappaleen ulkosäde
Sintraantuminen	Sulaneen tai pehmentyneen tuhkan aiheuttama hiekan kovettuminen
Split	Toiminto jolla pinta tai koko osa saadaan jaettua
Sweep	Pyyhkäisytoiminto profiilin ja polun avulla
Venturi	Kanavan osa, jonka tarkoitus on kiihdyttää kanavan virtausnopeutta hetkellisesti, jolloin saadaan staattista paine-eroa virtausmittausta varten
Work Plane	Työtaso

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
ALKUSANAT	
SYMBOLIT, KÄSITTEET JA LYHENTEET	
SISÄLTÖ	

1	JOHDANTO.....	8
2	RANTOTEK OY.....	9
3	OPINNÄYTETYÖN TOTEUTTAMINEN.....	10
4	AIEMPI TIETOPERUSTA.....	11
5	HÖYRYKATTILAT .....	12
5.1	Leijukerrospoltto.....	12
5.1.1	BFB-kattilat.....	14
6	PALAMISILMAKANAVAT .....	17
6.1	Primääri-ilmakanavat .....	18
6.2	Sekundääri-ilmakanavat ja tertiääri-ilmakanavat.....	18
7	SAVUKAASUKANAVAT .....	20
8	PARAMETRISOINTI .....	21
8.1	Inventor .....	22
8.2	Parametrisoitavat mallit.....	22
8.2.1	Suorat.....	23
8.2.2	Mutkat .....	33
8.2.3	Venturit.....	37
8.2.4	Palkeet.....	39
8.2.5	Supistuskappaleet .....	42
8.2.6	Haaroituskappale .....	55
8.3	Mallien jatkokehittely .....	56
8.3.1	Säännöt ja rajoitteet.....	56
8.3.2	iPart.....	59
9	POHDINTA .....	61

## LÄHTEET

## 1 JOHDANTO

Rantotek Oy:llä on painelaite- ja kattilalaitosten suunnittelussa yleisesti käytössä Autodesk AutoCAD-suunnitteluohjelma. Eri suunnitteluprojekteissa tehdään usein paljon samankaltaisia 3D-malleja kattilan osista. AutoCAD:in avulla kertaalleen tehtyjen 3D-mallien uudelleenkäytettävyys muissa projekteissa on monissa tapauksissa vähäistä ja silloinkin vaaditaan usein ainakin jonkin verran mallien muokkausta, mikä kuluttaa suunnitteluun käytettävää aikaa, puhumattakaan siitä ajasta, mikä kuluu kun mallin joutuu tekemään kokonaan tyhjästä. Autodesk Inventor-ohjelma antaa mahdollisuuden automatisoida 3D-mallien luomisen parametrisoinnin avulla ja tällöin suunnittelu-työ nopeutuu. 3D-mallille saadaan tällöin määriteltyä kuvaavan nimiset parametrit eli mita-arvot, joista mallin lopullinen muoto on riippuvainen ja rajoitteet, joiden ansiosta mittojen väliset suhteet pysyvät oikeina. Esim. mikäli AutoCAD:illa tehtyä jäykistettyä kattilan ilmakehän mutkaosan mallia halutaan käyttää pohjana toisessa projektissa, jossa vaaditaan samankaltainen, mutta mitoiltaan hieman erilainen malli, voi olla, että tehdystä mallista ei saada hyödynnettyä muuta kuin jäykisteen profiili ja kaikki muu joudutaan tekemään täysin alusta. Parametrisoinnin ansiosta Inventor-mallille tarvitsee syöttää vain sen muodot määrittäviä mittatietoja kuten levyn paksuus, keskiviivan säde, kanavan korkeus ja leveys. Inventor tekee näiden mittojen mukaisen mallin automaattisesti.

Tämän opinnäytetyön käytännön osassa on tavoitteena automatisoida kattilalaitosten ilma- ja savukaasukanavien suunnittelua kehittämällä niiden yleisimmistä osaelementeistä parametrisoituja Inventor-malleja. Teoriaosuuden päätarkoitus on antaa hyvä yleiskuva Rantotek Oy:n yleisimpiin suunnitteluprojekteihin kuuluvista leijupetikatti-loista sekä ilma- ja savukaasukanavista.



## 2 RANTOTEK OY

Rantotek Oy perustettiin Tampereella 1985, jossa sijaitsee myös pääkonttori. Sillä on toimipiste lisäksi Varkaudessa. Nykyisin Rantotek Oy kuuluu osaksi Comatec-konsernia, joka on perustettu 1986 niin ikään Tampereella. Tampereen pääkonttorin lisäksi Comatecilla on toimipisteet Hämeenlinnassa, Imatralla, Joensuussa, Järvenpäässä, Lahdessa, Lappeenrannassa, Tallinnassa, Turussa ja Vantaalla. Comatec-konserniin kuuluu myös Insinööritoimisto Metso Oy, Oucons Oy ja Comatec Estonia. (Rantotek Oy yrityssivut, Comatec Oy yrityssivut.)

Comatecilla on noin 350 työntekijää Suomessa. Se on kone- ja laitesuunnitteluun erikoistunut asiantuntijaorganisaatio, jonka toimialaan kuuluu liikkuvat työkonet, tuotantolaitteet, liikennevälineet ja teollisuusautomaatio. Kattilalaitokset ovat tytäryhtiö Rantotek Oy:n toimialaa. (Comatec Oy yrityssivut.)

Rantotek Oy on erikoistunut painelaite- ja kattilasuunnitteluun ja sillä on noin 30 työntekijää. Rantotek Oy:n erikoisosaamisaluetta on erityisesti höyrykattilalaitokset, korkeapaineputkistot ja säiliöt. Toiminta muodostuu osakokonaisuuksista kuten prosessisuunnittelu, lämpötekniinen mitoitus, lujustechniset analyysit ja mitoitukset, laite- ja laitossuunnittelu sekä vaatimusten vastaisuuden arviointidokumentaatio. Rantotek Oy:n kansainvälisestä osaamisesta kertoo se, että noin 80 % projekteista toimitetaan ulkomaille. (Rantotek Oy yrityssivut.)

### 3 OPINNÄYTETYÖN TOTEUTTAMINEN

Tämä opinnäytetyö on jaettu käytännön ja teorian osa-alueisiin. Käytännön osassa tavoitteena on kehittää Autodesk Inventor-suunnitteluohjelmaa käyttäen ilma- ja savukaasukanavien parametrisoitu suunnittelutyökalu, jolla voidaan tuottaa kanavien 3D-malleja layout-käyttöön. Teoriaosuudessa on tarkoituksena selvittää Rantotek Oy:n yleisimpiin suunnitteluprojekteihin kuuluvien BFB-kattiloiden eli kuplapetikattiloiden periaatetta sekä palamisilmakanavien ja savukaasukanavien toimintaa. Kanavien rakenneratkaisuja käydään läpi käytännön osuuden raportoinnissa. Käytännön osuudesta päätettiin jättää pois valmistusdokumenttien luominen opinnäytetyön liiallisen paisumisen välttämiseksi ja työhön käytettävän ajan rajallisuuden vuoksi. Teoriaosuudesta rajattiin pois muut kattilatyypit kuin BFB.

Työn avulla saadaan automatisoitua kanavistojen suunnittelua ja suunnittelun läpimenoaikoja lyhyemmäksi. Kun kanavistojen suunnitteluun käytetty aika lyhenee, sen voi käyttää muuhun suunnittelutyöhön. Lisäksi päästään sisälle parametrisoinnin maailmaan ja selville sen mahdollisuuksista, koska Rantotek Oy:llä parametrisointia ei ole aiemmin juurikaan hyödynnetty suunnittelutyössä pieniä sovelluksia lukuunottamatta.

#### 4 AIEMPI TIETOPERUSTA

Opinnäytetyön käytännön osuuden suorittamisen kannalta kirjoittajalle oli hyödyksi Varkaudessa Savon ammatti- ja aikuisopistolla suoritettu CAD-koulutus vuodelta 2005. Se oli kestoltaan 192 h mittainen, josta Autodesk Inventor-koulutusta oli 128 h ja loput Autodesk AutoCAD-koulutusta. Koulutuksesta opinnäytetyön aloittamiseen oli tosin ehtinyt kulua noin 7 vuotta, joten aivan tuoreessa muistissa ei ohjelmiston käyttäminen ollut. Lisäksi koulutuksen aikaan käytössä oli Inventor 10 ja nykyiset vuosiluvun mukaan nimetyt uusimmat Inventor-versiot ovat siitä jonkin verran muuttuneet varsinkin käyttöliittymän osalta. Opinnäytetyö tehtiin Inventor 2012-versiolla. Inventor-ohjelmaa käytiin myös lyhyesti läpi Savonia-ammattikorkeakoulussa Varkaudessa vuonna 2009 CAD 2-kurssin loppuvaiheessa. Inventor-ohjelmalla itse parametrisointi ja paras työtapana sen käyttämisessä ei ollut tuttua. Tämän kirjoittajan osaamisalueeseen kuului enimmäkseen ohjelman peruskäyttö.

Teoriaosassa BFB-kattiloihin ja kanavistoihin liittyviltä lähtötiedoiltaan kirjoittaja oli melko kokematon. Ennen opinnäytetyön aloittamista kirjoittaja oli ehtinyt olla Rantotek Oy:llä 6 kk suunnittelijaharjoittelijana. Sinä aikana tehtiin jonkin verran myös kanavistoihin liittyviä töitä, joihin kuuluivat muun muassa jäykisteiden, puhaltimien, venttureiden, kannakkeiden sekä palkeiden mallinnusta ja sijoittelua AutoCAD 2008:lla. Vähitellen yleistä kattilalaitostietämystä kertyi muun muassa jatkuvan CAD-mallien pyörittelyn seurauksena, kokeneemmilta työkavereilta kyselemällä sekä Rantotek Oy:ssä tai internet-sivustoilla tarjolla olevaa kirjallista materiaalia lukemalla.

## 5 HÖYRYKATTILAT

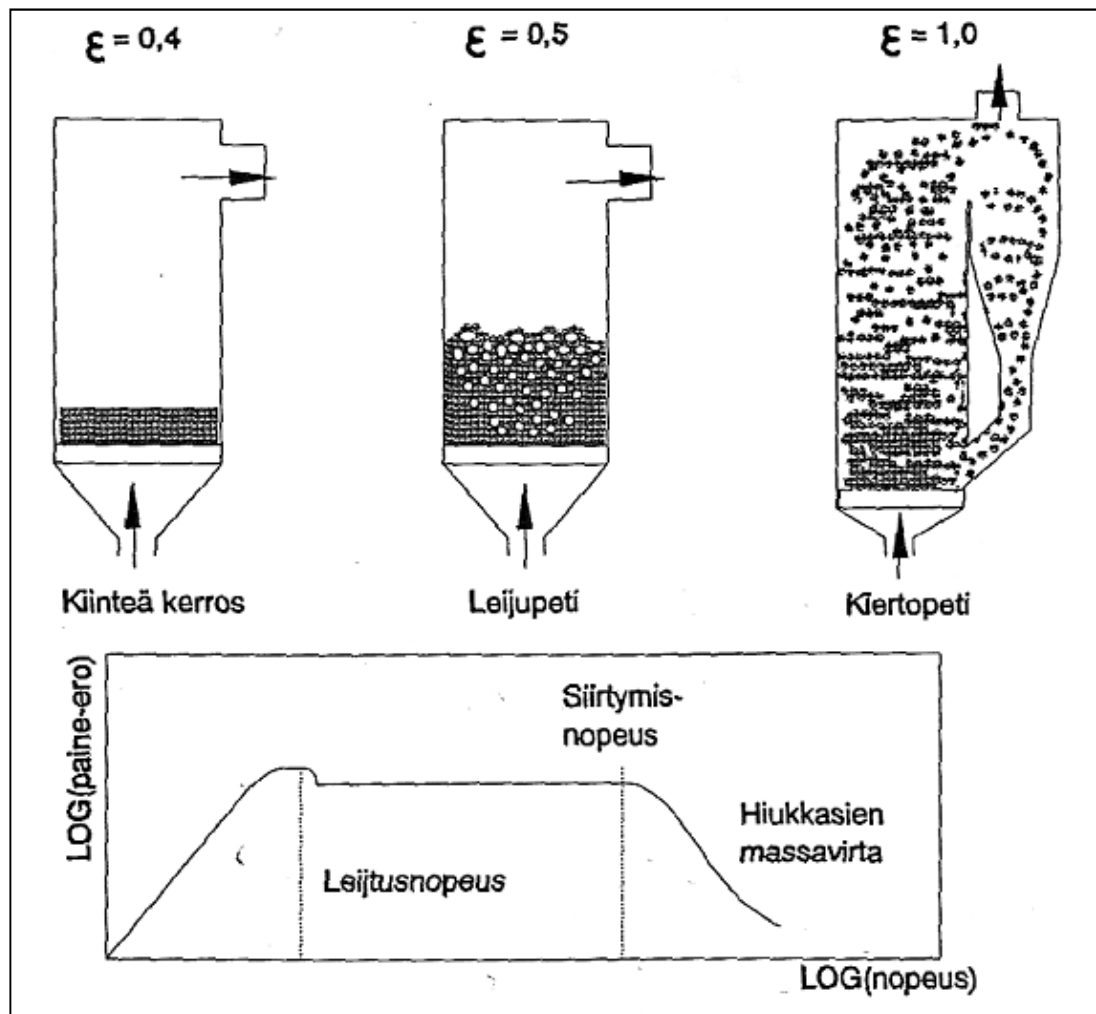
Höyrykattilassa kattilaan syötetystä vedestä tuotetaan höyryä. Aluksi vettä lämmitetään höyrystymislämpötilaan ja sitten vesi höyrystyy painetta vastaavassa höyrystymislämpötilassa. Lopuksi vesihöyryä tulistetaan lämmittämällä sitä höyrystymislämpötilaa korkeammaksi. Tyypillisesti voimalaitosten höyrykattiloiden höyrynpaineiden suuruus on 150-220 bar ja lämpötilat 450-550°C. Ved en lämmittämiseen, höyrystämiseen ja tulistamiseen tarvittava energia saadaan tavallisesti polttamalla fossiilisia polttoaineita kuten hiiltä, turvetta, maakaasua jne. Polttoaineita käsitellään kattilalaitoksiin kuuluvilla laitteilla, jonka jälkeen kuljetuslaitteet siirtävät niitä poltettavaksi. Kattilan polttolaitteeseen tuodaan polttoaineen lisäksi sopiva määrä palamisilmaa. Polttoaine ja palamisilma reagoivat keskenään kattilan tulipesässä ja polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia saadaan muutettua savukaasuihin sitoutuneeksi lämpöenergiaksi. Tätä lämpöä pyritään hyödyntämään jäähdyttämällä savukaasuja erilaisissa höyryntuotannon lämmönsiirtimissä, kunnes ne lopulta johdetaan savukaasujen puhdistuksen jälkeen savupiipusta ympäristöön. (Huhtinen, 2004, 7.)

Höyrytekniikka kehittyi 1700-luvulla, jolloin rakennettiin ensimmäiset toimivat höyrykoneet. Höyrykoneella päästiin noin 15-20 % hyötysuhteeseen, kun sen kattilassa tuotetulla höyrynpaineella liikutettavan männän edestakainen liike muutettiin pyöriväksi liikkeeksi kampiakselin avulla. Nykyaikaisissa voimalaitoksissa sähköntuotannossa höyrykone on vaihtunut 1800-luvulla kehitettyyn höyryturbiiniin. Höyryturbiineissa edestakaisen liikkeen välivaihetta ei tarvita vaan höyryenergia muutetaan suoraan turbiinia pyörittäväksi liike-energiaksi. Höyryturbiineilla päästään hyvään, yli 40 % hyötysuhteeseen, koska ne soveltuvat suurempiin paineisiin ja höyry voi paisua lähes ympäristön lämpötilaa vastaavaan höyrynpaineeseen. (Huhtinen, 2004, 8.)

### 5.1 Leijukerros poltto

Leijukerros poltto on yleistynyt laajasti energiantuotannossa viime vuosikymmeninä 1970 luvulta lähtien. Leijukerros poltossa on mahdollista käyttää eri polttoaineita. Menetelmä mahdollistaa myös huonompilaatuisten polttoaineiden käytön samassa kattilassa hyvällä palamishyötysuhteella. Tällä polttotavalla typenoksidipäästöt jäävät vähäisiksi matalan palamislämpötilan ansiosta. Lisäksi leijukerros polton suosion kasvuun on vaikuttanut savukaasujen rikinpuhdistuksen edullisuus, mikä tapahtuu syöttämällä kalkkia suoraan tulipesään. (Huhtinen, 2004, 153.)

Leijukerroksen toimintaperiaate tulee esille kuvasta 1 tarkastelemalla kuinka hiekkakerros käyttäytyy, kun sen läpi virtaa ilmaa eri nopeuksilla.



Kuva 1. Leijutusnopeuden vaikutus leijukerroksen painehäviöön ja leijumistapaan.

(Huhtinen, 2004, 154.)

Kattilassa oleva hiekkakerros muodostaa liikkumattoman kerroksen, kun siihen vaikuttava hidassuuntainen ilmavirta nopeutuu ja ilmavirtauksen painehäviö kasvaa suoraan verrattuna nopeuteen. Leijuminen alkaa, kun tietyssä nopeudessa painehäviö on kasvanut hiekkakerroksen hydrostaattista painetta vastaavaksi ja hiekkapartikkeleihin kohdistuva voima on maan vetovoiman suuruinen. Partikkeliin vaikuttaviin voimiin kuuluu maan vetovoiman lisäksi virtaavan aineen noste ja sen aiheuttama kitkavoima. Sitä nopeutta, jolla kerros alkaa leijua kutsutaan minimileijutusnopeudeksi. Tähän nopeuteen vaikuttaa hiekkahiukkasten koko. Mitä pienemmäksi hiukkasten koko muuttuu sitä pienempi leijutusnopeus vaaditaan, että hiekkakerros alkaa leijua. Leijukerrokselle tyypillinen ominaisuus on, että leijutusnopeuden kasvaessa hiekkakerros alkaa sekoittua ja peti eli leijuva hiekkakerros laajenee. Leijukerroksen tyhjän tilan osuus ( $\epsilon$ ) kuvaa petissä tapahtuvaa laajenemista ja se tarkoittaa hiukkasten välissä olevan leijutusväliaineen täyttämisen tilavuuden suhdetta koko leijukerroksen tilavuuteen.

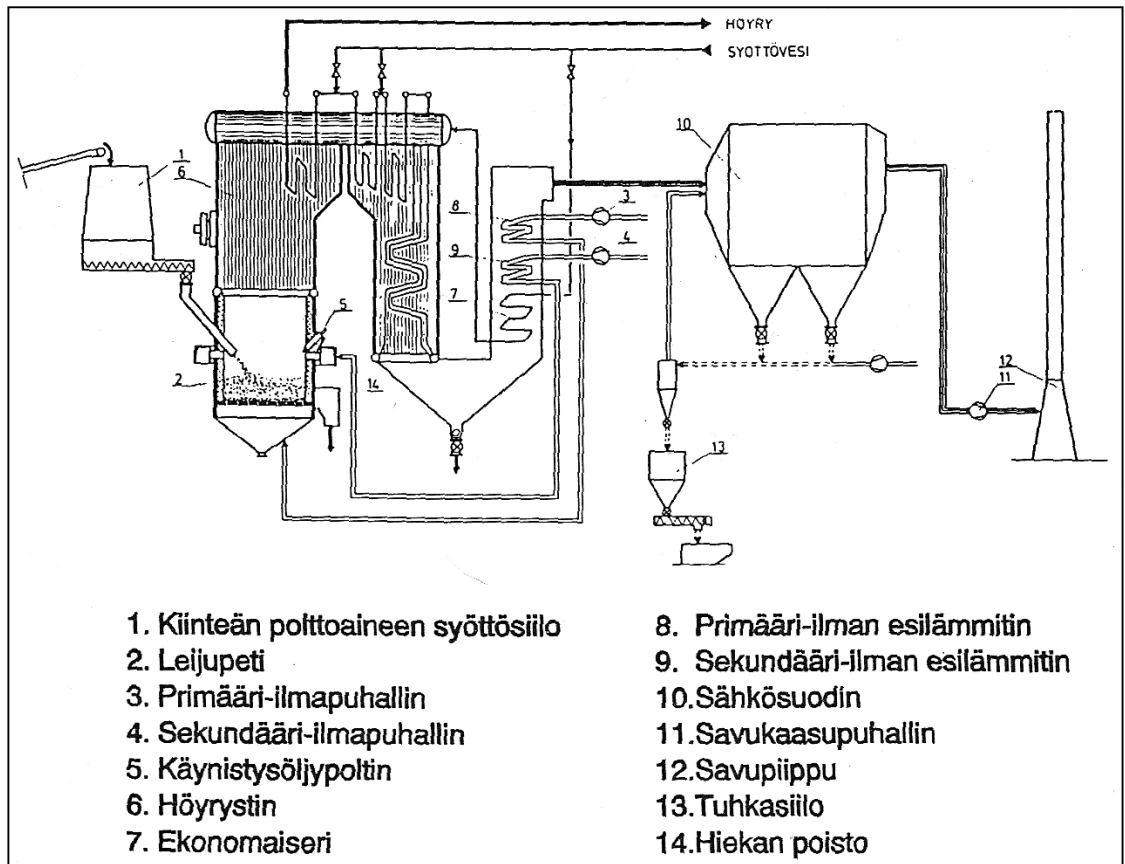
teen. Minimileijutusnopeudella tyhjän tilan osuus on sama kuin kiinteässä hiekkakerroksessa eli noin 0,4. Kun leijutusnopeutta kasvatetaan minimileijutusnopeutta suuremmaksi, leijukerroksen aiheuttama painehäviö pysyy leijukerroksen hydrostaattisen paineen suuruisena eikä enää kasva siitä. Tällöin leijukerros alkaa kuplia, kun ilmamäärä kulkee sen läpi ilmakuplina. Kattiloita, joissa käytetään tällaista leijutustapaa kutsutaan leijupetikattiloiksi ja niiden leijukerrosta leijupetiksi. Toinen nimitystapa näille kattiloille on kerrosleijukattila. Nimi juontuu siitä, että niissä leijupetillä on selkeä pinta, jossa se loppuu ja yläpuolella oleva kaasutila (freeboard) alkaa. (Huhtinen, 2004, 154-155.)

Toisessa leijutustavassa leijutusnopeus on hiekkapartikkelien lentoonlähtönopeutta suurempi ja tällöin hiukkaset lähtevät kulkemaan leijutusväliaineen mukana. Tämän tyyppisiä kattiloita kutsutaan kiertopetikattiloiksi tai kiertoleijukattiloiksi. Niissä savukaasuista erotetaan mukana liikkuvat hiukkaset ja mahdollinen polttoaine syklonilla ja palautetaan sitten takaisin tulipesään. Kiertopetikattiloissa tyhjän tilan osuus on lähellä arvoa 1, eikä niissä ole nähtävissä selkeää petin pintaa. Petin tiheys pienenee korkeuden kasvaessa. (Huhtinen, 2004, 155.)

### 5.1.1 BFB-kattilat

BFB on lyhenne sanoista Bubbling Fluidized Bed. BFB-kattiloista käytetään myös nimityksiä leijupetikattila, kerrosleijukattila tai kuplapetikattila ja ne ovat Rantotek Oy:llä yleisin suunniteltu kattilatyyppejä.

BFB-kattiloiden polttomenetelmällä kosteita polttoaineita ei tarvitse kuivata, koska ne kuivuvat nopeasti petin kuumaan hiekkakerrokseen sekoituessaan ja lämpenevät syttymislämpötilaan. Polttoaineen laatu vaihtelutkin tasaantuvat suuren lämpökapasiteetin ansiosta. Polttoaineen syöttäminen petin päälle tapahtuu mekaanisesti. Polttoainetta säilytetään silloissa, joista sitä siirretään eteen päin niiden alla olevilla kuljettimilla sulkusyöttimen läpi pudotusputkeen ja siitä petin päälle. Näitä syöttöputkia on tavallisesti useita, jotta petin päälle saataisiin pudotettua tasainen polttoainejakauma. Mekaaniset syöttöjärjestelmät ovat siinä mielessä parempia pneumaattisiin verrattuna, että ne sallivat laajemman kokojakauman ja vähäisemmän tarpeen polttoaineen esikäsittelylle. (Huhtinen, 2004, 157.)



Kuva 2. BFB-kattilan periaate. (Huhtinen, 2004, 158.)

Kuvasta 2 selviää BFB-kattilan periaate. Ennen pääpolttoaineen syöttämistä, joka on tavallisesti jokin kiinteä ja kostea aine, peti lämmitetään alustavasti sellaiselle tasolle jolla syttyminen tapahtuu turvallisesti eli 500-600°C. Alkulämmittämiseen käytetään öljy- tai kaasulämmitteisiä sytytyspolttimia, jotka sijoitetaan joko petiin tai sen päälle. Tulipesän pohjalla on joko teräslevyyn tai jäähdytysputkistoon hitsattuja suuttimia, joista ilmanjakoarina koostuu. Ilmanjakoarinaa ja tulipesän alaosassa olevia putkia suojataan kulumisen ja ylikuumentumisen kestäväällä vuorauksella. Jotta ilma jakautuisi petiin tasaisesti, pitää arinan painehäviön olla sopivan suuruinen eli n. 30-50 % leijupetin painehäviöstä. Petissä olevan tuhkan poisto tapahtuu, kun hiekkaa päästetään arinassa olevasta aukosta. Sitten se seulotaan karkeasta kuonasta ja palautetaan puhdistettuna kattilaan. Hienojakoinen tuhka, sekä vähitellen myös hiekka, jauhuvat leijupetissä ja poistuvat tulipesästä savukaasujen mukana. Hiekkaa on lisättävä jauhautuneen määrän korvaamiseksi, kun poltetaan vähätuhkaista polttoainetta. Jos polttoaineen tuhka pääsee sulamaan tai pehmenemään, hiekka alkaa sintraantua eli kovettua. Sintraantuneen hiekan poistaminen kattilasta on vaikeaa ja tällöin kattila on myös ajettava alas. Sintraantumisen välttämiseksi petin lämpötila pidetään n. 100°C pienempänä mitä tuhkan pehmenemispiste on. Ko timaisten polttoaineiden poltossa lämpötila on silloin 900°C. Petiä voidaan tarvittaessa jäähdyttää vesiruisku-

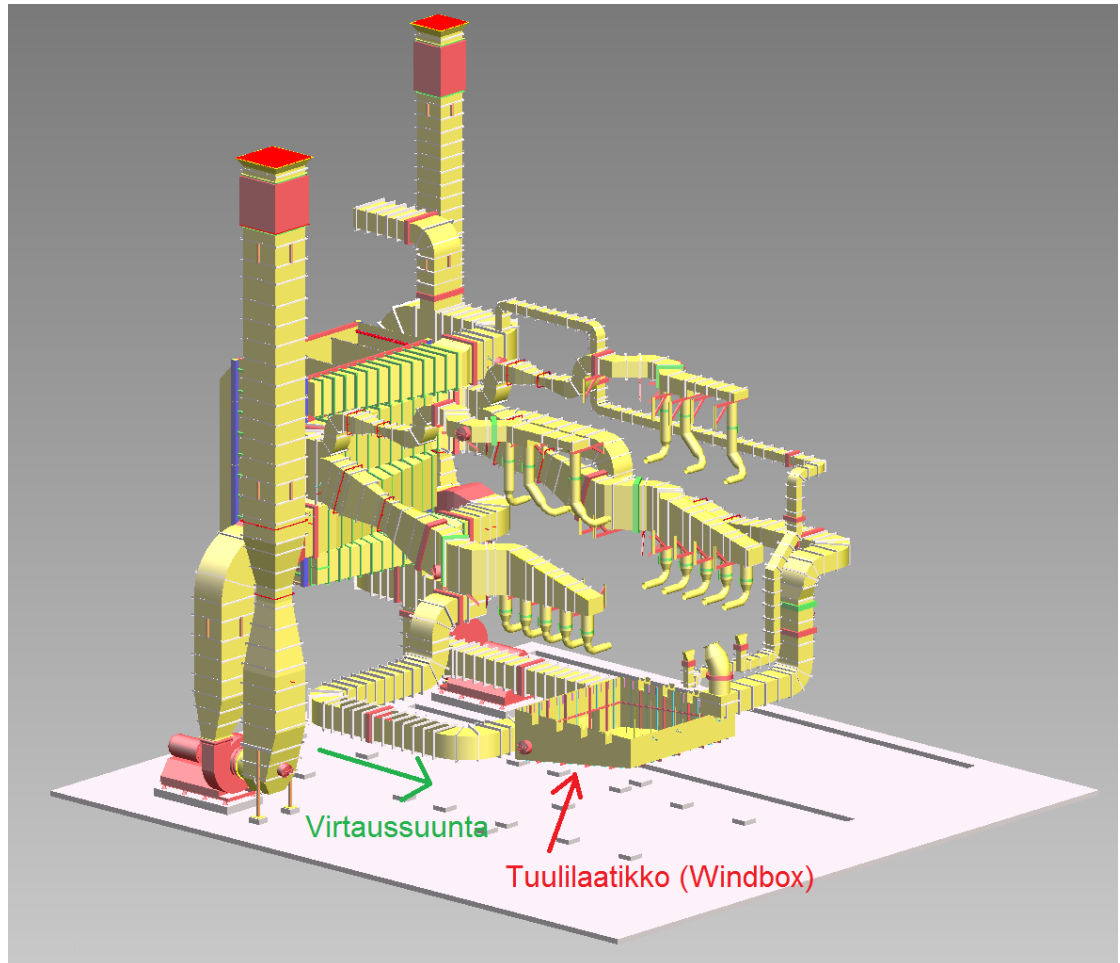
tuksella, savukaasujen kierrätyksellä tai muulla vastaavalla ratkaisulla, mikäli polttoaine on suunniteltua kuivempaa. (Huhtinen, 2004, 158.)

Palamiseen tarvittava happi saadaan osittain ilmanjakoarinnan suuttimien leijutusilmasta ja osaksi petin päälle tuodusta sekundääri-ilmasta. Leijupetikattilalla on 100-30 % säätöalue. Minimitehoa rajoittaa vähintään 700-asteinen petin lämpötila ja minimileijutusnopeus. Yläpään tehon rajoitteena on leijupetin maksimilämpötila, petimateriaalin karkaaminen ja palamattomien kasvaminen. Jos peti jaetaan erillisiin osastoihin tai leijutukseen käytetään kiertokaasua pienellä kuormalla, voidaan säätöaluetta laajentaa. Leijupetissä on mahdollista polttaa monia polttoaineita. Näitä ovat esim. teollisuusjätteet, lietteet mukaan lukien. Lisäksi paljon haihtuvia aineita sisältävät ja alhaisissa lämpötiloissa syttyvät kotimaiset polttoaineet, joilla on myös lyhyt jäännöskoksin palamisaika. Vain 20-30 % haihtuvia aineita sisältävän hiilen poltto on ollut ongelmallista BFB-kattiloissa, koska jäljelle jäävän koksin täydellisen palamistuloksen saavuttamiseksi alhaisissa lämpötiloissa vaatii useiden sekuntien palamisajan. BFB-kattiloissa ei tähän pystytä ja palamattomien määrän saaminen alle 5 %:iin on ollut hankalaa. (Huhtinen, 2004, 158-159.)



## 6 PALAMISILMAKANAVAT

Ilmakanavilta vaaditaan kaasutiivyyttä sekä yli- ja alipaineiden kestoa. Kanavissa vallitsevat paineet määrittävät tarvittavan paineenkeston suuruuden, mutta vähintään  $\pm 5$  kPa vaaditaan. Jotta virtaushäviöitä tapahtuisi mahdollisimman vähän, tulee kanavistoissa pyrkiä välttämään äkillisiä suunnanmuutoksia, supistuksia tai laajennuksia ja lisäksi kanavan kokonaisaukeamiskulman on oltava alle  $15^\circ$ . (Huhtinen, 2004, 241.)



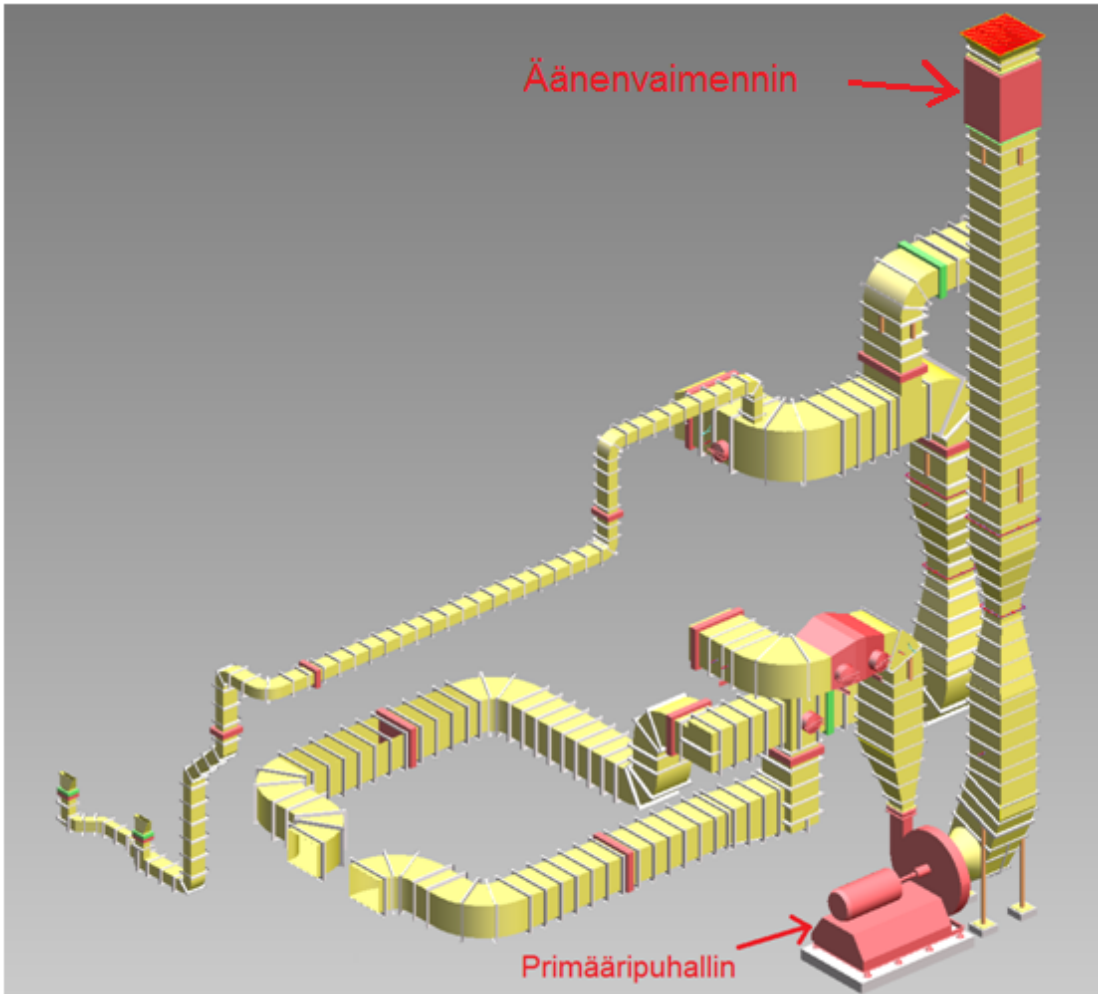
Kuva 3. BFB-kattilan ilmakanavat.

Kuvassa 3 näkyy erään Rantotek Oy:ssä suunnitellun BFB-kattilan ilmakanavisto. Niin ilmakanavien kuin savukaasukanavienkin jäykisteinä pyritään käyttämään latta-jäykisteitä, mutta suurempikokoisissa kanavissa käytetään kulmajäykisteitä.

Puhallusilma otetaan kattilahuoneen yläosista tai ulkoa ja kanavat varustetaan useimmiten äänenvaimentimilla melusaasteen vähentämiseksi. (Papunen, 2012.)

## 6.1 Primääri-ilmakanavat

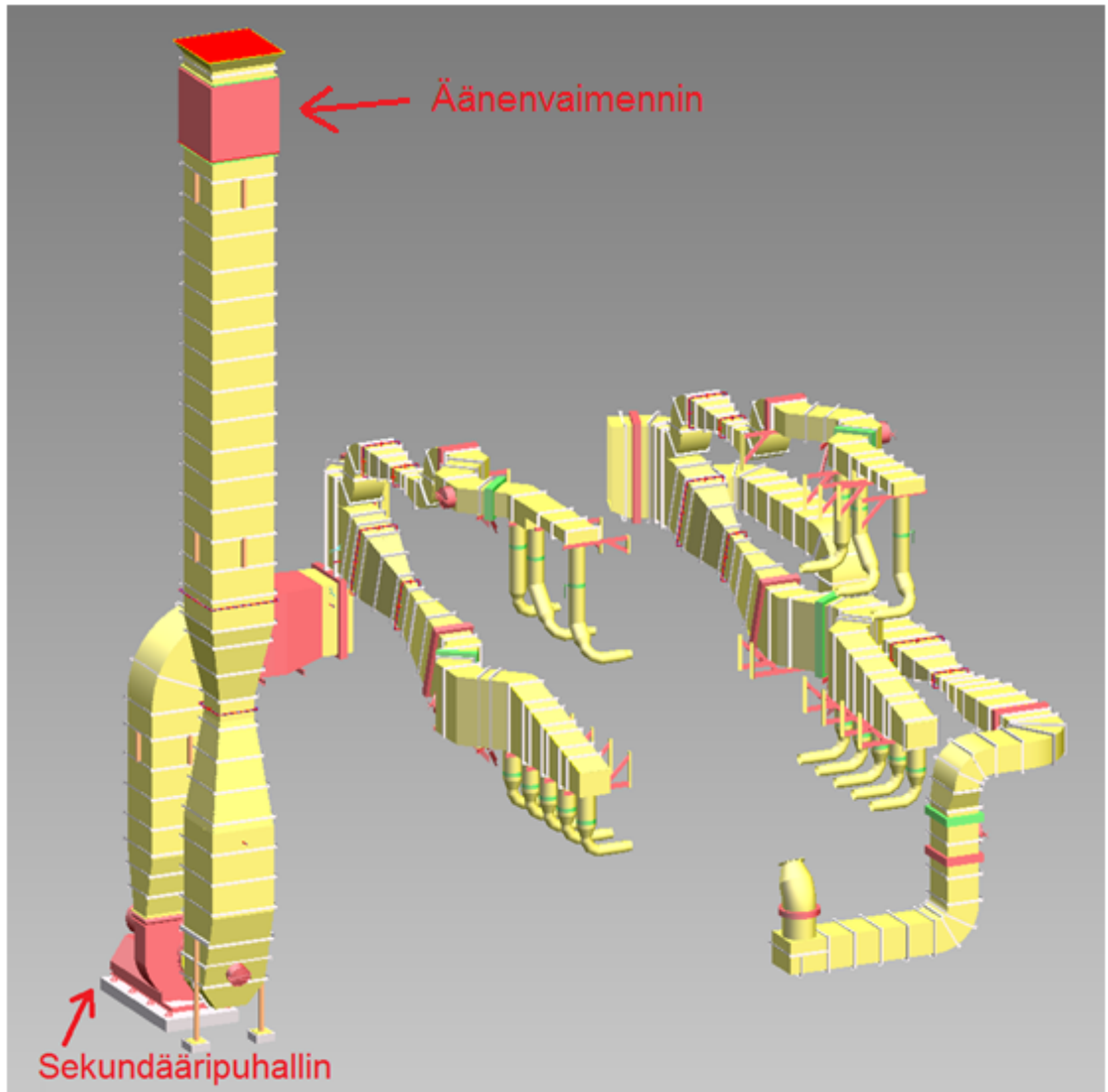
Primääri-ilmakanavat vievät puhaltimen avulla leijutusilmaa tuulilaatikkoon, joka on kattilan alapuolella. Tuulilaatikon kautta tulipesään arinan pohjalla olevista suuttimista johdettu leijutusilma saa petin leijumaan. Osaa ilmasta käytetään palamisilmana. Primäärikanavat on kuvattu kuvassa 4.



*Kuva 4. BFB-kattilan primäärikanavat.*

## 6.2 Sekundääri-ilmakanavat ja tertiääri-ilmakanavat

Sekundääri-ilmapuhallin vie palamisilmaa kanavaa pitkin kattilan tulipesään käytettäväksi petin päällä kiinteän polttoaineen täydellisen palamisen varmistamiseksi. Sekundääri-ilmaa käytetään myös käynnistyspolttimissa, kiinteän polttoaineen syöttämissä tulipesään sekä kuormapolttimissa. (Huhtinen, 2004, 241.)



*Kuva 5. BFB-kattilan sekundäärikanavat alempana, tertiäärikanavat ylempänä.*

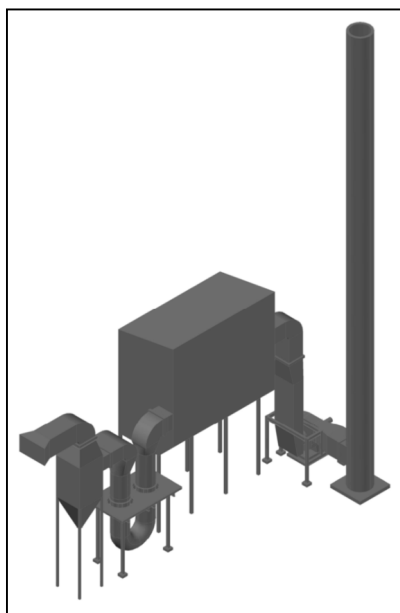
Sekundääri ja tertiäärikanavat ovat esitettyinä kuvassa 5. BFB-kattilat varustetaan tertiäärikanavilla, jotka haarautuvat aina luvon (Luvo = Luftvorwärmer, ilman esilämmitin) jälkeisestä sekundäärikanavan osasta. Tertiäärikanavien ilma viimeistelee polttoaineen täydellisen palamisen. (Papunen, 2012.)

## 7 SAVUKAASUKANAVAT

Savukaasut poistuvat kattilan tulipesän yläosasta. Savukaasukanavat kuljettavat savukaasut lopulta sähkösuotimen läpi ja puhdistettu savukaasu etenee ympäristöön piipun kautta. Savukaasukanava on esitetty kuvassa 6.

Savukaasujärjestelmän kanaviin kohdistuu samanlaisia vaatimuksia kuin ilmakehään liittyen niiden paineiden keston, kaasutiivyyteen sekä äkillisten suunnanmuutosten, supistusten ja laajennuksien välttämiseen. Savukaasujen nopeuden on oltava vähintään 8-10 m/s jopa minimikuormalla, jotta sedimentoitumista eli kerrostumista ei pääsisi syntymään. Nopeus ei saa kuitenkaan olla niin suuri, että painehäviö ja tarvittava puhallinteho kasvaisivat liiallisiksi täydellä kuormalla. Savukaasukanavien pitää olla hyvin eristettyjä, jotta savukaasujen sisältämä rikki ei pääse aiheuttamaan vaurioita rakenteille. Erityistä tarkkuutta vaaditaan kanavien luukkujen ym. kylmäsiltojen eristämässä, jotta lämpötila ei niissä kohdin pääsisi nousemaan yli happokastepisteen. (Huhtinen, 2004, 241.) Happokastepiste on se lämpötila missä savukaasujen rikkidioksidi ja rikkiatrioksidi muodostavat tiivistyneen veden kanssa syövyttävää rikkihappoa. (WebDia.)

Savukaasukanavat ovat ilmakehää korroosioherkempiä johtuen savukaasujen epäpuhtauksista. Savukaasukanaviin on kytketty aina jonkinlainen puhdistusjärjestelmä, joita ovat mm. sähkösuotimet, letkusuotimet ja pesurit. (Papunen, 2012)



*Kuva 6. Rantotek Oy:n suunnitteleman jätteenpolttolaitoksen savukaasukanava.*

## 8 PARAMETRISOINTI

Kattilalaitosten kanavistot ovat harvoin samanlaisia, vaikka niistä löytyy samoja elementtejä. Kohteissa, joihin kanavistoja suunnitellaan, on usein jo ennestään rakenteita, joita pitää ottaa huomioon. Yhdessä suunnitteluprojektissa voi olla mahdollista suunnitella kanava kulkemaan suoraan kohteeseensa, kun taas toisessa projektissa kanavan reittiä suunniteltaessa voi joutua ottamaan huomioon esim. rakennusten piliarien, koneiden, laitteiden ym. rakenteiden sijainti. Erilaisten kanavaelementtien määräkin vaihtelee projektikohtaisesti ja siksi ei ole mahdollista tai järkevää yrittää tehdä mallia yhdestä kanavistokokonaisuudesta mikä toimisi kaikissa tapauksissa. Rantotek Oy:n ohjaajan kanssa päädyttiin siihen tulokseen, että on viisainta tehdä parametrisoidut mallit yleisimmistä kanavistoissa käytetyistä elementeistä. Malleja yhdistellään sitten manuaalisesti kokoonpanotiedostossa valmiiksi kanavakokonaisuuksiksi ja nämä voidaan viedä ulos (Export to DWG) AutoCAD dwg-tiedostomuodossa.

Parametrisoitavat 3D-mallit on tarkoitettu layout-käyttöön eli yhteen CAD-tiedostoon tullaan lisäämään koordinaatiston avulla määriteltyihin paikkoihin kattilalaitoksen mallinnettuja osia sitä mukaa kuin niitä saadaan valmiiksi. Tiedoston koko kasvaa, kun siihen kertyy lopulta useita malleja, minkä vuoksi mallien mallinnustarkkuus ei saa olla korkein mahdollinen. Esimerkiksi kulmajäykisteiden pyörityksiä ei mallinnetta, mikä pienentää omalta osaltaan mallin tiedostokokoa. Tärkeää layout-mallissa on, että 3D-mallien tilanvaraustarve tulee selville. Tällöin tulevien mallien suunnittelua ja sijoittelua voidaan tehdä paremmin tämän tiedon avulla.

Parametrisoinnin etuna on, että selkeästi nimetyt parametrit antavat paremman käsityksen mallin ominaisuuksista. Esimerkiksi Duct\_L on kuvaavampi parametrin nimi kanavan pituudesta kuin d05. Parameters-työkalulla parametreille voi myös lisätä niitä ennestään selventäviä kommentteja. Olisi vaivalloista, jos yksittäisiä mittoja ja piirteiden arvoja joutuisi muokkaamaan kaivamalla niitä esiin eri 2D-luonnoksista ja piirrepuusta, kun niitä voi hallinnoida ja muokata kätevästi yhdessä paikassa, missä kaikki parametrit ovat näkyvillä Parameters-työkalussa. Parametrin nimen muuttaminen päivittää sen kaikkialla muuallakin, missä kyseistä nimeä on käytetty. Monesti tiettyä parametria käytetään useissa eri paikoissa ja parametrin arvon muuttaminen päivittää ne kaikki.

## 8.1 Inventor

Inventor on 3D-mekaniikkasuunnitteluun, tuotteiden simulointiin, työkalujen suunnitteluun, tilausohjautuvaan suunnitteluun ja suunnittelutiedon jakamiseen kehitetty 3D-CAD-ohjelmisto. Sillä on mahdollista luoda tarkkoja 3D-malleja, joiden avulla tuotteen voi suunnitella, visualisoida ja simuloida ennen sen valmistusta. (Autodesk Inventor.)

Kun aletaan tehdä uutta tiedostoa, Inventor tarjoaa valittavaksi useita eri tiedostotyyppisiä eri tarkoituksiin. On mahdollista tehdä ohutlevyosia, tavallisia osia, kokoonpanoja, piirustuksia, hitsauksia ja esityksiä. Opinnäytetyön mallit tehtiin Standard (mm).ipt - tiedostoina, eli tavallisina osina. Osat liitettiin yhteen Standard (mm).iam eli kokoonpanotiedostoissa.

Inventor-mallinnuksessa tyypillinen työnkulku on sellainen, että aluksi piirretään 2D-luonnos (2D-Sketch) jolle annetaan rajoitteita ja sääntöjä, jotta luonnokseen piirretyt viivat, kaaret ym. osat pysyvät kohdallaan toisiinsa tai koordinaatistoon nähden. Sitteen ohjataan luonnoksen osien välisiä etäisyyksiä, niiden muotoja ja kokoja mitoittamalla. Kun luonnos on valmis, tullaan ulos luonnostilasta ja muutetaan se 3D-osaksi eli peruspiirteeksi käyttämällä esim. pursotustyökäluä (Extrude). Malliin lisätään tarvittaessa lisää piirteitä, kuten reikiä, pyöristyksiä, viisteitä jne. (Home, 2004, 15.)

## 8.2 Parametrisoitavat mallit

Työssä mallinnettaviin elementteihin kuuluu suorat kanavaosuudet, mutkat, venturit, palkeet ja supistuskappaleet. Työn loppuvaiheessa tehtiin lisäksi vielä malli suorakaiteen muotoisen kanavan haaroitusosasta. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi, miten kukin malleista on suunniteltu. Ensimmäisen mallin tekeminen käsitellään hieman tarkemmin, jotta periaate tulee selville ja loput vähemmän yksityiskohtaisesti. Inventor-ohjelmassa navigointia ym. peruskäyttöä ei tulla tässä työssä käsittelemään.

Mallien parametrien nimissä on käytetty englannin kieltä käyttäjäkannan mahdollisen laajenemisen huomioon ottaen ja niitä on lyhennetty jossain määrin, jotta parametrisointi olisi visuaalisesti selkeämpää. Seuraavia kirjaimia ja kirjainlyhenteitä käytetään yhdenmukaisesti monissa tulevien kappaleiden mallien parametreissa:

w = width (leveys)

h = height (korkeus)

t = thickness (paksuus)

$r$  = radius (säde)  
 $L$  = length (pituus)  
 Gap = väli  
 $dist$  = distance (etäisyys)  
 $clr$  = clearance (vällys)  
 $d$  = diameter (halkaisija)

Muutama esimerkki parametrien nimistä:

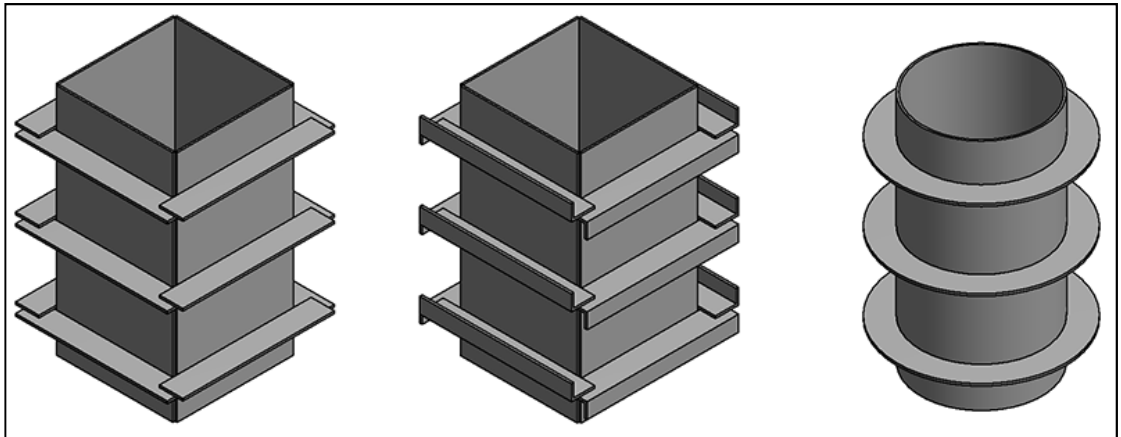
Stiffener\_t = jäykisteen paksuus

Duct\_t = kanavalevyn paksuus

Parametreja voi ohjata vaihtoehtoisesti Microsoft Excel-tiedostojen kautta tai liitännäisten (Plug-in) avulla. Tällä kertaa päätettiin käyttää Inventorin omaa Parameters-työkalua.

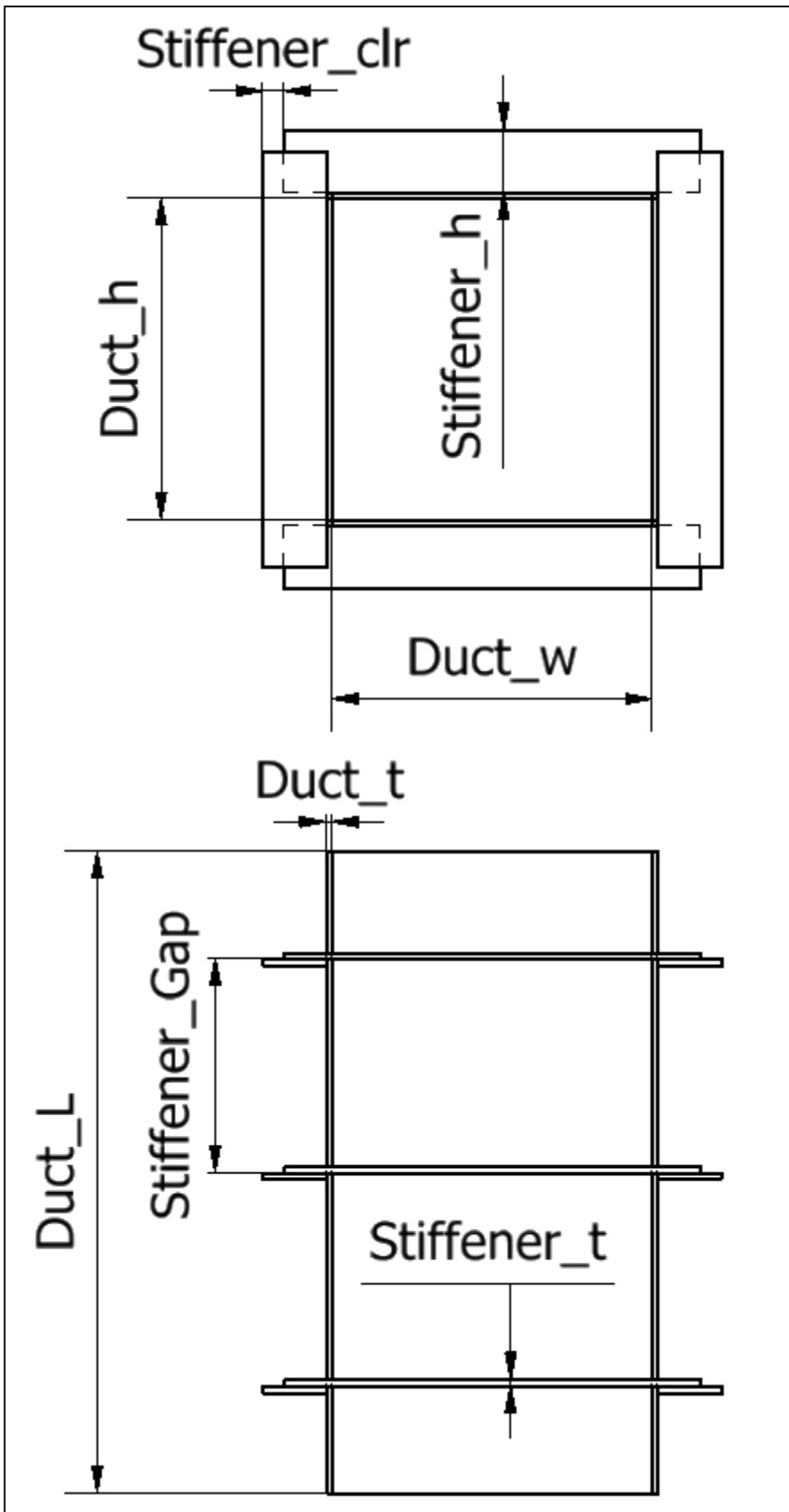
### 8.2.1 Suorat

Malleja tehtiin yhteensä kolme kappaletta (Kuva 7). Kaksi mallia suorakaiteen muotoiseen kanavaan, joista ensimmäinen lattajäykisteillä ja toinen kulmajäykisteillä ja lisäksi yksi malli pyöreästä kanavasta lattajäykisteillä.



Kuva 7. Suorat kanavaosuudet mallinnettuna.

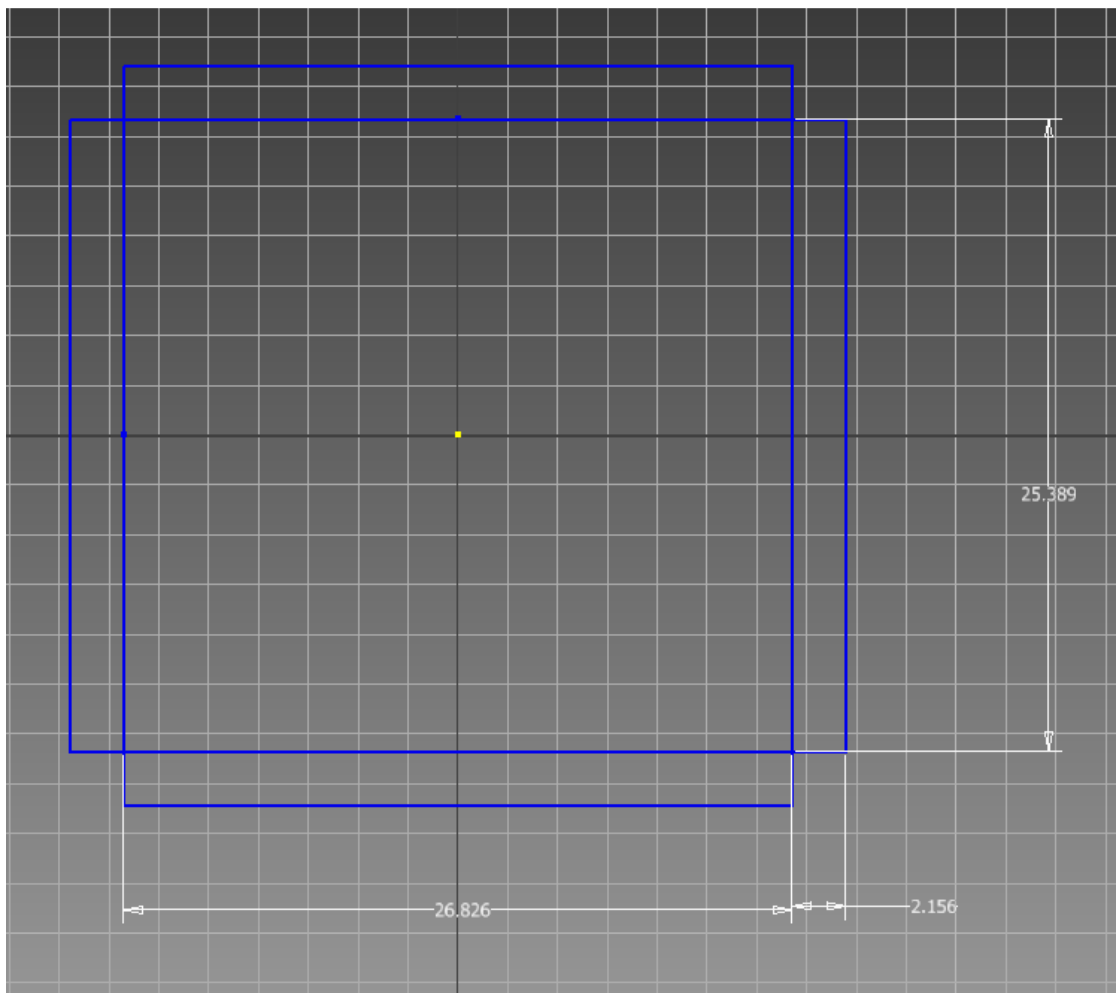
Suorakaiteen muotoisella lattajäykistetyllä suoralla kanavalla on kahdeksan perusparametria, jotka määrittelevät sen muodon. Kuvan 8 mukaisesti niitä ovat kanavan sisäleveys (Duct\_w), kanavan sisäkorkeus (Duct\_h), kanavan pituus (Duct\_L), kanavalevyn paksuus (Duct\_t), jäykisteiden profiilin korkeus (Stiffener\_h), jäykisteiden paksuus (Stiffener\_t), jäykisteiden vällys (Stiffener\_clr) ja jäykisteväli (Stiffener\_Gap). Jäykisteiden välille jätetään pieni vällys, jotta ne olisi helpompi hitsata kiinni toisiinsa.



Kuva 8. Suoran lattajäykistetyin kanavan parametrit.



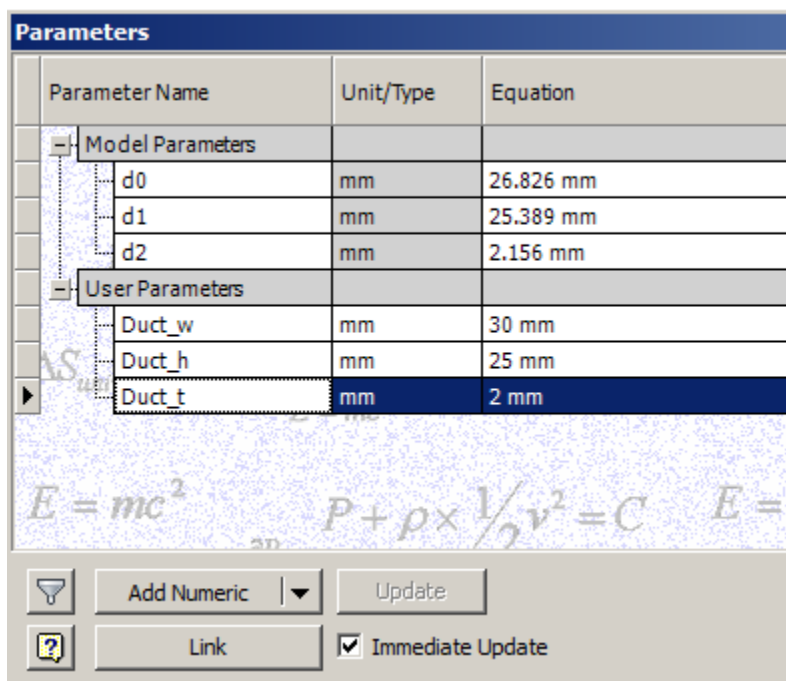
Mallin tekeminen alkoi kanavan profiilin piirtämisellä 2D-luonnoksessa. Siihen piirrettiin neljä suorakaidetta (Rectangle), ja sitten käytettiin horisontaalista ja vertikaalista rajoitetta pitämään origopiste aivan suorakaiteiden keskellä (Kuva 9). Tämä on hyvä toimenpide tehtäväksi mahdollisimman usein symmetristen kappaleiden mallinnuksessa, koska usein jatkossa voidaan monissa malleissa käyttää koordinaatiston XY-, XZ- tai YZ-tasoja eri piirteiden peilaamisessa, kun tasot kulkevat mallin keskeltä ja origopisteen kautta. Collinear-rajoite, joka pitää viivat samalla suoralla auttaa suorakaiteiden paikalleen laittamisessa toisiinsa nähden. Seuraavaksi mitoitettiin profiilin sisäleveys, sisäkorkeus ja yksi kanavalevyn paksuus. Mittojen arvoista ei tarvitse tässä vaiheessa välittää, koska niitä ohjataan myöhemmin parametreilla. Yhtäsuuruusrajoitteella määrättiin loput mitoittamattomat kanavan levyt yhtä paksuiksi. Rajoitteiden käytöllä ja mitoittamalla kaikki piirretyt viivat muuttuvat vihreistä sinisiksi, mikä on hyvä asia. Tällöin piirustus on täysin määritelty.



Kuva 9. Suorakaiteen muotoisen kanavan profiili.

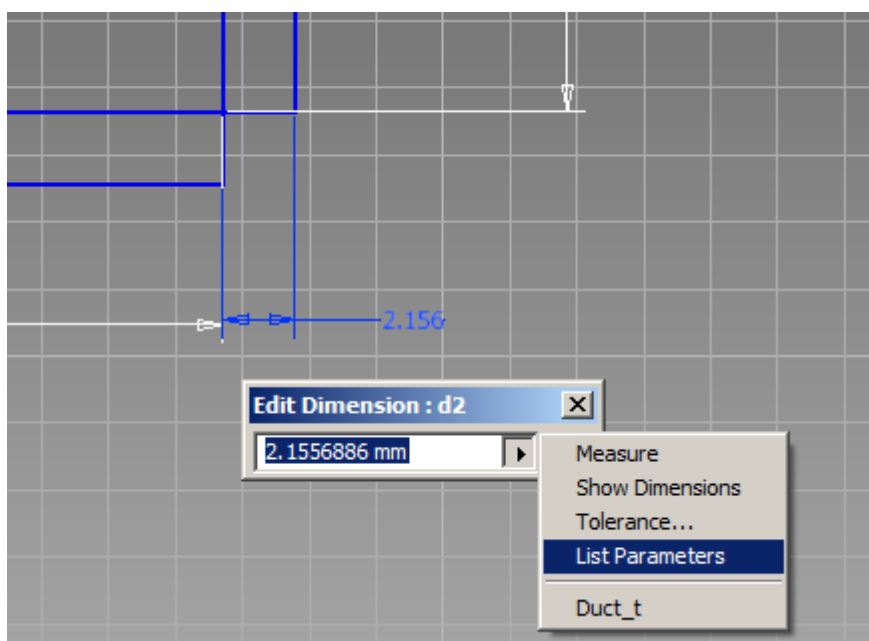
Manage-välilehdeltä löytyy Parameters-työkalu, jossa omien parametrien luominen tapahtuu (Kuva 10). Alkupäässä näkyvät mallin omat parametrit (Model Parameters),

jotka luodaan automaattisesti aina kun on tehty mitoituksia. Add-napilla saatiin luotua numeeriset parametrit Duct\_w, Duct\_h ja Duct\_t, joille annettiin halutut arvot.



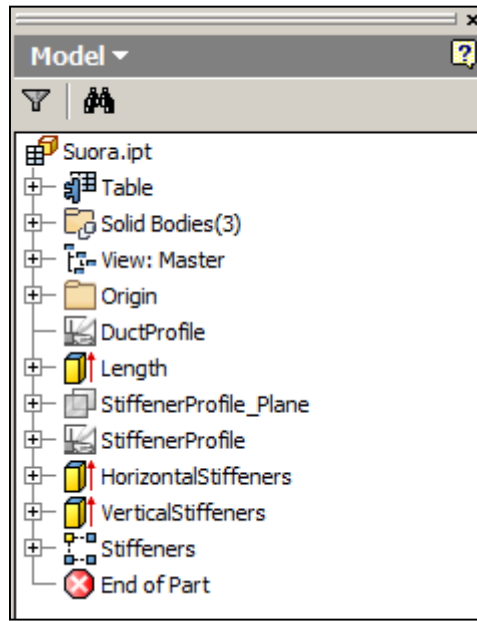
Kuva 10. Parameters-työkalu.

2D-luonnoksessa mittoja tuplaklikkaamalla pääsee muokkaamaan niitä. Tässä tapauksessa valittiin valikosta List Parameters (Kuva 11), joka listaa kaikki käyttäjän tekemät parametrit. Kaikkiin mitoituksiin vaihdettiin juuri tehdyt omat parametrit. Saman voi tehdä vaihtoehtoisesti myös Parameters-työkalun sisällä esim. kirjoittamalla mallin d2-nimisen parametrin Equation-sarakkeeseen itse tehdyn parametrin nimi, joka on Duct\_t.



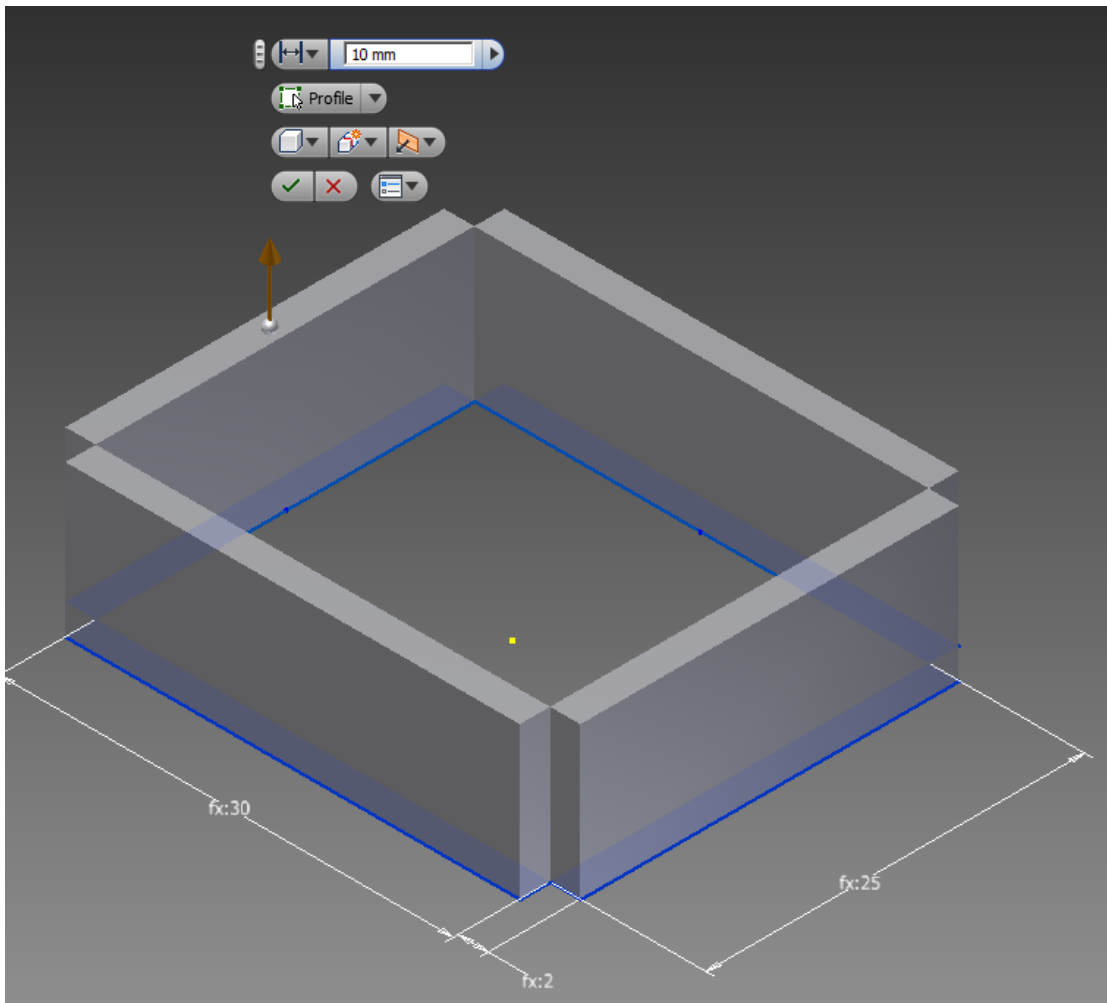
Kuva 11. Yksi vaihtoehto parametrin antamisesta mitalle.

Kun luonnos oli valmis, siirryttiin yleiseen työskentelytilaan painamalla Finish Sketch-nappia ja tällöin kuvakulma muuttui isometriseksi. Luonnostilasta poistumisen jälkeen on mahdollista alkaa käyttää 3D-mallin luomistyökaluja, kuten pursotus (Extrude), pyörähdyskappale (Revolve) jne. sekä 3D-mallien muokkaustyökaluja, kuten reikä (Hole), pyöristys (Fillet) ym. Nämä edellämainitut työkalut monien muiden lisäksi ovat ns. piirteitä (Feature), jotka näkyvät piirrepuussa (Kuva 12) oletuksena käyttöliittymän vasemmassa reunassa.



*Kuva 12. Piiirrepuu.*

Kanavaprofiili muutettiin 3-ulotteiseksi pursottamalla sille pituus, mikä tapahtui klikkaamalla ensin Extrude-työkalua ja sen jälkeen neljää piirustukseen piirrettyä suorakaidetta. Inventor näyttää esikatseluna, mihin suuntaan pursotusta lähdetään tekemään ja kuinka pitkä siitä tulee. Oletusarvona on 10 mm, minkä voisi vaihtaa tässä vaiheessa omaan parametriin, jos sellainen olisi tehtynä. Parametrin oletusarvon voi huoletta hyväksyä tai muuttaa sen haluamaansa muuhun arvoon, koska sen pystyy vaihtamaan jälkikäteenkin. Kun tuplaklikkaa piirrepuussa haluttua piirrettä, tässä tapauksessa tehtyä pursotusta, päästään jälleen samaan muokkaustilaan. Piirteitä on hyvä nimetä kuvaavilla nimillä, varsinkin kun piirrepuuhun alkaa kertyä enemmän piirteitä.



Kuva 13. Kanavaprofiilin pituuden pursotus.

Seuraavaksi tehtiin uusi parametri Duct\_L, annettiin sille sopiva pituus ja kytkettiin se pursotuksen oletusarvon 10 mm tilalle. Nyt kanavalevyt oli mallinnettu (Kuva 13) ja seuraavaksi tehtiin jäykisteet.

Kuva 8 näytti kuinka lattajäykisteet sijoittuvat kanavan ympärille. Määriteltiin uusi parametri jäykisteiden lukumäärälle (Stiffener\_amount), joka on itse asiassa lukumäärä sille kuinka monta neljän jäykisteen muodostamaa jäykistekehää kanavaan tulee. Parametria ei ole tarkoitettu käyttäjän muutettavaksi vaikka se mahdollisuus on jätetty, vaan lukumäärä riippuu kaavan perusteella jäykistevälin ja kanavan pituuden suuruudesta. Laitettiin kaava 1 parametrin Equation-sarakkeeseen:

$$\max(1 \text{ ul}; \text{round}(\text{Duct\_L} / \text{Stiffener\_Gap})) \quad (1)$$

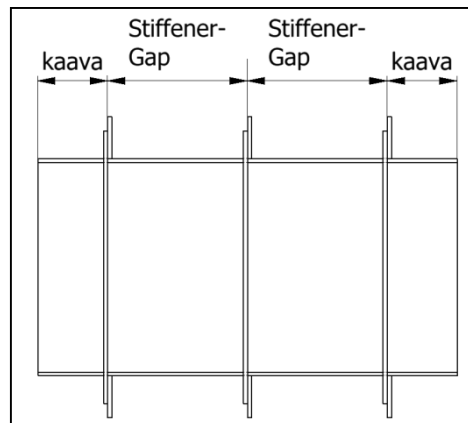
Ul tarkoittaa unitless eli se on arvo, jolla ei ole mitään yksikköä ja joka soveltuu kapalemääriä sisältäville parametreille. Kaavassa max tarkoittaa sitä, että parametri ottaa suuremman kahdesta mahdollisesta arvosta. Puolipisteellä eritellään vaihtoeh-

dot. Round antaa pyöristetyn arvon sulkujen sisältä. Eli kaavan perusteella tulee jäykistekehien lukumääräksi aina vähintään yksi.

Tarkoitus oli mallintaa ensimmäinen jäykistekehä kanavan päädyistä katsoen ja sitten kopioida sitä kanavan suuntaisesti Rectangular Pattern-työkalulla. Tarvittiin luonnos, joka sijaitsee oikealla etäisyydellä kanavan päädyistä. Luotiin alustavasti taso kanavan päätyyn ja siirrettiin sitä. Kysyttäessä etäisyyttä käytettiin kaavaa 2, joka laskee etäisyyden kanavan päädyistä ensimmäiseen jäykistekeheeseen:

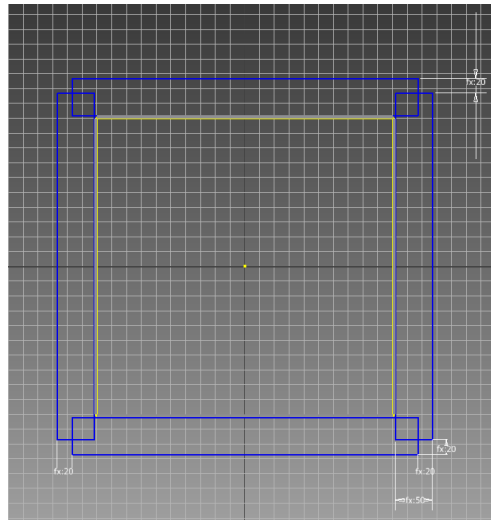
$$( Duct\_L - ( Stiffener\_Gap * ( Stiffener\_amount - 1 ul ) ) ) / 2 ul \quad (2)$$

Tämän kaavan mukaan saadaan ensimmäisen jäykistekehän etäisyys kanavan päädyistä, joka on yhtä suuri kuin viimeisen jäykistekehän etäisyys vastakkaisesta päädyistä (Kuva 14).



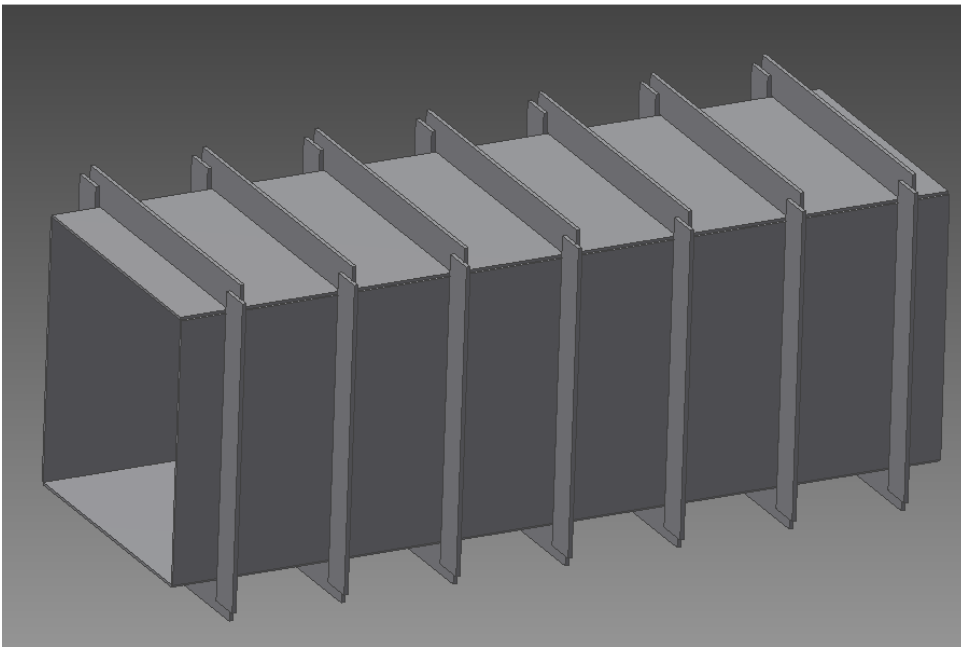
Kuva 14. Jäykisteiden etäisyys kanavan reunasta lasketaan kaavalla 2.

Nyt kun taso oli siirretty oikeaan kohtaan kanavassa, tehtiin sen päälle 2D-luonnos ja projisoitiin sille kanavan leikkaavat viivat. Piirrettiin neljä suorakaidetta, jotka kuvaavat jäykisteitä ja määritettiin luonnos täydellisesti. Ei haittaa vaikka suorakaiteet menevät lomittain osin toistensa päälle (Kuva 15).



*Kuva 15. Jäykisteiden luonnos.*

Poikittaiset suorakaiteet pursotettiin yhteen suuntaan ja pystysuuntaiset suorakaiteet päinvastaiseen suuntaan. Pursotusarvona käytettiin jäykisteen paksuuden parametria. Jotta jäykisteet olisivat oma erillinen kappaleensa, valittiin pursotustyyppiksi vielä New Solid. Lopuksi kopioitiin jäykistekehää Rectangular Pattern-työkalulla kanavan suuntaisesti. Suuntana voi käyttää esim. kanavan särmää tai koordinaattiakselia. Kopioiden lukumääränä käytettiin aiemmin määriteltyä Stiffener\_amount-parametria ja kopiointivälinä Stiffener\_Gap:ia. Nyt malli oli valmis (Kuva 16).

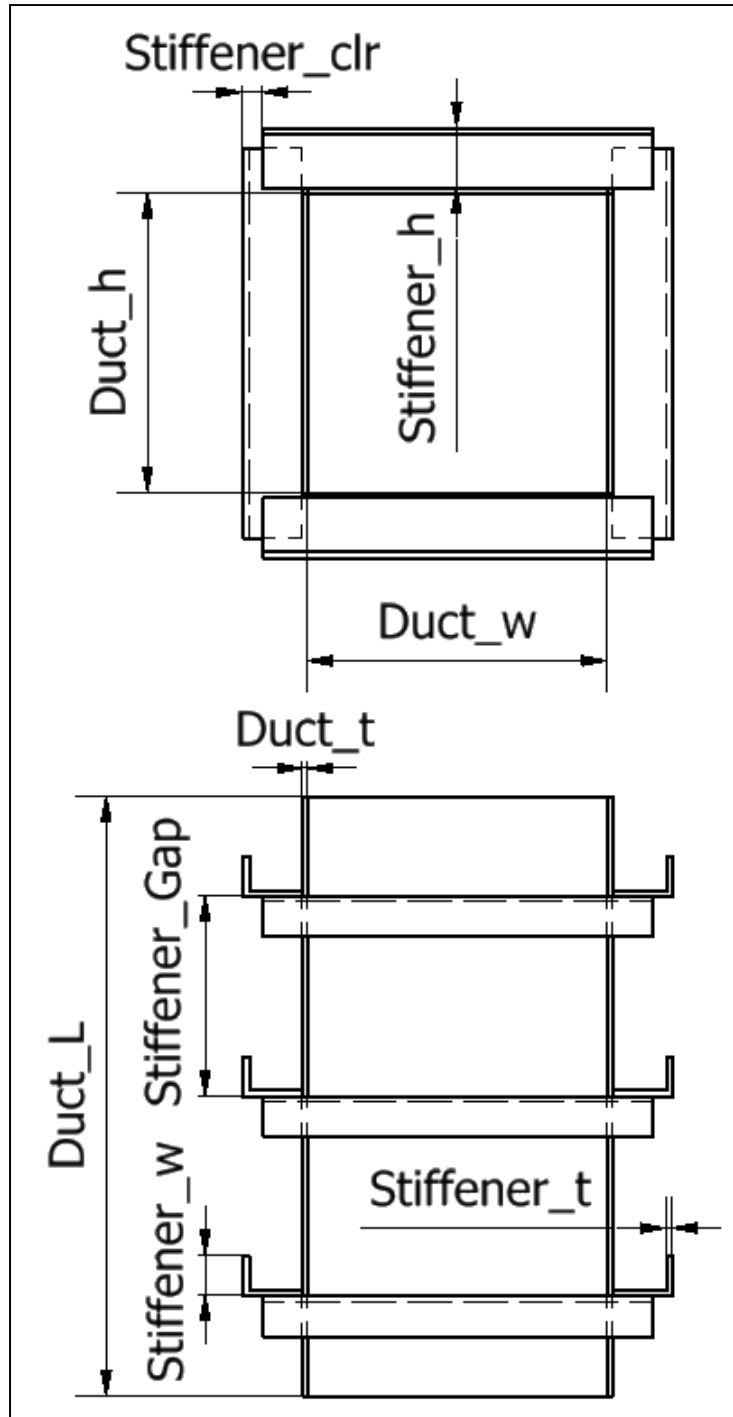


*Kuva 16. Suora kanava lattajäykisteillä.*

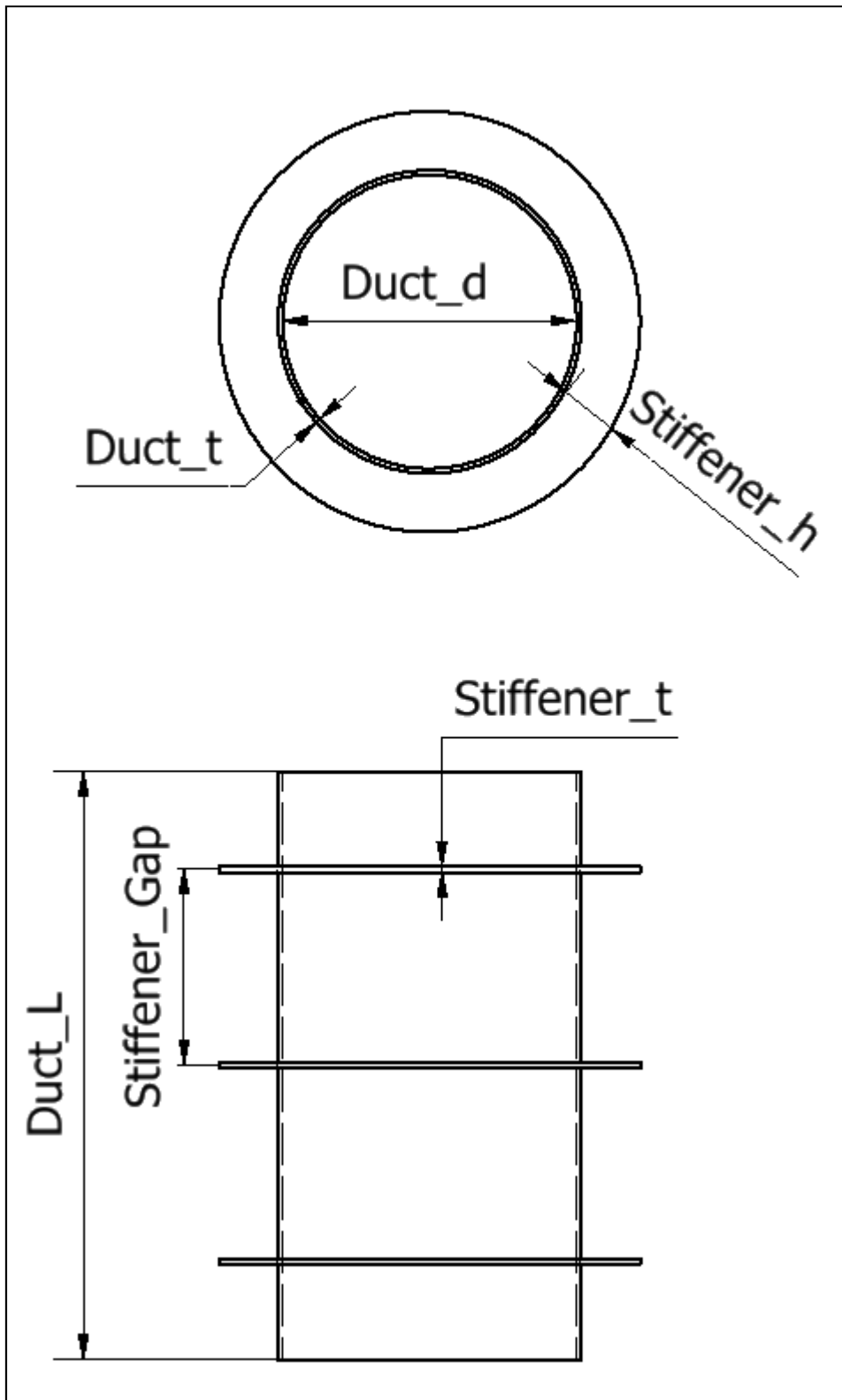
Tätä mallia voitiin käyttää pohjana kulmajäykistetyn kanavan tekemisessä. Ei tarvittu muuta kuin yksi uusi parametri jäykisteprofiilin leveydelle (Stiffener\_w, kuva 17). Piirrepuusta poistettiin jäykistekehien kopiointi (Rectangular Pattern), koska kopioitavien

jäkisteosien muoto muuttuu. Muutettiin pursottamalla ensimmäinen lattajäkistekehä kulmajäkistetyksi ja tehtiin äsken poistettu kopiointi uudestaan.

Pyöreään kanavan tekemisessä periaate on sama kuin kahdessa aiemmassa vaikka profiili muuttuikin kun kanavan leveyden ja korkeuden parametrit korvattiin sisähalkaisijaparametrilla (Kuva 18).



Kuva 17. Kulmajäkistettyyn kanavaan tulee yksi parametri lisää lattajäkistettyyn verrattuna: jäkisteprofiilin leveys (Stiffener\_w).

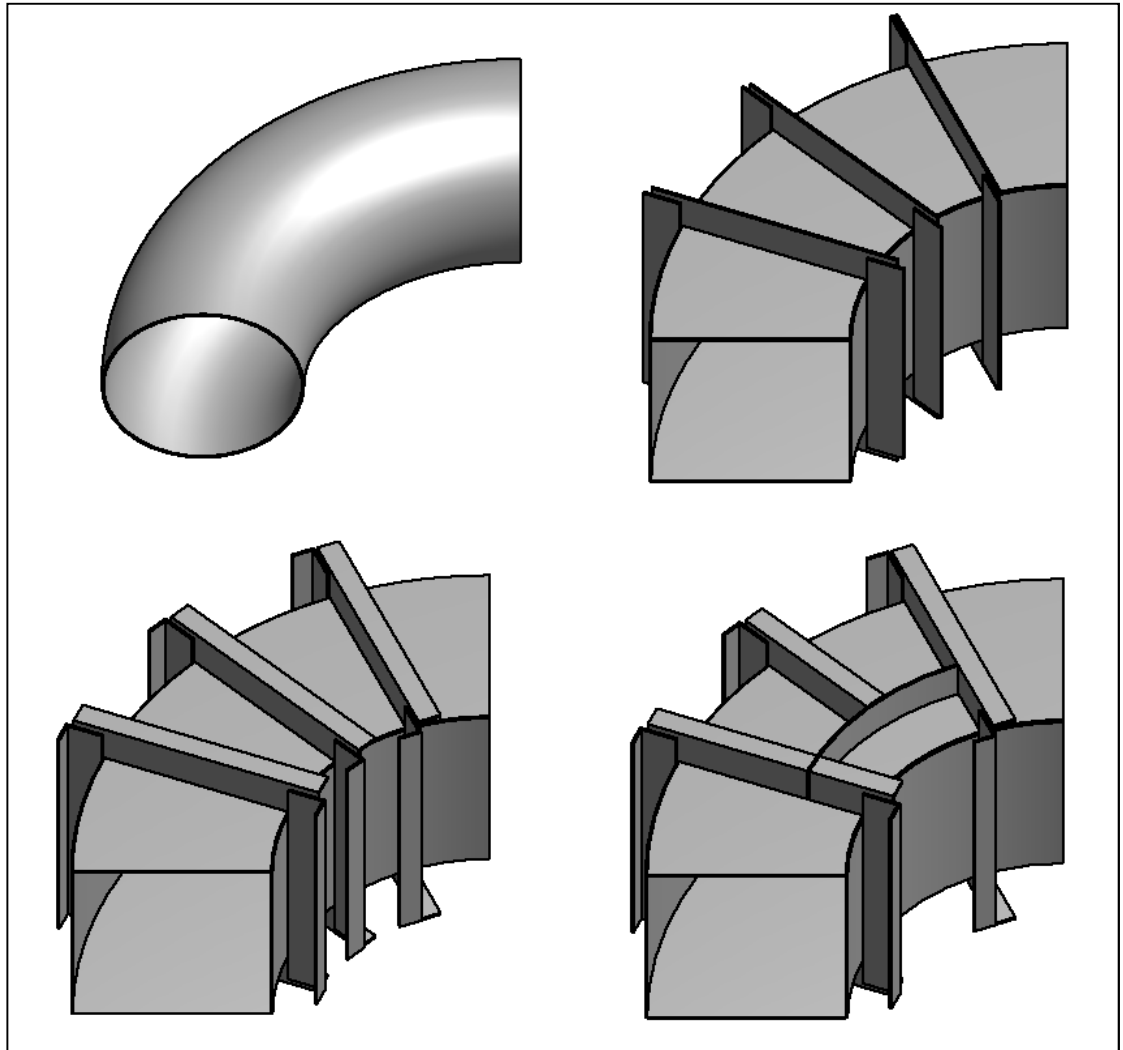


Kuva 18. Pyöreän kanavan suoran parametrit.



## 8.2.2 Mutkat

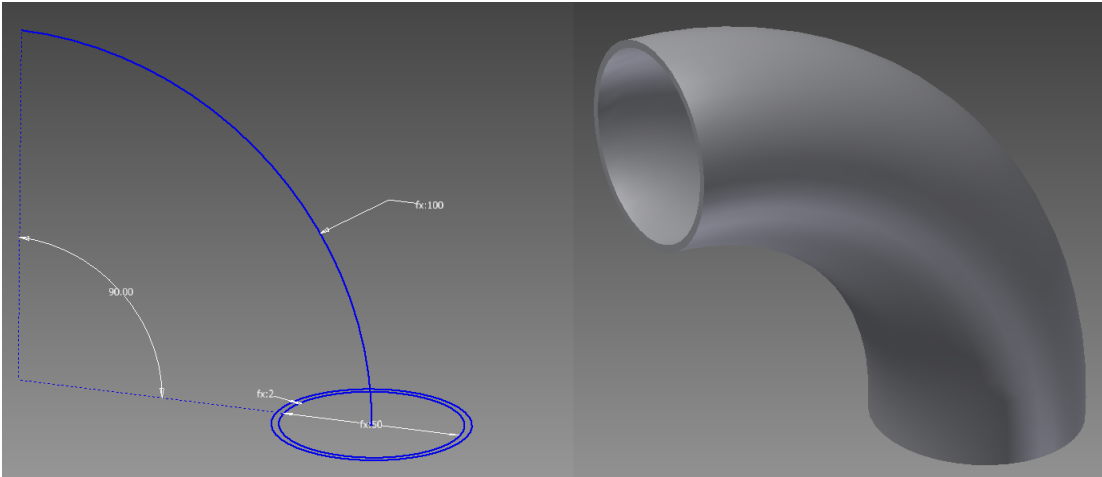
Pyöreään kanavaan tehtiin mutkasta yksi malli, suorakaiteen muotoiseen kanavaan kolme erilaista mallia (Kuva 19). Kun suorakaiteen muotoisen kanavan mutkan sisäsäde on pieni ja jäykistekehiä paljon, voi sisäsäteen kohdalla tulla ahdasta. Toimiva rakennerratkaisu tähän ongelmaan on seuraavan kuvan oikeassa alalaidassa oleva malli, jossa keskimmäiset jäykisteet eivät kuljekaakaan koko kanavan ympäri kehänä vaan kanavan päällä ja alla oleviin lattajäykisteisiin asti.



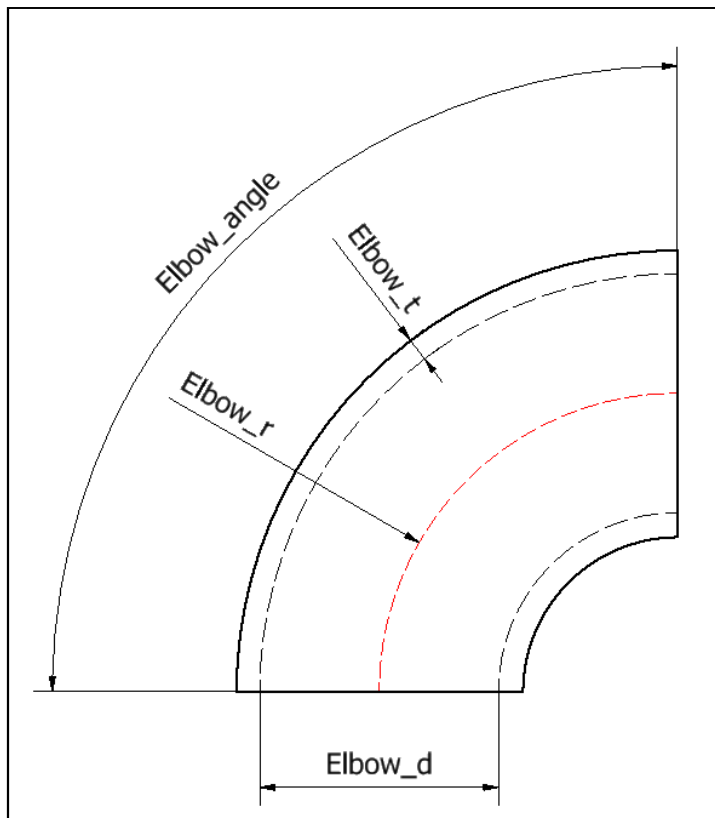
*Kuva 19. Kanaviston mutkien 3D-mallit.*

Pyöreään kanavan mutka on kaikista tehtävistä malleista yksinkertaisin, koska siihen ei tule oletuksena jäykisteitä ollenkaan. Malli toteutettiin Sweep-työkalulla, joka toimii kuin pursotus, mutta siinä profiili pursotetaan käyrää pitkin. Tarvittiin kaksi luonnosta (Kuva 20), joista ensimmäisessä on kappaleen profiili, johon on mitoitettu sisähalkaisija ja aineenvahvuus. Toisessa luonnoksessa on käyrä, joka lähtee profiilin keski-

pisteestä.

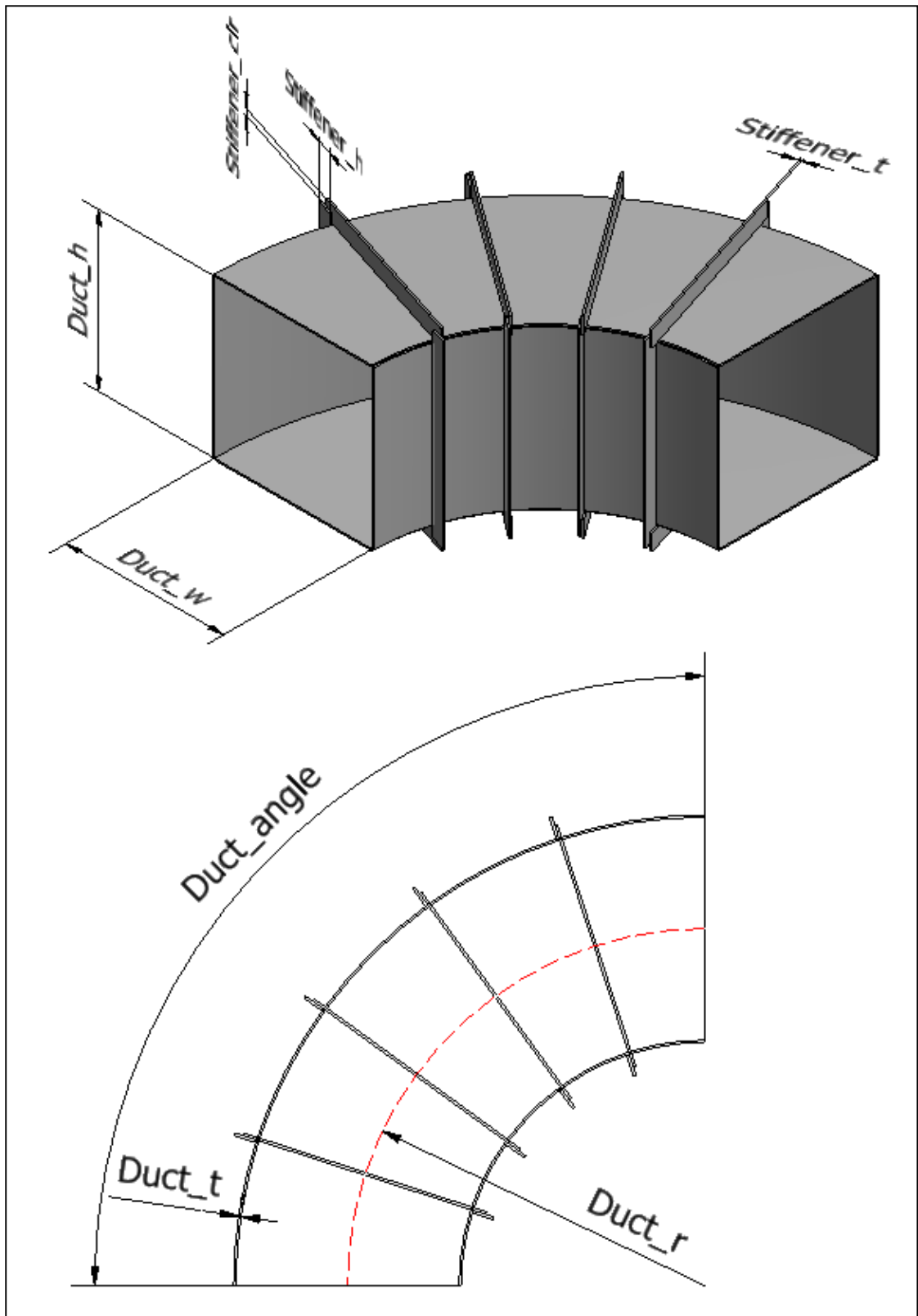


Kuva 20. Pyöreän kanavan mutkan luonnokset ja valmis 3D-malli.



Kuva 21. Pyöreän kanavan mutkan parametrit.

Kuvassa 21 näkyy pyöreän kanavan mutkassa käytetyt parametrit. Suorakaiteen muotoisen kanavan mutkien tekeminen alkoi kanavalevyistä. Ne pysyvät kaikissa loppuissa malleissa samana, vain jäykistämistapa muuttuu. Pyöreän kanavan mutkan sisähalkaisijaparametri vaihtuu sisäleveydeksi ja sisäkorkeudeksi. Levyjen tekemiseen riitti yksi luonnos päältä katsottuna. Päällä oleva levyprofiili pursotettiin ylöspäin ja sivulla olevat alas. Päällimmäinen levy peilattiin alapuolelle.



Kuva 22. Suorakaiteen muotoisen kanavan mutkan parametreja.

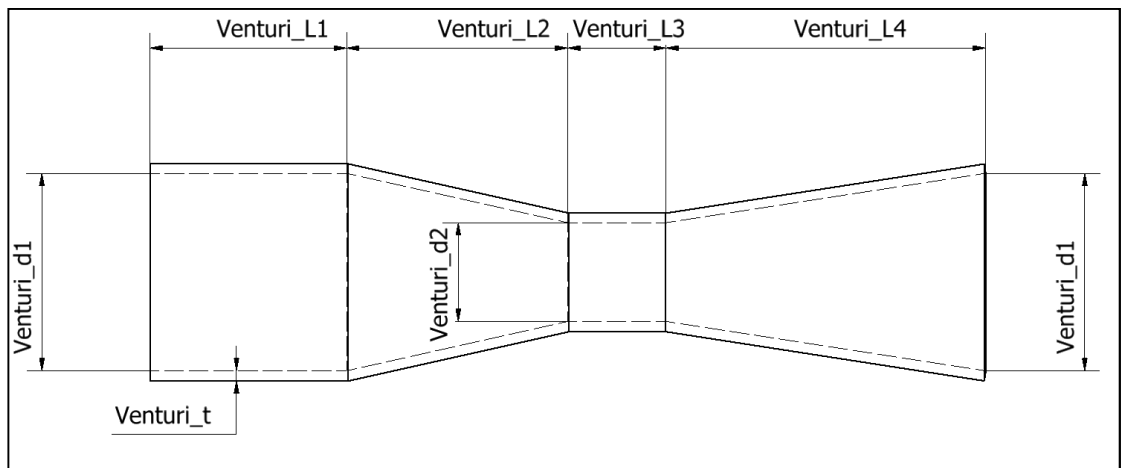
Käyttäjä määrittää jäykistekehien lukumäärän parametrilla `Stiffener_amount`. Tämän luvun perusteella jäykistekehät asetellaan mutkaan tasaisin välein. Mallinnettiin vain yksi jäykistekehä ja loput tehtiin kopioidulla Circular Pattern-työkalun avulla. Kulmajäykistettyihin mutkiin tulee kuvan 22 parametrien lisäksi parametri kulmajäykistepro-

fiilin leveydelle (Stiffener\_w). Kulmajäykisteen pitempi osa (Stiffener\_h) tulee aina kanavalevyä vasten.

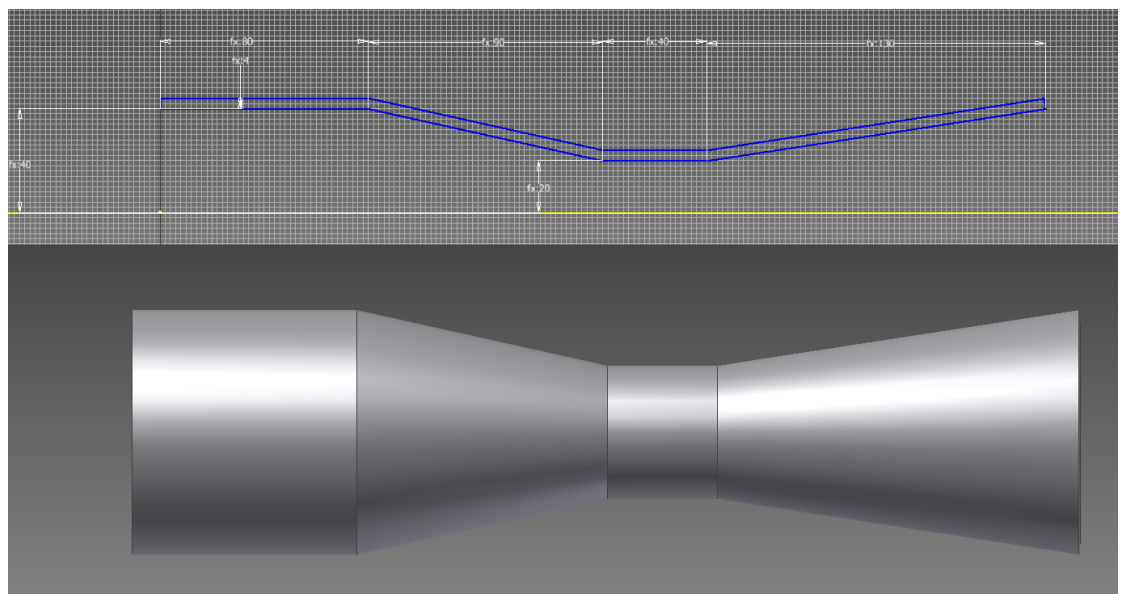
Kulmajäykistetyt mutkan erityistapauksessa sisäsäde voi olla niin pieni, ja jäykisteiden lukumäärä niin suuri, että sisäsäteen kohdalla tulee ahdasta. Siksi tehdään kuvan 19 viimeinen malli. Mallin voi kehittää edellisen pohjalta. Stiffener\_amount-parametrin arvon on oltava pariton. Täysiä jäykistekehiä on parillinen määrä ja vaillinaisia pariton määrä. Parametrien arvojen rajoittamisesta kerrotaan tarkemmin kappaleessa 8.3.1. Vaillinaisia jäykistekehiä on aina täysien välissä ja ne ulottuvat latta-jäykisteeseen asti, joka kulkee ensimmäisestä jäykistekehästä viimeiseen jäykistekehään asti mutkan päällimmäisen ja alimman levyn pinnalla. Parametrilla Support\_dist pystyy säätämään lattajäykisteen sijaintia mutkan sisäsivulevystä katsoen.

### 8.2.3 Venturit

Ventureita tehtiin yksi kappale pyöreään ja toinen suorakaiteen muotoiseen kanaan. Venturien tarkoitus on kiihdyttää jouhevasti kanavan virtausnopeutta hetkellisesti, jolloin saadaan staattista paine-eroa virtausmittausta varten. Saatu paine-ero on verrannollinen virtausmäärään. Venturin poistopuolelta virtaus tapahtuu myös jouhevasti, jotta dynaaminen painehäviö minimoituu. Virtausmittalaitteet sijaitsevat parametrin Venturi\_L3 mitan alueella, mutta niitä ei mallinneta layout-käytössä. Venturiin parametrisoitiin kuvan 23 osoittamia sisämittoja. 3D-mallin tekemistä varten tarvittiin yksi luonnos, joka sisältää pyöräytys-työkalun tarvitseman profiilin (Kuva 24). Suorakaiteen muotoisessa venturissa voidaan käyttää jäykisteitä, mutta niiden parametrisointi oikeille paikoilleen on vaikeaa venturin vaihtelevien muotojen vuoksi. Niinpä ne päätettiin jättää pois ainakin toistaiseksi.

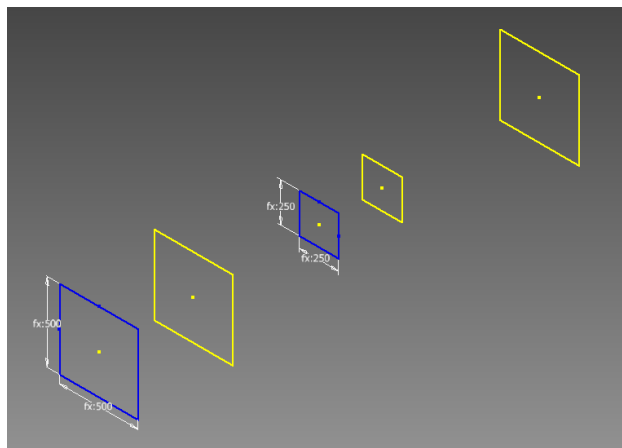


Kuva 23. Pyöreään kanavan venturin parametrisoitavat mitat.



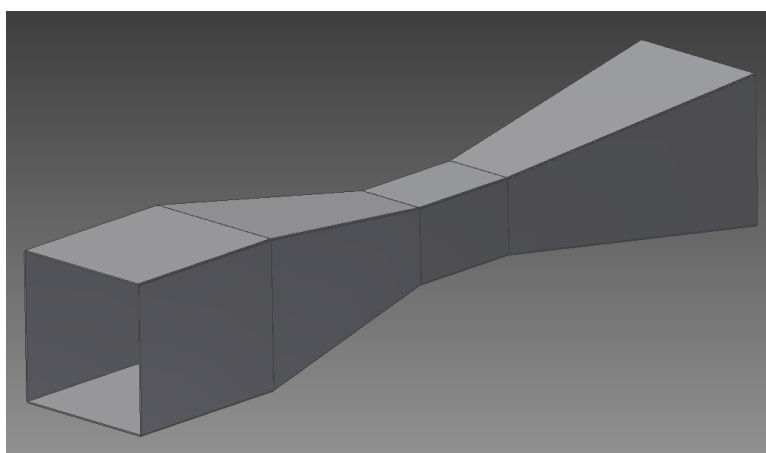
Kuva 24. Pyöreään kanavan venturin sivuprofiilin luonnos ja pyörähdyskappalemalli.

Suorakaiteen muotoinen venturi mallinnettiin 16:sta erillisestä levystä. Valmistusperiaate on sama kuin pyöreän kanavan venturissa, mutta sisähalkaisijaparametrit (Venturi\_d1 ja Venturi\_d2) korvattiin sisäleveys- ja sisäkorkeusparametreilla (Venturi\_w1, Venturi\_h1, Venturi\_w2, Venturi\_h2). Mallin tekemisessä tarvittiin paljon aputasoja ja luonnoksia. Tehtiin viisi eri luonnosta L-mittojen alku- ja loppupäiden kohdille, joihin on profiiliin mitoitettu sisäleveydet ja sisäkorkeudet (Kuva 25). Luonnokset on tehty tasojen päälle, joita on siirretty L-mittojen verran eteen päin.



*Kuva 25. Venturin sisäprofiilit eri kohdissa, keltaiset suorakaiteet projisoituja viivoja.*

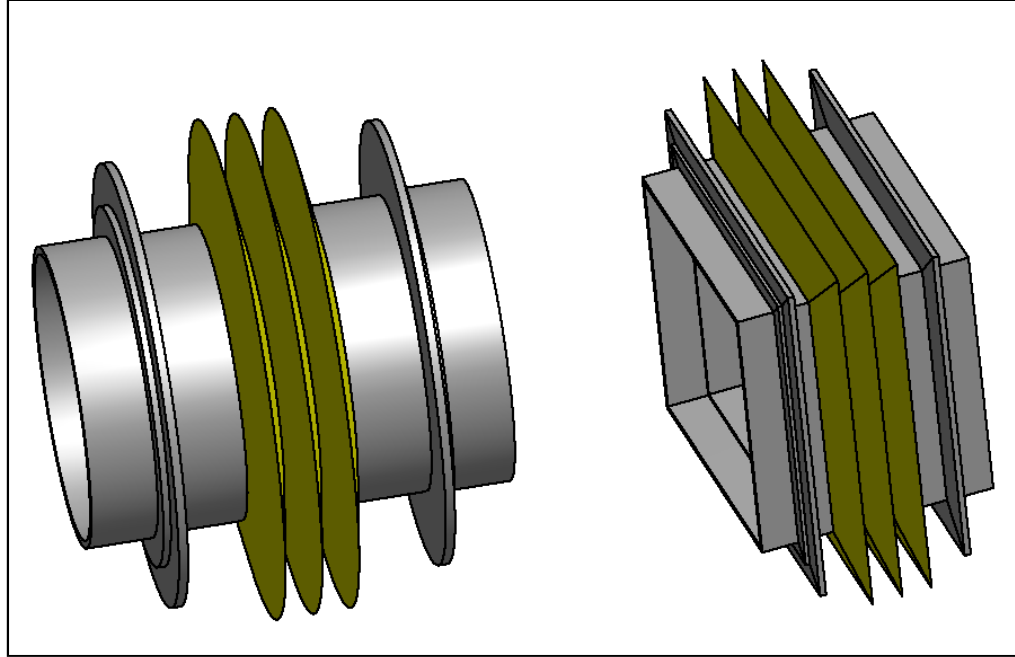
Nyt oli helppoa tehdä venturin levyprofiililuonnoksia. Valittiin tasotyökalu ja klikattiin ensimmäisen ja seuraavan profiilin ylimmäisiä viivoja ja luotiin luonnos tehdyn tason päälle. Sitten tehtiin uusi taso valitsemalla toisen ja kolmannen profiilin ylimmäiset viivat, joiden päälle uusi luonnos jne. Tasot ja luonnokset saatiin näin tehtyä oikeaan kulmaan. Riitti kun levyjen profiilit tehtiin yläpuolelta ja toiselta sivustalta. Pursotuksen jälkeen ne voitiin peilata alapuolelle ja vastakkaiselle sivustalle ja näin suorakaiteen muotoiseen kanavaan tulevan venturin malli on valmis (Kuva 26).



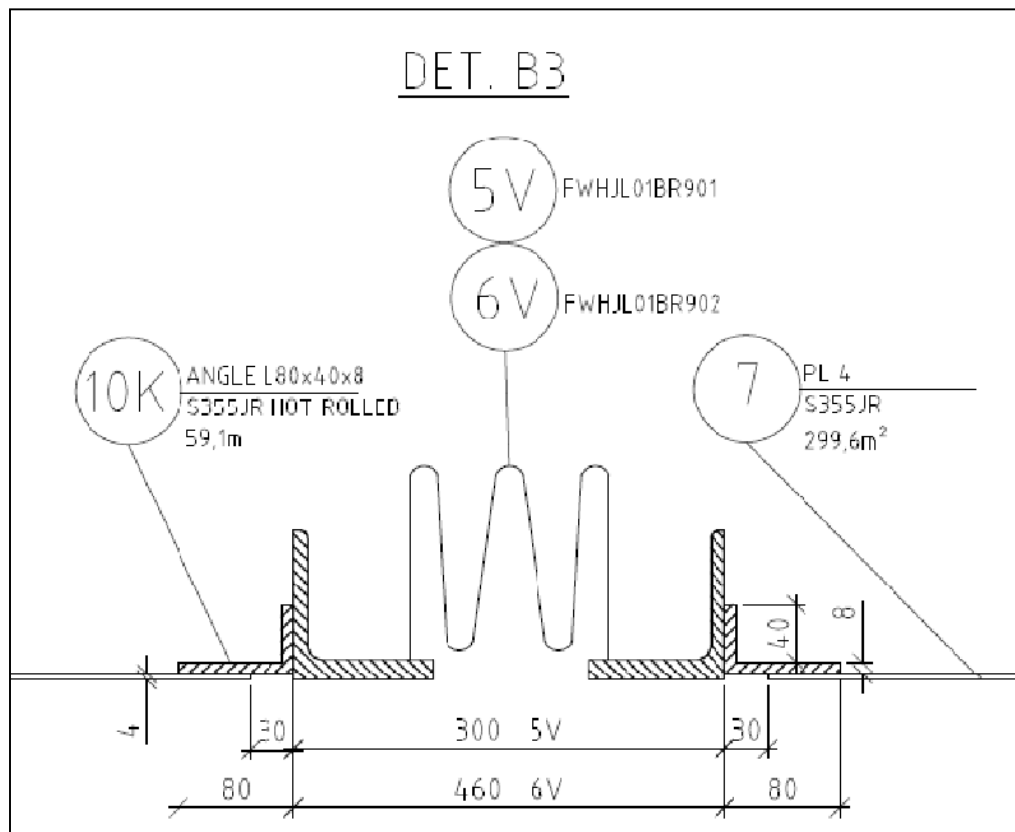
*Kuva 26. Venturi suorakaiteen muotoiseen kanavaan.*

## 8.2.4 Palkeet

Palkeita tehtiin kaksi kappaletta, yksi kumpaankin kanavamuotoon (Kuva 27). Palkeiden tehtävänä on mahdollistaa kanavan lämpölaajenemisesta aiheutuvaa liikkumista kanavan pituussuuntaan.

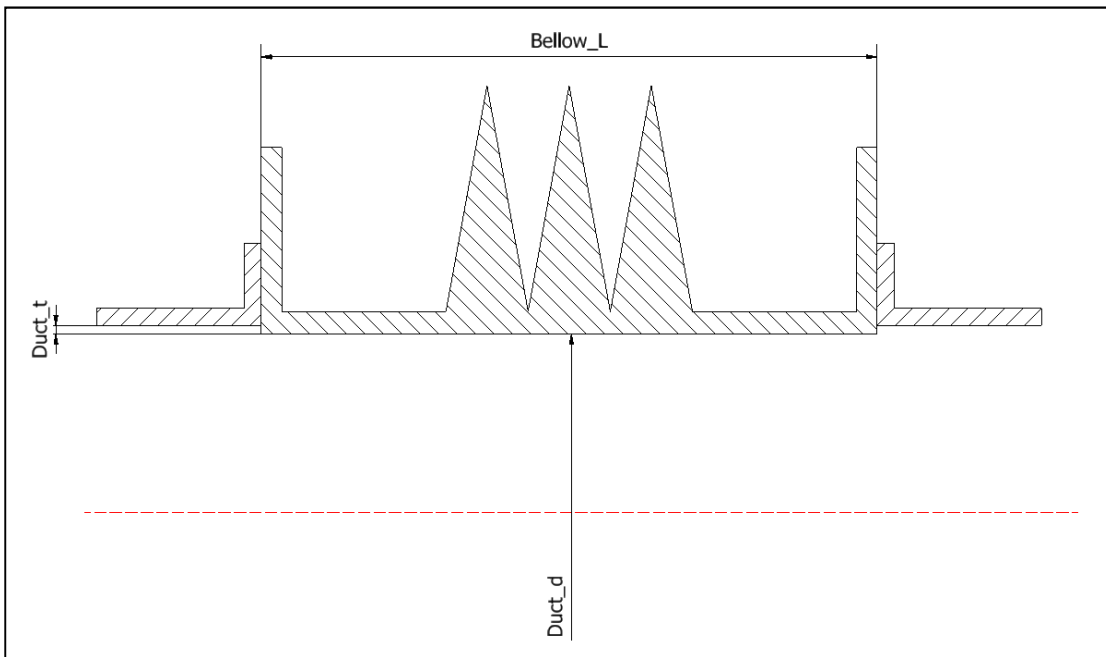


Kuva 27. Palkeiden 3D-mallit.



Kuva 28. CAD-detallii jonka perusteella palkeen mallinnus on tehty.

Palkeen tekemisessä on käytetty pohjana kuvan 28 detaljia. Koska kyseessä on layout-malli, riittää yksinkertaisempi toteutustapa.

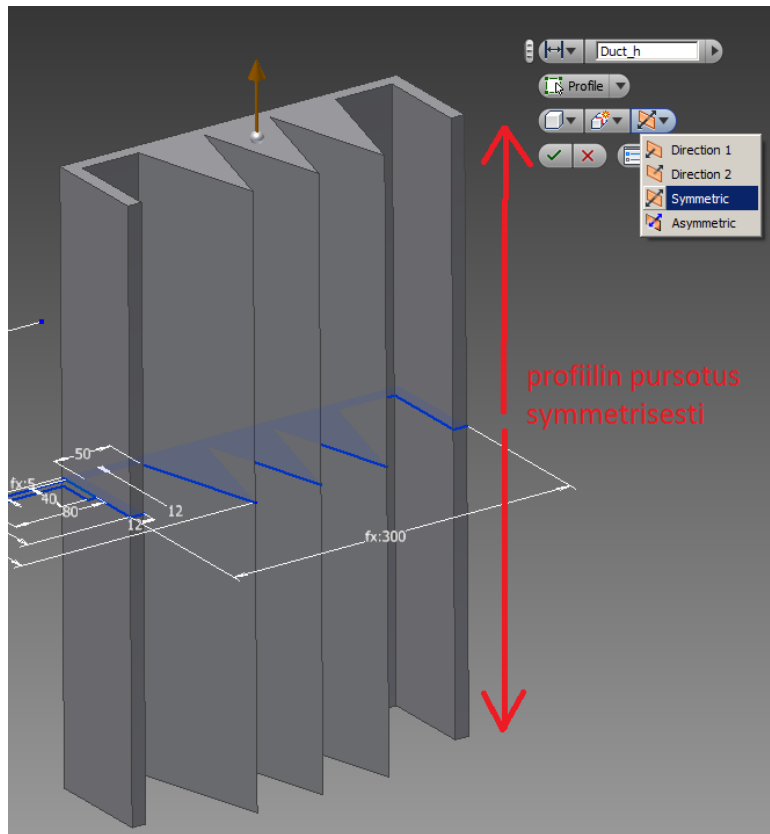


*Kuva 29. Pyöreän kanavan palkeen parametrit.*

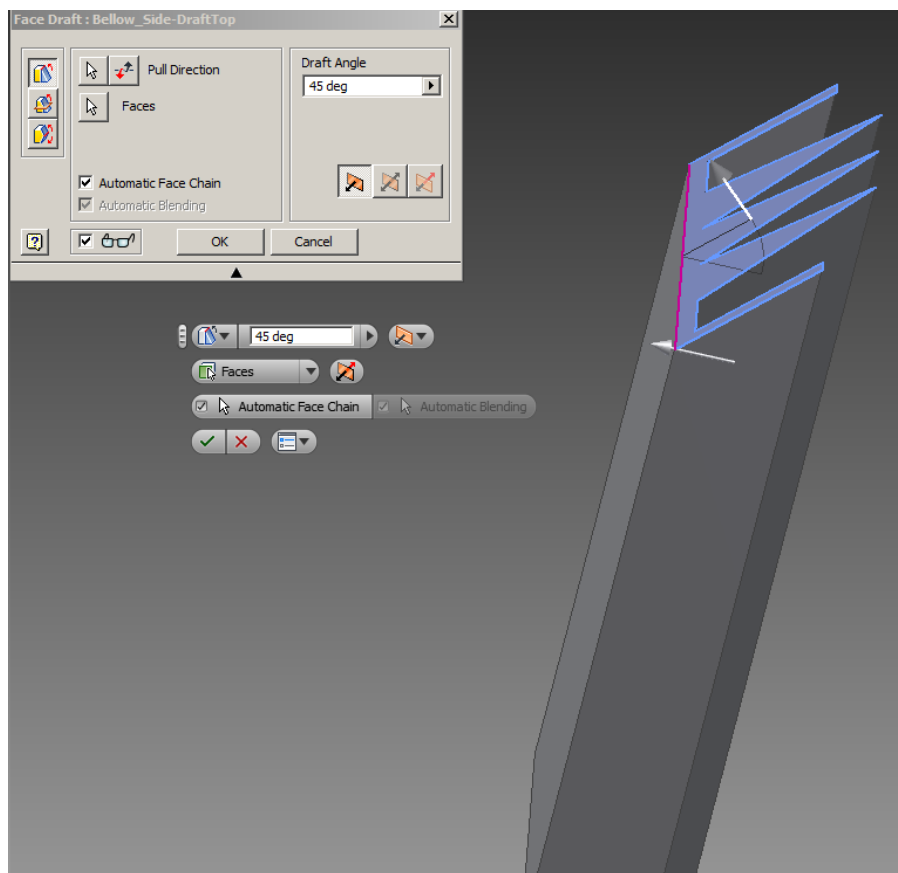
Tekemällä kuvan 29 mukainen profiili palkeelle ja päätyjäykisteille, saatiin 3D-malli helposti tehtyä pyöryttämällä akselin ympäri.

Suorakaiteen muotoiseen kanavaan mallinnettava palje tehtiin samaa profiilia käyttäen mitä pyöreän kanavan palkeessa käytettiin. Sisähalkaisijan parametrille Duct\_d ei ollut käyttöä, joten poistettiin se ja käytettiin mallinnuksessa kanavan leveyden ja kanavan korkeuden parametreja Duct\_w ja Duct\_h. Tämän mallin tekemisessä käytettiin uutta muotopiirrettä, joka oli päästökulma (Face Draft). Paljeosan profiili pursotettiin ensin symmetrisesti molempiin suuntiin (Kuva 30). Päätyihin käytettiin Face Draft-työkalua 45° kulmalla (Kuva 31). Tämän jälkeen lopputulos peilattiin koordinaatistotason toiselle puolelle. Väliin jäävät kappaleet tehtiin Loft-työkalua käyttämällä (Kuva 32), joka suorittaa pursotuksen kahden tai useamman profiilin välillä. Samaa tekniikkaa käyttämällä onnistui kulmajäykisteiden mallinnus paljeosan päätyihin.

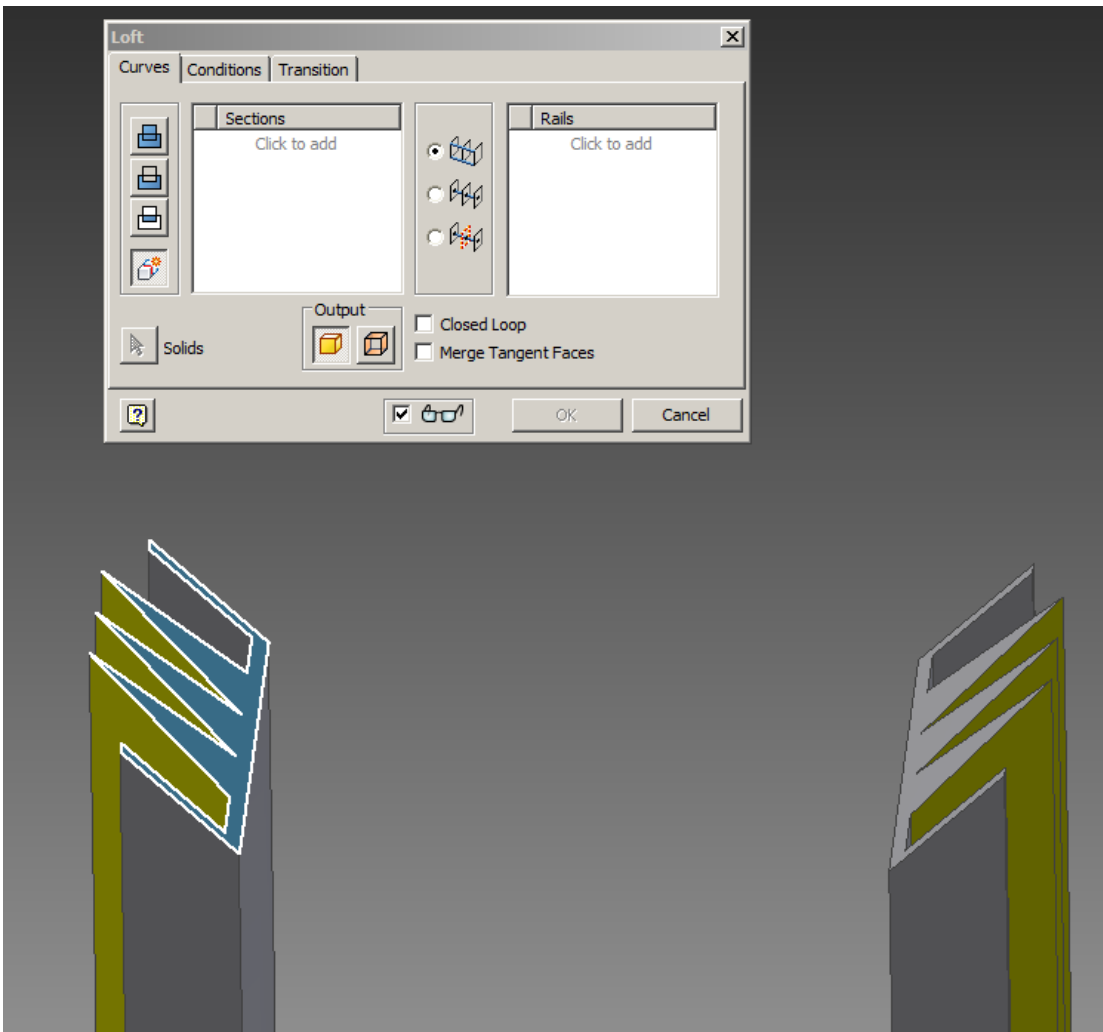




Kuva 30. Paljeprofiilin pursotus symmetrisesti.



Kuva 31. 45°päästökulma molempiin pätyihin.

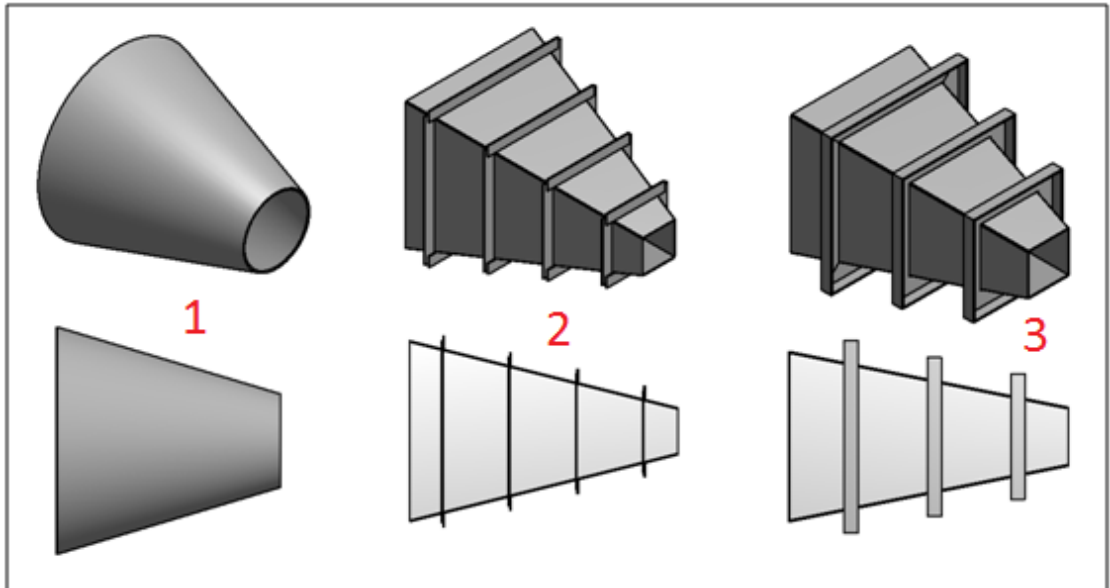


*Kuva 32. Loft-työkalulla valitaan 45 asteen kulmassa olevat profiilit alkuperäisestä ja peilatusta paljeosasta ja saadaan välistä puuttuva palkeen osa mallinnettua.*

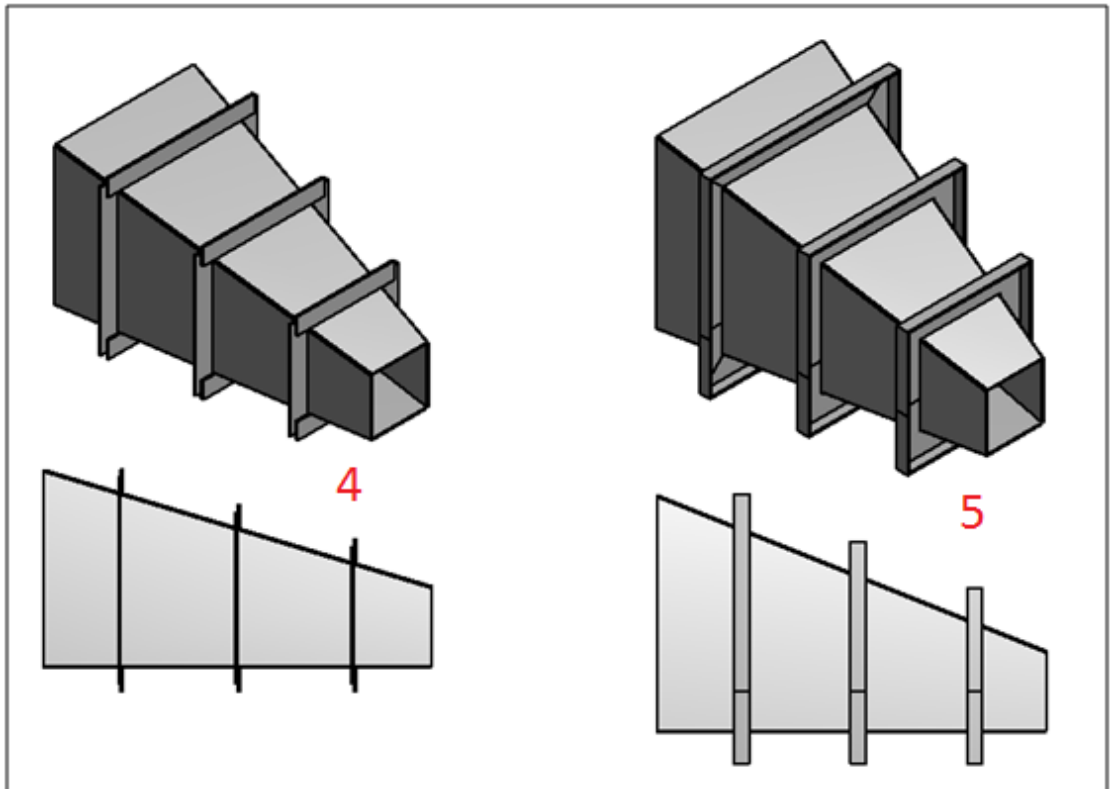
### 8.2.5 Supistuskappaleet

Malleja tehtiin seitsemän kappaletta, yksi pyöreään kanavaan ja kuusi suorakaiteen muotoiseen kanavaan (Kuvat 33, 34, 35). Osa kulmajäykistetyistä supistuksista (mallit 3 ja 5) tulevat kuvien 33 ja 34 mukaisesti samaan suuntaan uumat vastakkain aiemmista malleista poiketen. Suorakaiteen muotoiseen kanavaan tulevat supistuskappaleet soveltuvat myös kattilalaitoksen tuhkasuppiloiden 3D-malleiksi.

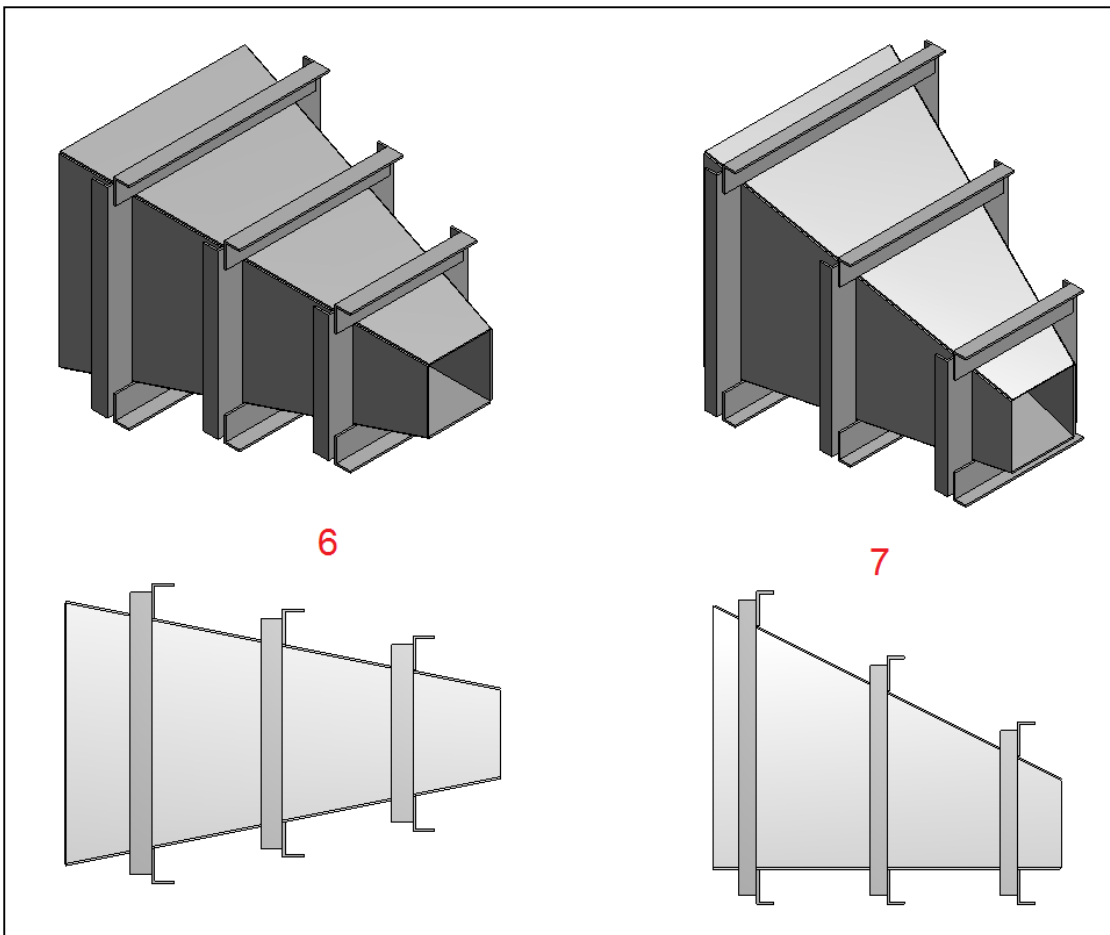
Supistuskappaleet olivat pyöreän kanavan supistuskappaletta lukuun ottamatta opinäytetyön käytännön osuuden mallinnustehtävistä vaikeimpia. Erityisesti jäykisteiden paikalleen sijoittelu parametrien avulla tuotti aluksi ongelmia, kunnes monia erilaisia tekniikoita kokeilemalla löytyi oikea toteutustapa.



Kuva 33. Supistuskappaleet 1-3. Ylärivissä viistosta näkymästä, alarivissä sivulta.



Kuva 34. Supistukset 4-5. Ero kappaleisiin 2-3 verrattuna on vaakasuora pohja.

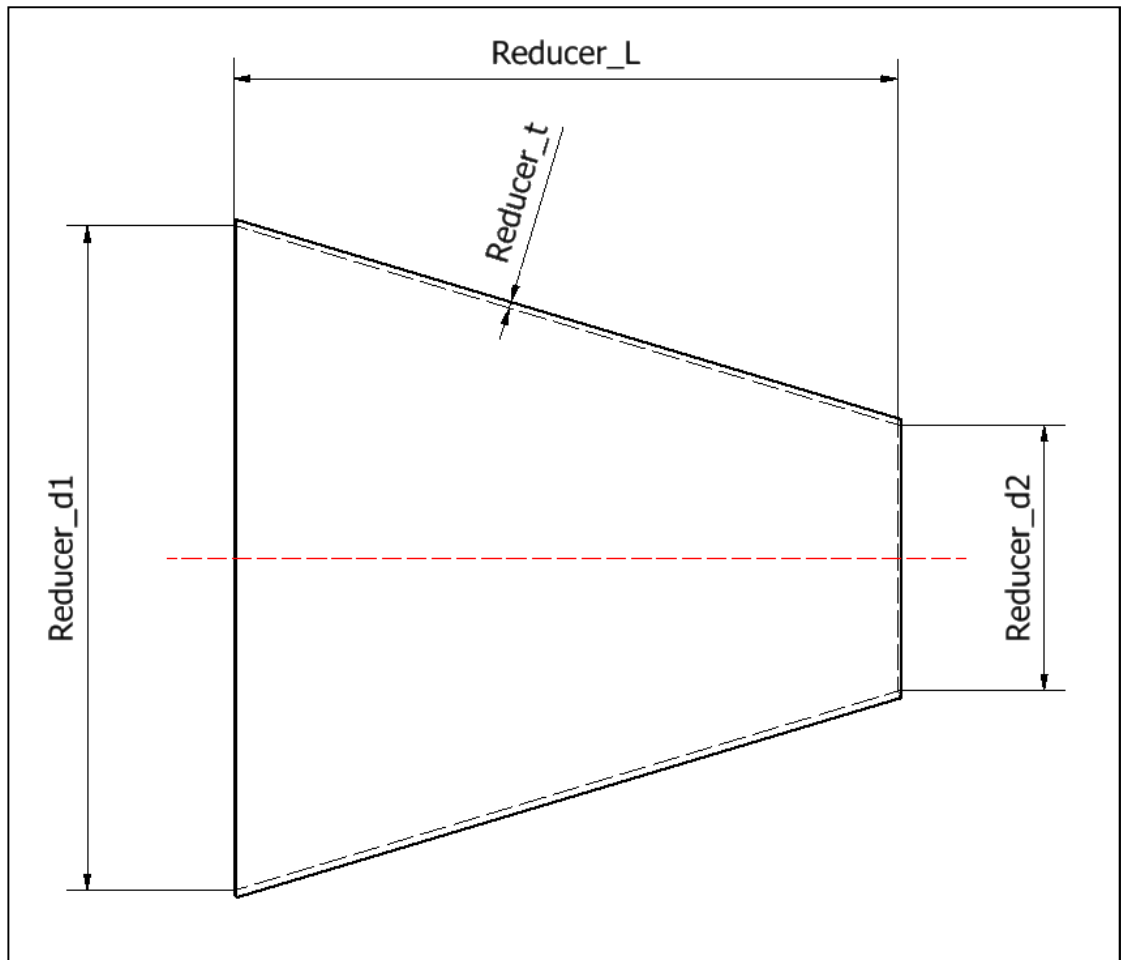


Kuva 35. Supistuskappaleet 6-7.

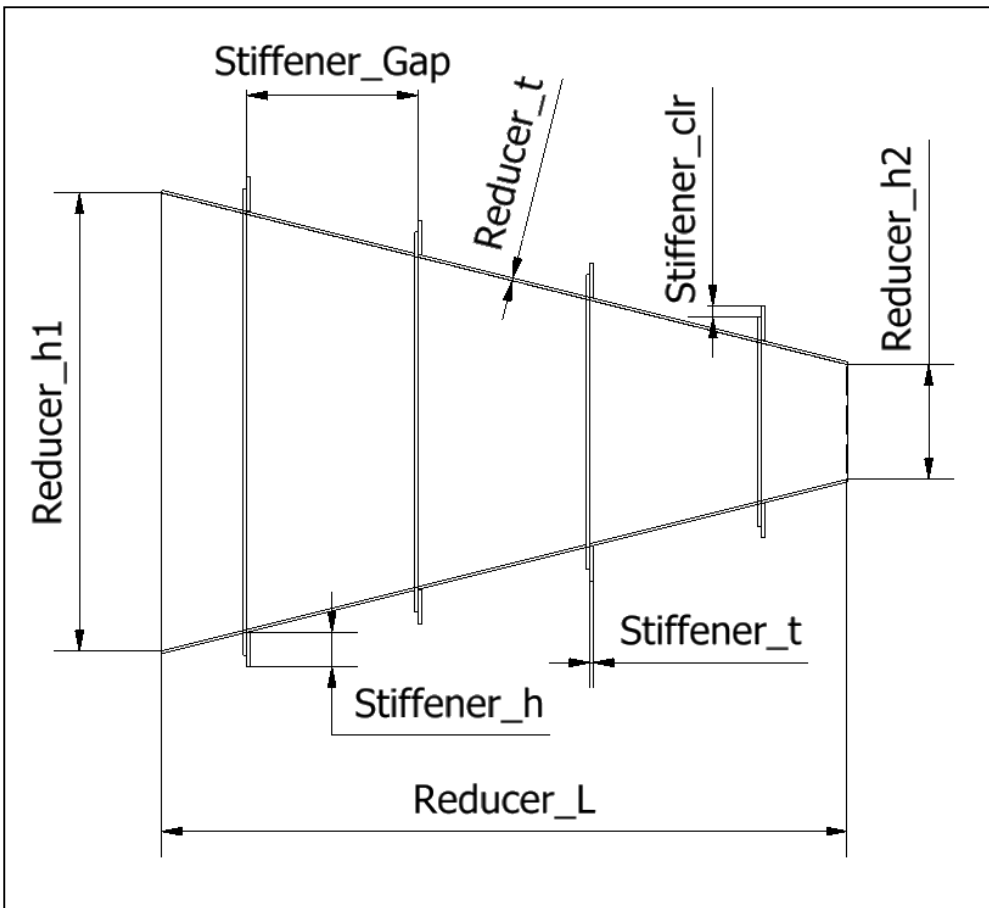
Pyöreän kanavan supistuskappale tarvitsee neljä parametria, jotka määrittelevät sen muodon (Kuva 36). Niitä ovat alkupään sisähalkaisija Reducer\_d1, loppupään sisähalkaisija Reducer\_d2, supistuksen pituus Reducer\_L ja supistuskappaleen levynpaksuus Reducer\_t.

Pyöreän kanavan supistuskappale mallinnettiin samalla periaatteella kuin pyöreän kanavan venturi eli tehtiin profiili, joka pyöräytettiin akselin ympäri.

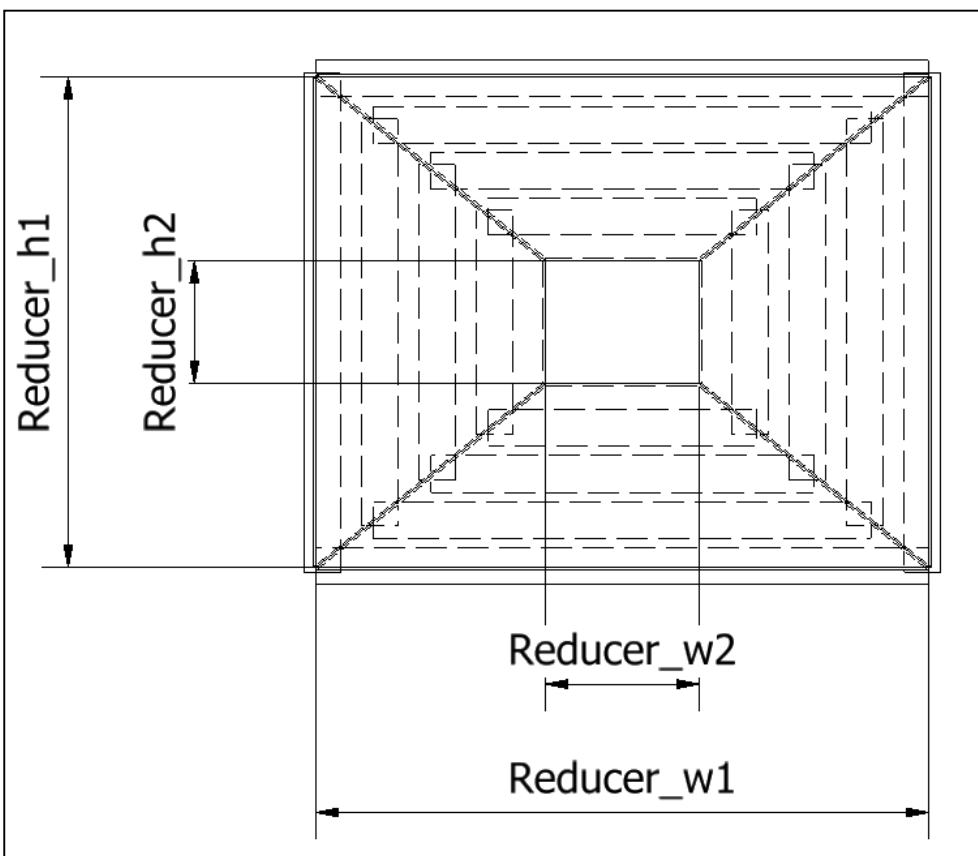
Kuvan 33 mukaisen suorakaiteen muotoiseen kanavaan tulevan supistuskappaleen (supistuskappale numero 2) parametreja ovat alkupään sisäleveys Reducer\_w1, alkupään sisäkorkeus Reducer\_h1, loppupään sisäleveys Reducer\_w2, loppupään sisäkorkeus Reducer\_h2, supistuksen pituus Reducer\_L, supistuksen levynpaksuus Reducer\_t, jäykisteväli Stiffener\_Gap, jäykistepaksuus Stiffener\_t, jäykisteprofiilin korkeus Stiffener\_h ja jäykistevälitys Stiffener\_clr. Kuvat 37 ja 38 selventävät asiaa.



*Kuva 36. Pyöreän kanavan supistuskappaleen parametrit.*

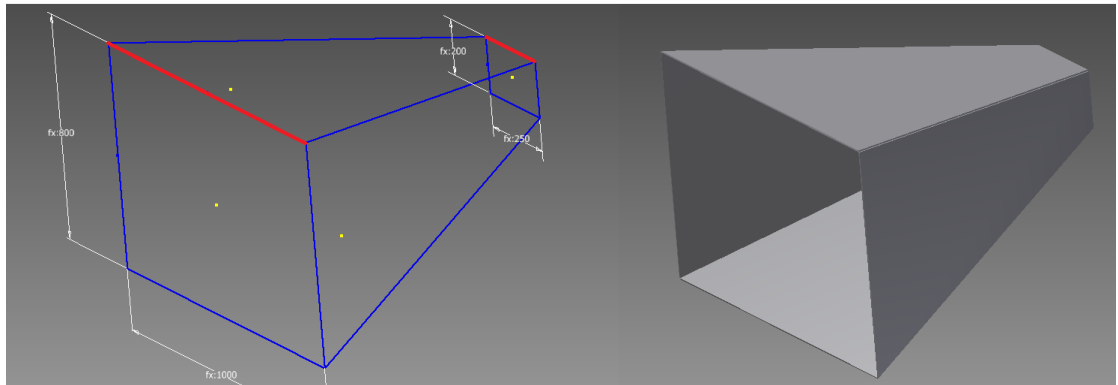


Kuva 37. Supistuskappale 2 sivulta parametreineen.



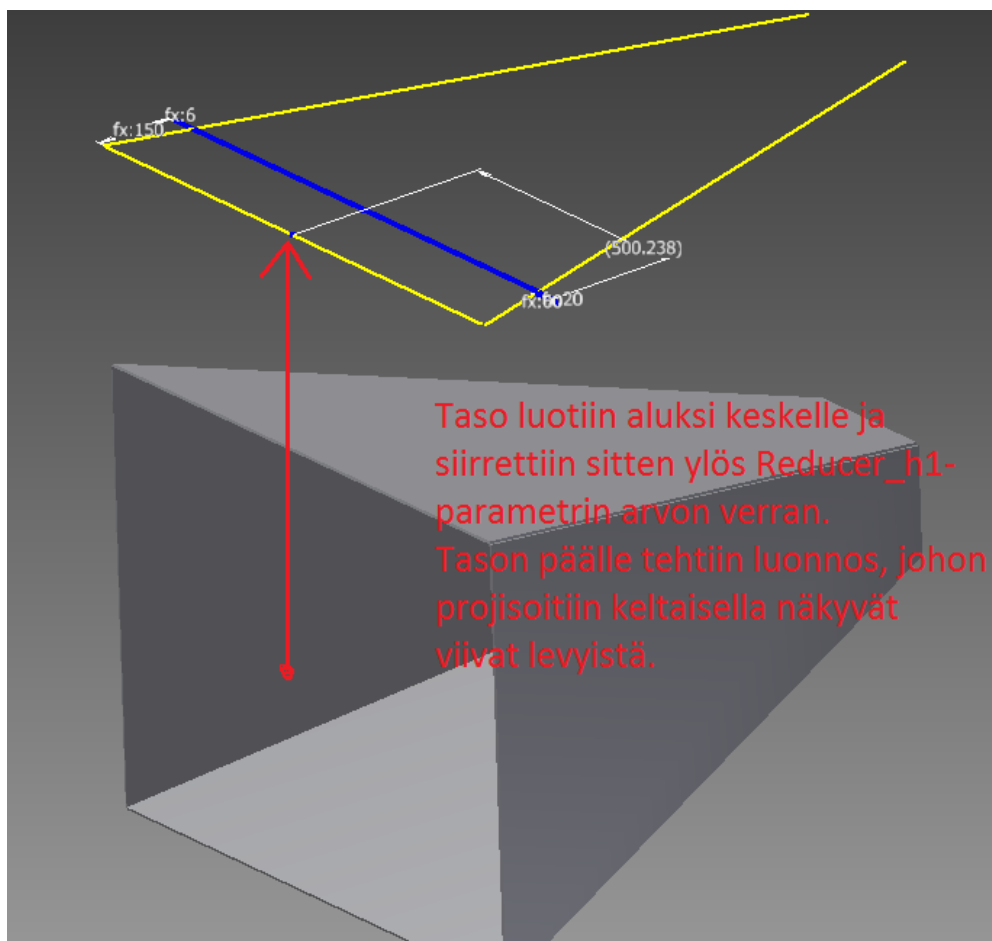
Kuva 38. Supistuskappale 2:n parametreja päädystä katsottuna.

Levyjen profiilien luomisessa voi käyttää samanlaista tekniikkaa kuin suorakaiteen muotoisen venturin mallintamisessa. Luotiin siis aluksi profiilit supistuskappaleen alkupäähän ja loppupään aukoista. Loppupään aukon profiili on tehty tason päälle, jota on siirretty supistuksen pituuden verran eteenpäin. Kuvan 39 tapaan tehtiin taso, joka kulkee punaisella merkittyjen viivojen kautta klikkaamalla niitä vapaavalintaisessa järjestyksessä tasotyökalun ollessa aktiivisena. Tämän tason päälle saatiin tehtyä luonnos päällimmäisestä levystä. Samalla tavalla tehtiin sivulevyn profiili. Profiilit pursotettiin levyiksi ja peilattiin vastakkaisille puolille. Näin on saatu tehtyä levyt, joita pystyy käyttämään supistuskappaleilla 2, 3 ja 6.

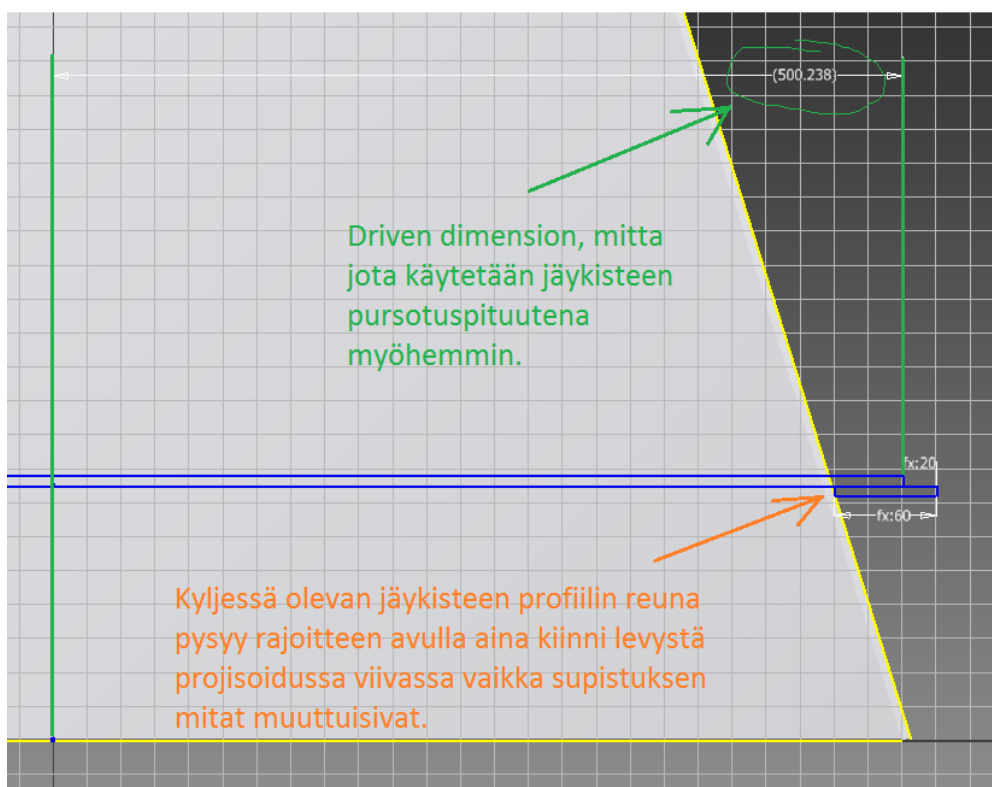


*Kuva 39. Taso saadaan kulmaan klikkaamalla punaisella merkittyjä viivoja.*

Jäykisteiden tekeminen alkoi luonnoksen tekemisestä supistuskappaleen levyjen yläpuolelle (Kuva 40). Tähän luonnokseen projisoitiin kanavalevyjen reunat. Sitten piirrettiin profiiliviivat, jotka kuvaavat ensimmäistä jäykistekehää supistuksen alkupäästä katsoen. Tehtiin parametri jäykisteiden lukumäärästä (Stiffener\_amount) ja jäykistekehän sijainnista alkupään reunaan nähden samalla periaatteella kuin suoran kanavan mallinnusosiossa tehtiin. Luonnokseen saatiin näin mitoitettua jäykiste oikeaan paikkaan supistuksen pituuden suuntaisesti. Oikeaan laitaan käytettiin rajoitetta pitämään sivulle tulevan jäykisteen profiilin reuna aina kiinni levystä projisoidussa viivassa (Kuva 41). Näin jäykiste pysyy aina oikeassa kohdassa sivulevyyn nähden, vaikka supistuksen kylkien kulma muuttuisi. Määritettiin jäykisteen profiili täydellisesti. Tähän mennessä kaikki käytetyt mitat ovat olleet geometriaa ohjaavia eli Driving dimension-tyyppisiä. Seuraavaksi lisättiin uusi mitta origopisteestä vertikaalisen jäykisteen reunaan. Koska viivat olivat jo ennestään täydellisesti määritettyjä, Inventor antoi ilmoituksen luonnoksen ylij rajoittamisesta (Over-constraining) ja ehdotti, että luodaan Driven dimension, joka hyväksyttiin. Driven dimension-mitan erottaa siitä, että sen arvo näkyy luonnoksessa sulkeiden sisällä. Driven dimension on geometrian ohjaava mitta, joka vain ilmoittaa minkä verran kyseisen mitan arvo on, sitä ei pysty itse muuttamaan. Tämän mitan avulla saatiin pursotuspituus myöhemmässä vaiheessa pursotettavalle jäykisteelle.



Kuva 40. Tason luominen levyjen yläpuolelle.

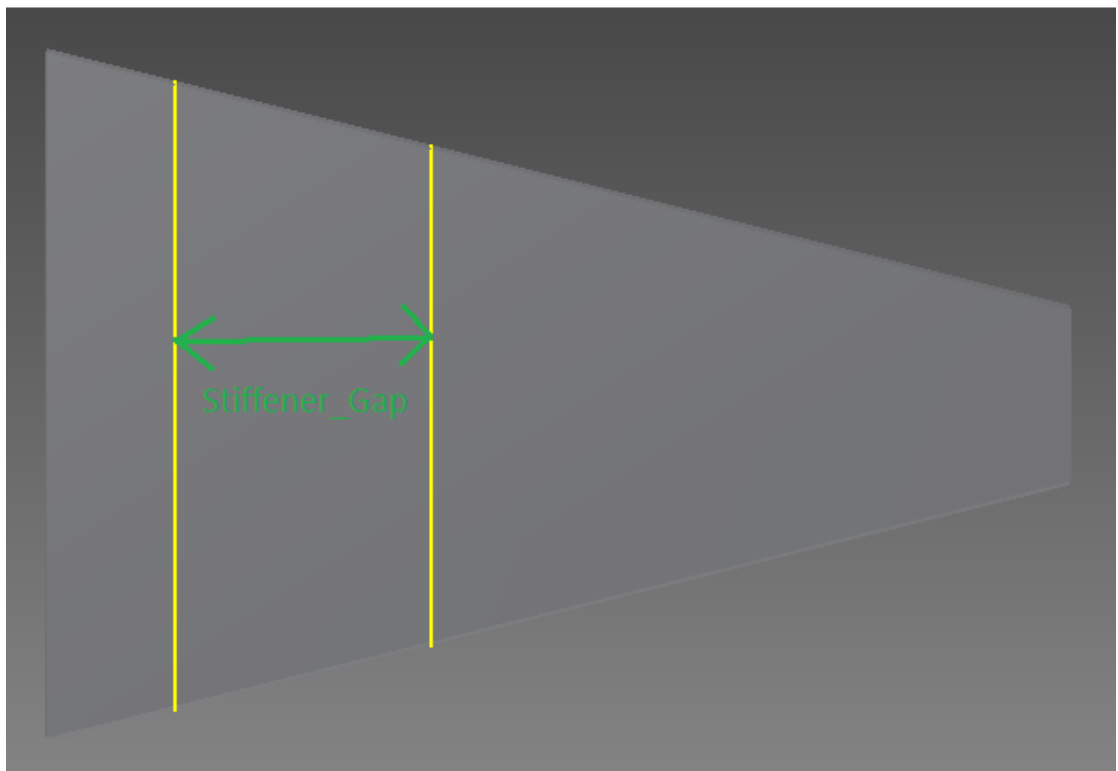


Kuva 41. Jäykisteprofiili ja Driven dimension.



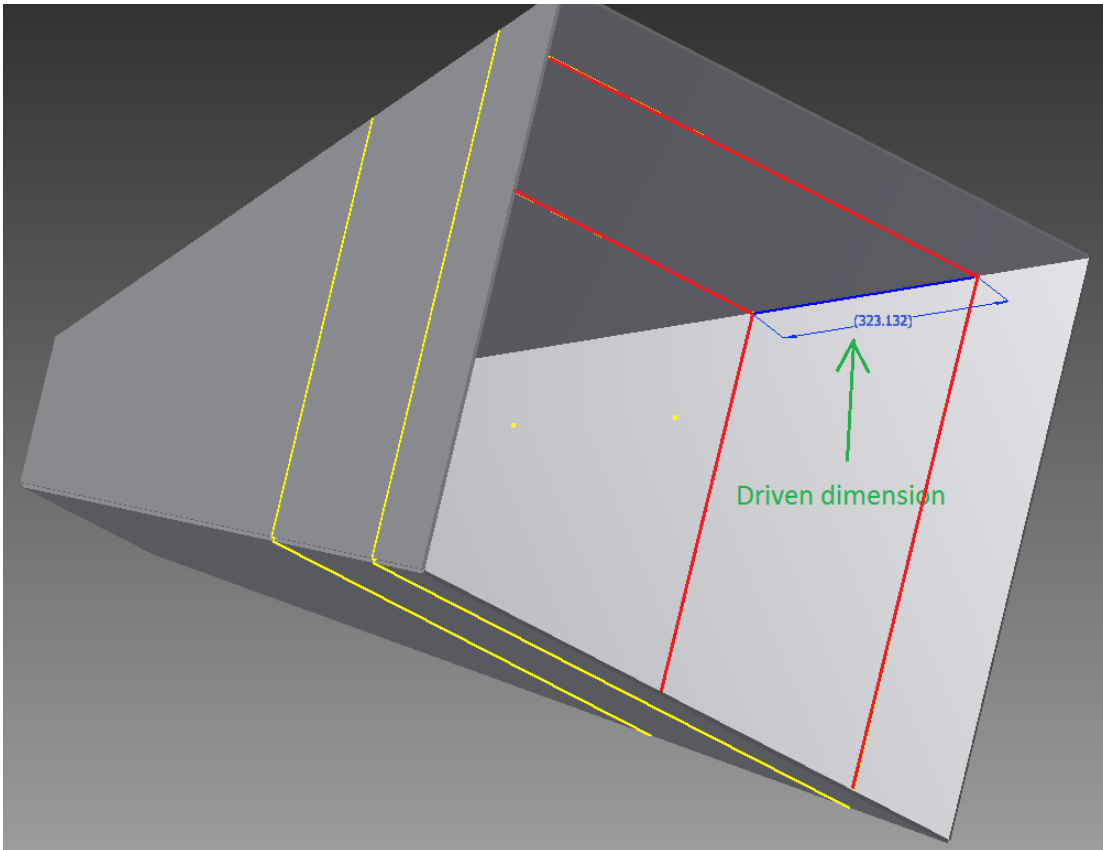
Driven dimension näkyy myös Parameters-työkalun sisällä kohdassa Reference Parameters ja sille voidaan antaa kuvaavampi nimi, kuten extr\_L. Tästä luonnoksesta ei ole tarkoitus luoda 3D-malleja. Sen tarkoitus on ainoastaan selvittää tarvittava pursoituspituus päällimmäiselle jäykisteelle.

Seuraavaksi luotiin kaksi tasoa, joista ensimmäinen tuli kaavan perusteella laskettuun ensimmäisen jäykistekehän kohtaan supistuksen päädyistä katsoen. Toinen taso tuli jäykistevälin mitan verran edemmäs ensimmäisestä tasosta. Tasojen päälle tehtiin luonnokset ja niihin projisoitiin luonnostason supistuslevy leikkaavat viivat (kuva 42).



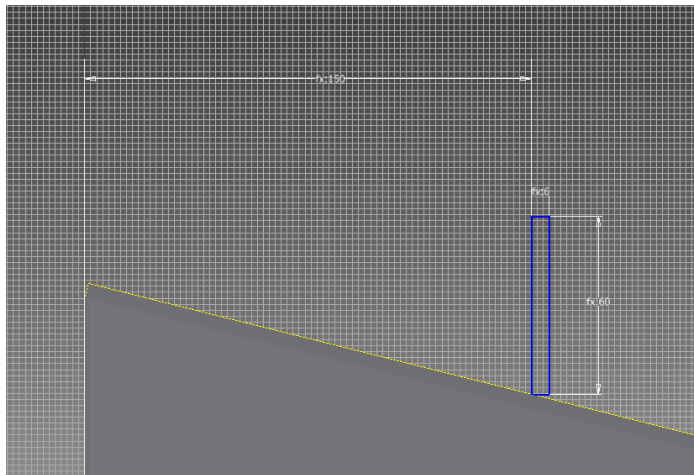
*Kuva 42. Luonnostasojen levyjä leikkaavat viivat projisoituna.*

Pyöräytettiin kuvakulma näyttämään supistuksen sisälle. Luotiin tällä kertaa 3D-luonnos, johon otettiin mukaan (Include Geometry) kuvassa 43 punaisella merkityt viivat. Näiden viivojen risteyskohtien väliin tehtiin uusi viiva, josta mitoittamalla saatiin uusi Driven dimension ja sille annettiin nimi pattern\_L. Tätä mittaa käytettiin myöhemmin jäykisteitä kopioitaessa.

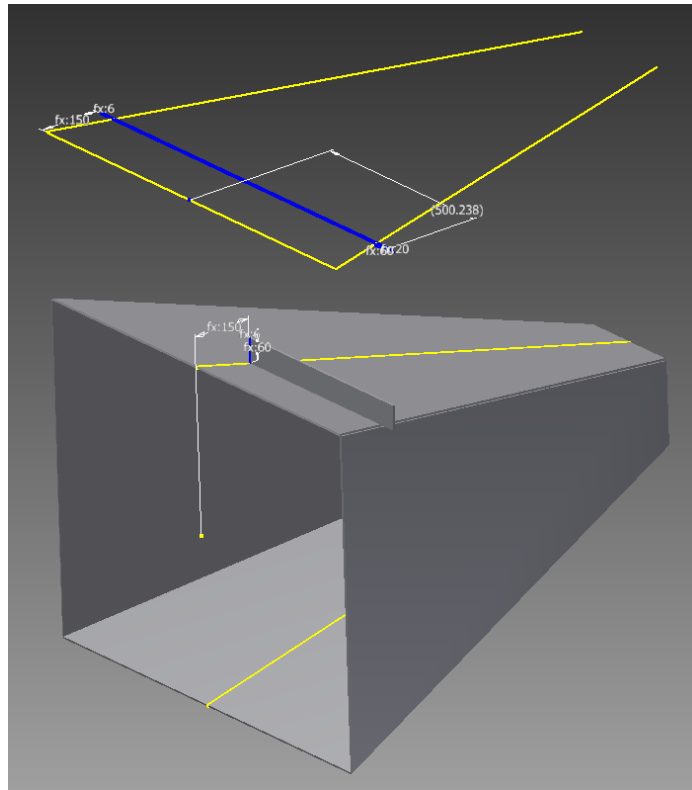


Kuva 43. Driven dimension, jota käytettiin myöhemmin jäykisteiden kopiointissa.

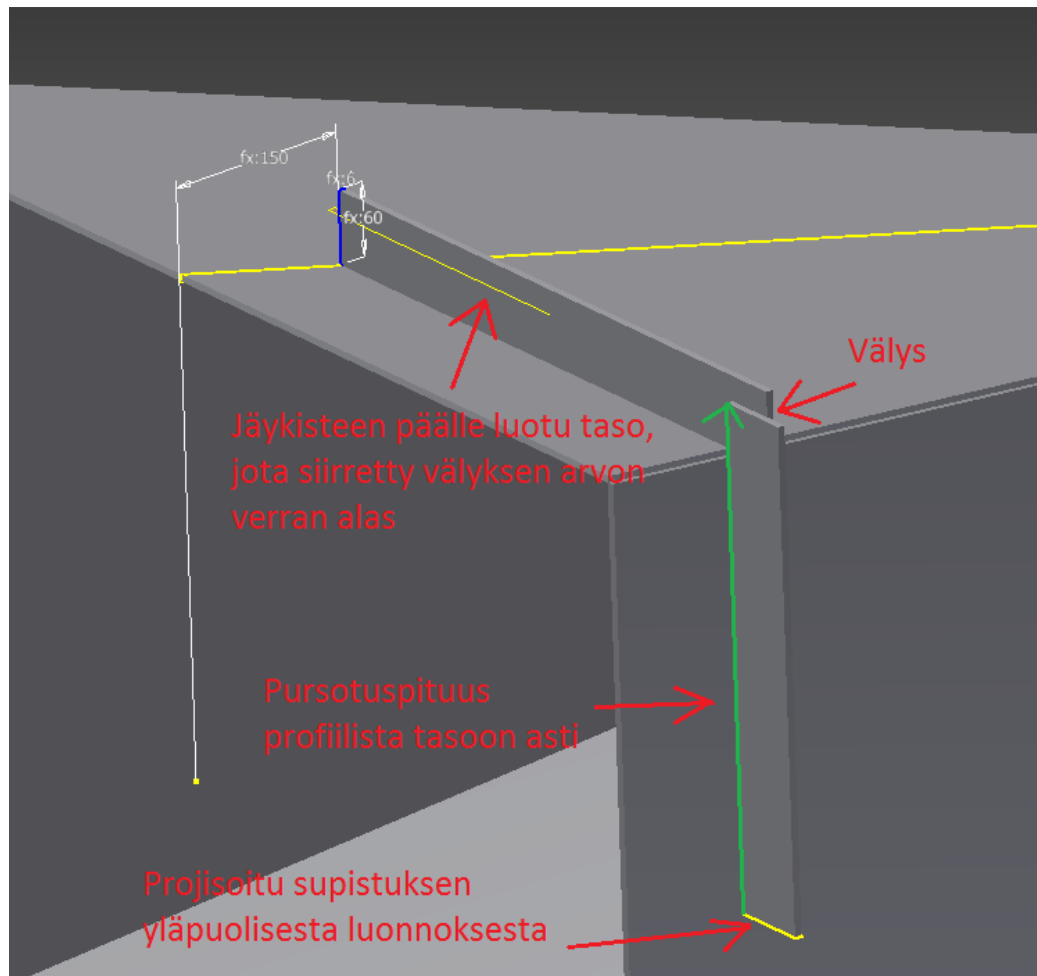
Ensimmäinen jäykisteosa luotiin, kun tehtiin pituussuuntaisesti supistuksen päällimmäisen ja pohjimmaisena levyn lävistävä taso niiden keskelle ja luotiin jäykisteen profiili (Kuva 44). Pursotettiin profiili uutena osana (New Solid) käyttäen extr\_L-parametria (Kuva 45).



Kuva 44. Supistuskappale 2:n jäykisteprofiilin luonnos.



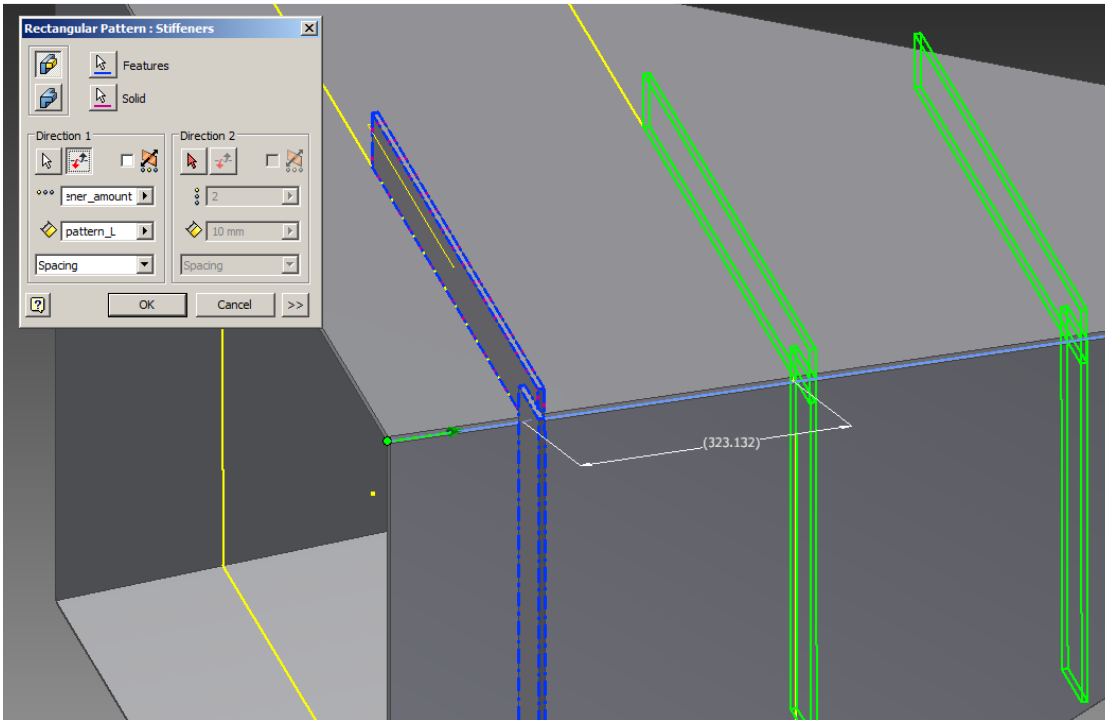
Kuva 45. Jäykisteprofiili pursotettuna.



Kuva 46. Kyljessä olevan jäykistepuolikkaan mallinnus.

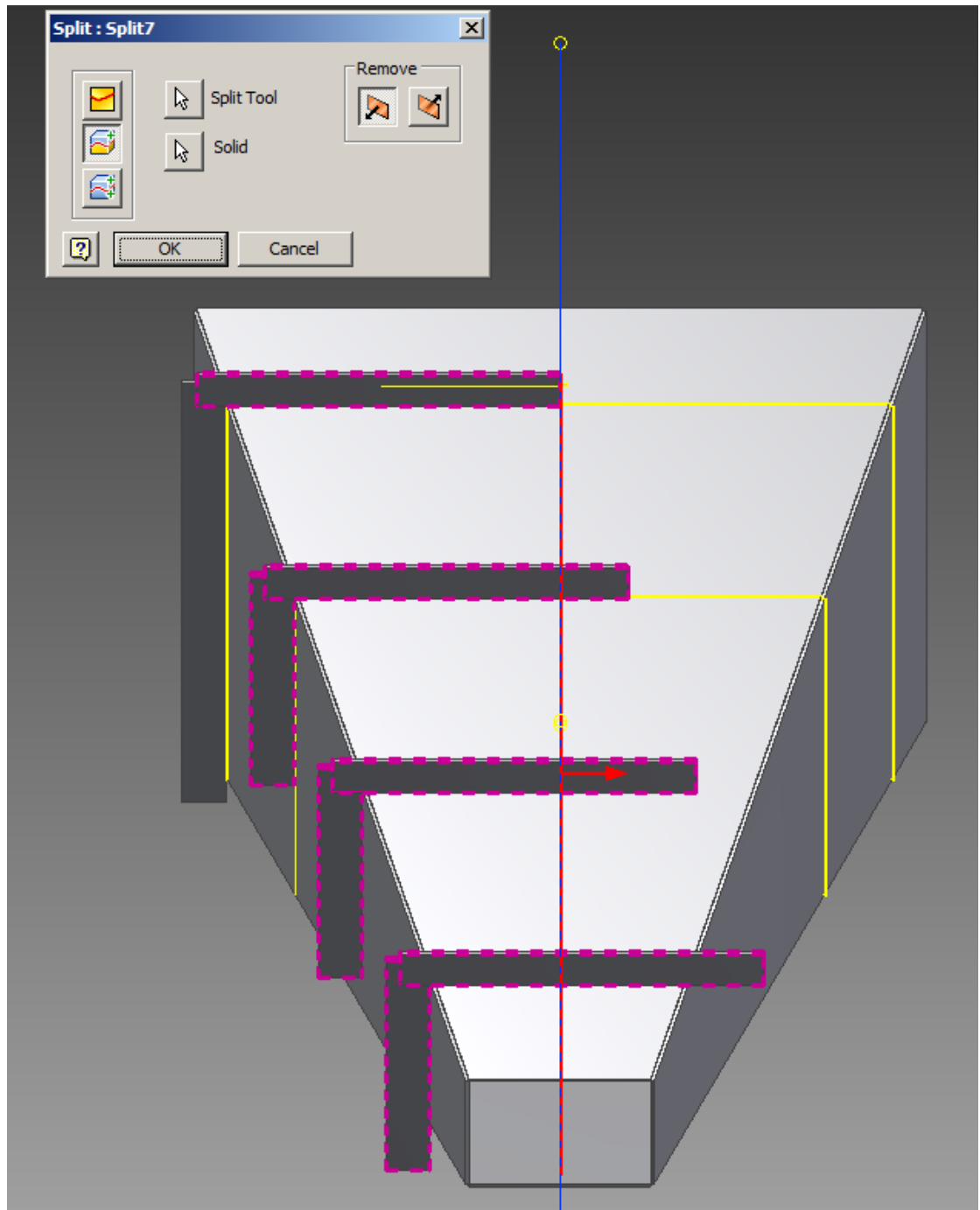
Supistuksen kyljessä oleva jäykisteosa tehtiin kuten kuvassa 46. Keskelle supistusta tehtiin taso niin, että se lävisti kylkilevyt keskeltä pituussuuntaisesti. Tason päälle tehtiin luonnos, johon projisoitiin kylkeen tulevan jäykisteen profiili levyjen yläpuolella olevasta luonnoksesta. Profiili pursotettiin tasoon asti, jota on siirretty välyksen mitan verran päällimmäisen jäykisteen ylätasosta alaspäin. Peilattiin pursotus niin että se jatkui alas asti.

Valittiin päällimmäinen jäykiste ja kylkijäykisteen yläosa ja tehtiin Rectangular Pattern (Kuva 47). Lukumääräksi valittiin Stiffener\_amount ja kopiointiväliksi pattern\_L.

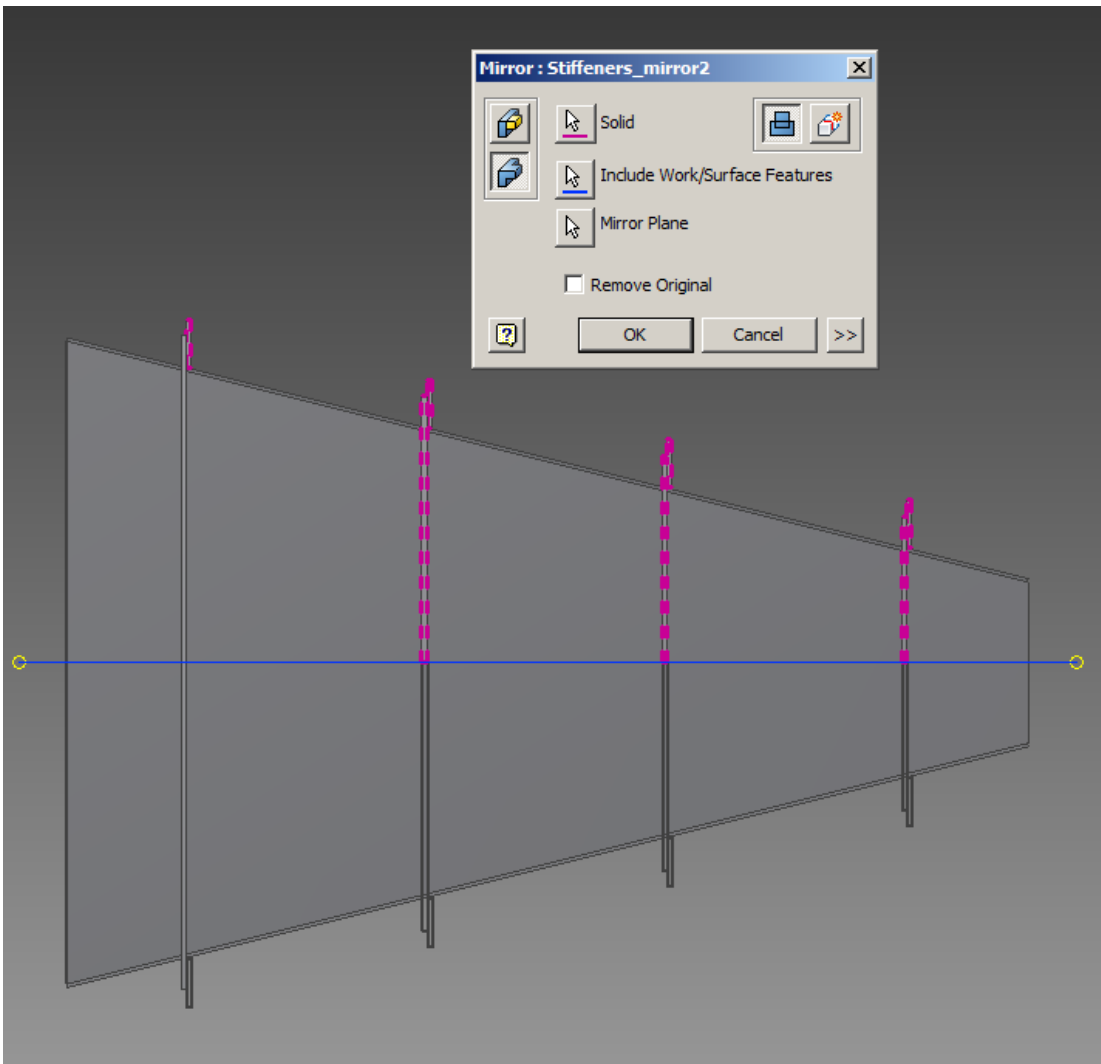


Kuva 47. Jäykisteiden kopiointi.

Nyt kopioidut jäykisteet sijoituivat täydellisesti päällimmäiseen ja kyljessä olevaan levyyn kiinni, mutta ne olivat liian pitkiä. Käyttämällä Split-työkalua niistä leikattiin koordinaattitasojen avulla ylimääräinen pituus pois. Split-työkalussa käytettiin Trim Solid-toimintoa (Kuva 48). Tämän toimenpiteen jälkeen peilattiin (Solid-muodossa) ne vastakkaisille puolille samoin kuin ne osat ensimmäisestä jäykistekehästä, joita ei vielä peilattu vastakkaiselle puolelle. Kaikki jäykisteet on näin saatu paikalleen ja jäykisteväliparametria muuttamalla ne sijoittuvat oikein. Vaakasuoralla tavalla mitoitettu jäykisteväli siis toimii, vaikka kopiointisuunta on vino.



*Kuva 48. Kopioinnin jälkeen jäykisteet ovat sitä pitempiä mitä lähemmäs supistuksen loppupäätä mennään. Split-työkalun ja koordinaattitason avulla katkaistaan ylimääräinen pois. Punainen nuoli osoittaa poistettavan puolen.*



*Kuva 49. Peilaus koordinaattitason avulla.*

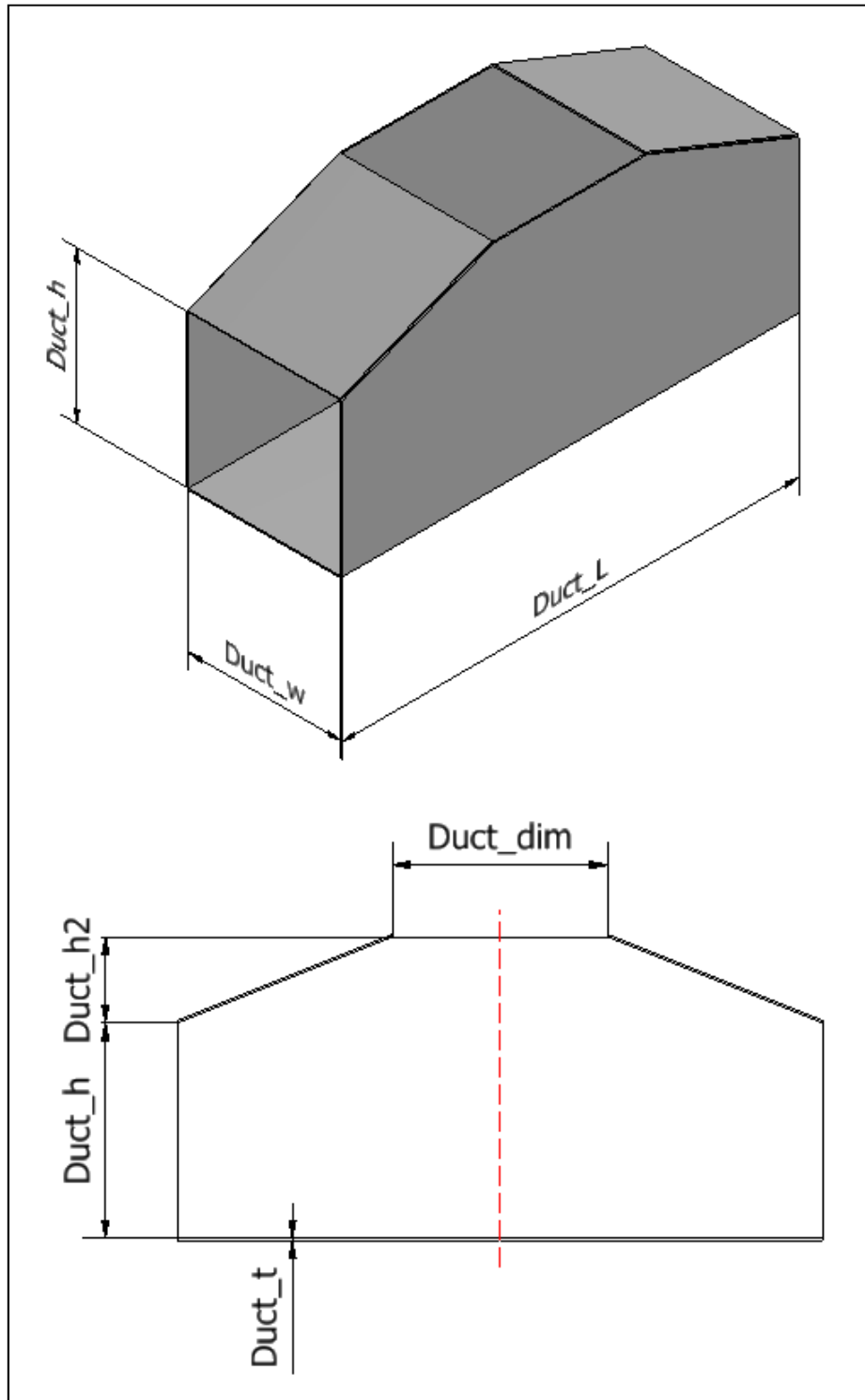
Supistuskappale 2 oli nyt valmis.

Supistuskappale 3 tehtiin edellisen kappaleen pohjalta. Siihen piti tehdä jälleen parametri kulmajäykisteen leveydelle ja, koska jäykisteet oli laitettu uumat limittäin, tässä käytettiin taas palkeen mallintamisesta tuttua Face Draft-työkalua.

Koska supistuskappaleilla 4 ja 5 on vaakasuora pohjalevy, supistuskappale ei ole symmetrinen sivulta katsottuna eikä peilausta voitu käyttää alapuolen jäykisteiden tekemiseksi. Alapuolella olevien jäykisteiden mallinnusta varten oli tehtävä uusi Driven dimension, jotta Rectangle Pattern-työkalun kopiointiväli saatiin selville. Supistukset 6 ja 7 olivat aiemmin kuvattujen tekniikoiden avulla toteutettavissa. Ne eroavat supistuskappaleista 3 ja 5 vain jäykistystavaltaan.

## 8.2.6 Haaroituskappale

Malleja tehtiin yksi kappale. Jäykisteiden mallintaminen jätettiin tekemättä, koska niiden sijoitteluun on niin monia eri tapoja ja tietyillä mitoilla se ei vain toimi. Kappaleen mallinnuksessa ei tarvittu erikoisempia tekniikoita mitä aiemmissa kappaleissa ei olisi jo käsitelty. Kuvassa 50 on esitetty haaroituskappaleen määrittävät parametrit.



Kuva 50. Haaroituskappaleen parametrit.

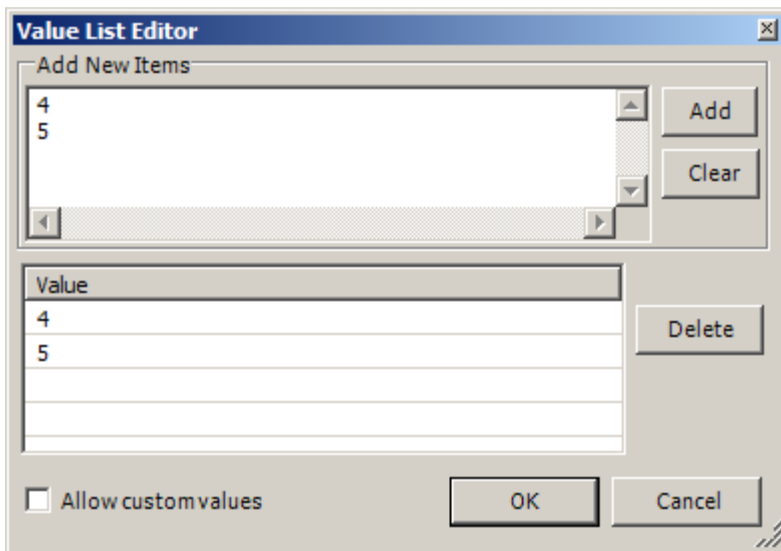
### 8.3 Mallien jatkokehittäminen

3D-mallit olivat nyt melko hyvässä vaiheessa, mutta jotain jatkokehittämistä niissä vielä oli. On hyvä kehittää rajoitteita ja sääntöjä, jotka estävät mahdollisia käyttäjän tekemiä virheitä ja sen seurauksena mallien odottamatonta käyttäytymistä tai virheilmoituksia.

#### 8.3.1 Säännöt ja rajoitteet

Kun käyttäjä laittaa esim. pursotuksen pituudeksi nolla, Inventor antaa virheilmoituksen. Mikäli annetaan jollekin parametrille negatiivinen arvo, 3D-malli saattaa käyttäytyä eri tavalla kuin on tarkoitettu. On myös olemassa valmistusteknisiä ja kanavistojen virtausteknisiä rajoitteita, jotka olisi hyvä ottaa huomioon ja rajoittaa käyttäjän syöttämien parametrien arvoaluetta.

Esimerkiksi kanavalevyn paksuus on tavallisesti aina joko neljä tai viisi millimetriä. Kun Duct\_t-parametri (tyypiltään Numeric) on luotu, parametrin nimeä oikealla hiiren napilla klikkaamalla se voitiin muuttaa Multi-Value-tyyppiseksi. Silloin päästiin ikkunaan, jossa parametrin valittavat arvot voitiin rajoittaa listaamalla (Kuva 51). Numerot 4 ja 5 laitettiin allekkain ja Add-nappulaa painamalla niistä tuli parametrin ainoita sallittuja valintavaihtoehtoja. Vaihtoehtoja on helppo lisätä jälkikäteenkin.



Kuva 51. Multi-Value-parametrin arvojen listaus.

Samalla tavalla rajoitettiin jäykisteiden paksuus-parametrin arvot yleisimpiin käytettyihin joita ovat 6 mm, 8 mm, 10 mm ja 12 mm.



Kanavan mutkaosat aiheuttavat aina painehäviötä, kun virtaussuunta muuttuu äkillisesti. Rantotek Oy:llä käytössä olevien ohjeiden perusteella on suositeltavaa, että pyöreän kanavan mutkan sisäsäde  $R_s$  jaettuna sisähalkaisijalla  $\emptyset$  tulisi olla suurempi tai yhtä suuri kuin 0,75. Toisin sanoen  $R_s / \emptyset \geq 0,75$ . Suorakaiteen muotoisen kanavan kohdalla on seuraavanlainen sääntö:  $R_s / R_u \geq 0,5$  missä  $R_u$  on ulkosäteen suuruus. Koska mutkaosia ei mallinneta sisäsäteiden eikä ulkosäteiden mukaan vaan mutkan keskiviivan säteen perusteella, täytyi miettiä, kuinka voitaisiin luoda rajoittava sääntö niiden muuttujien avulla, mitä mutkien luomisessa on käytetty. Managevälilehdellä on iLogic-osio, jossa sääntöjä pystyy luomaan ja muokkaamaan. Add Rule-nappia painamalla Inventor kysyy ensin säännön nimeä ja sitten sitä pääsee kirjoittamaan. Lisätietoa sääntöjen kirjoittamisesta löytyi Inventor help-sivustolta, johon pääsi helposti painamalla näppäimistöä "F1".

Pyöreän kanavan mutkalle kehitettiin seuraavanlainen sääntö, jolle annettiin nimi RadiusLimit:

```
If Elbow_r < Elbow_d/2 + 0.75 * Elbow_d Then
Elbow_r = Elbow_d/2 + 0.75 * Elbow_d
End If
```

Tämän säännön avulla pyöreän kanavan mutkan sisäsäteen arvo pysyy aina suositusten suuruisena. Elbow\_r on mutkan keskiviivan säteen parametri ja Elbow\_d mutkan sisähalkaisijan parametri.

Suorakaiteen muotoisen kanavan mutkalle suosituksia vastaava sääntö on seuraava:

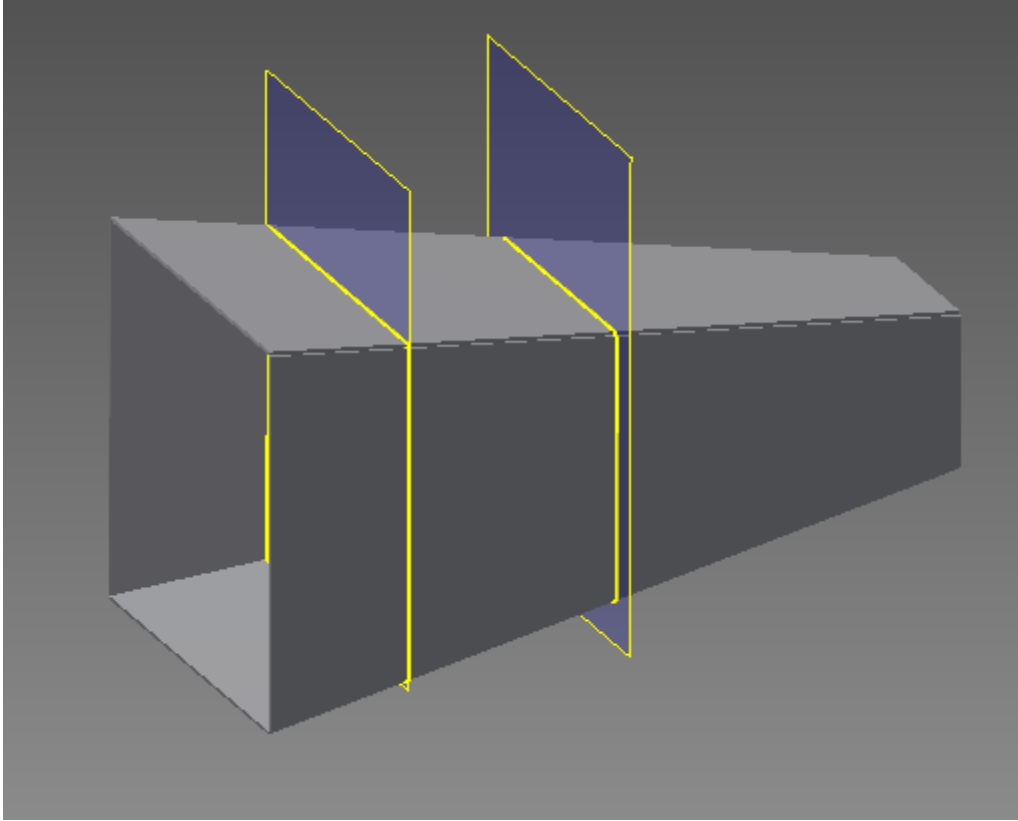
```
If (Duct_r - Duct_w/2) / (Duct_r + Duct_w/2) < 0.5 Then
Duct_r = 1.5 * Duct_w
End If
```

Duct\_r on mutkan keskiviivan säteen parametri ja Duct\_w mutkan sisäleveyden parametri.

Näiden sääntöjen lisäksi tehtiin yleinen Limits-sääntö, johon rajoitettiin joidenkin parametrien osalta niiden arvoksi vähintään 1. Tehtiin myös sääntö, jonka mukaan käyttäjän syöttämät negatiiviset arvot kerrotaan -1:llä, mikä käytännössä rajoittaa sen itseisarvoksi. Toisena sääntönä, kun arvo on nolla, se muutetaan 1:ksi.

Supistuskappaleet antavat virheilmoituksen, kun niiden pituus on tietyn mittainen verrattuna jäykisteväliin. Jäykisteiden kopiointihan tapahtui tekniikalla, missä kahteen luonnokseen projisoitiin luonnostasojen ja levyjen väliset leikkausviivat (Kuva 52).

Tämä oli yksi vaiheista Rectangle Pattern-työkalun kopiointiväliä varten tarvittavan Driven dimension-mitan hankkimisessa. Tietyillä supistuksen pituuden ja jäykistevälin arvoilla jäykistekehiä on vain yksi kappale ja oikeanpuoleinen luonnos siirtyy supistuskappaleesta ohi sen oikealle puolelle ja Inventor antaa virheilmoituksen, että viivojen projisointia ei voida tehdä.



*Kuva 52. Projisoidut viivat supistuskappaleella.*

Ongelma korjaantui tekemällä sääntö, joka rajoittaa ensimmäisen ja toisen luonnoston välisen mitan nolnaan silloin kun jäykistekehiä on tasan yksi ja antaa sille jäykisteväliparametrin arvon silloin kun jäykistekehiä on enemmän kuin yksi.

Edellämainittujen sääntöjen lisäksi on tehty vielä joitain lisärajoitteita, jotta mallit toimivat halutulla tavalla.

### 8.3.2 iPart

Tehtyjen mallien hyödyntämisen helpottamiseksi kokoonpanotilassa (Assembly), kukin malli on mahdollista muuttaa iPart:iksi. Tämä tapahtuu Manage-välilehdellä, jossa Author-osiossa on Create iPart-nappi. Sitä painamalla yksittäinen malli muuttuu taulukko-ohjatuksi, jossa taulukon jokainen uusi rivi määrittää uudenlaisen version alkuperäisestä mallista erilaisine parametrien arvoineen, jotka voi siis itse määrittää. Rivejä voi lisätä tässä vaiheessa useamman ja kun malli tuodaan kokoonpanoon, pystytään sen versio valitsemaan (Kuva 53). On myös mahdollista jättää rivit vain yhteen 3D-mallissa ja luoda uusia rivejä kokoonpanotilassa. Jos mallin nimi on esim. "Supistuskappale.ipt", niin iPart:iksi muuttamisesta seuraa, että uusi Supistuskappale-niminen hakemisto luodaan sen hakemiston juureen, jossa "Supistuskappale.ipt" sijaitsee. Tähän hakemistoon tallennetaan eri versiot alkuperäisestä mallista.

iPart on tietyiltä osin puutteellinen. Valitettavasti iLogic-säännöt eivät toimi, kun iPart-osa tuodaan kokoonpanoon. Sama tilanne on True/False- ja tekstityyppisillä parametreilla, joita ei tuoda iPart-tilaan ollenkaan mukaan. True/False-tyyppiset parametrit olisivat olleet hyödyllisiä esim. kytkemään piirteitä, kuten jäykisteet pois päältä (Suppress) ja takaisin päälle (Unsuppress) yhdessä iLogic-sääntöjen kanssa käytettynä. Multi-Value-arvot, joita mm. jäykistepaksuuksille käytettiin rajoittamaan valittavia vaihtoehtoja, pystytään ohittamaan iPart-osilla. Jos jäykistepaksuuden parametrille on annettu vaihtoehdot 6 mm, 8 mm, 10 mm ja 12 mm, iPart-tilaan voi ilman mitään rajoituksia laittaa esim. 15 mm. Mikäli iPart-osa halutaan muuttaa takaisin tavalliseksi osaksi, poistetaan Table-osa piirrepuusta.

Aiemmin tehdyt parametrirajoitteet ja säännöt eivät silti menneet hukkaan vaikka mallit muunnetaan iPart-osiksi. iPart-osaksi muuttamisen jälkeenkin säännöt toimivat tilassa missä ollaan, kun 3D-malli avataan Inventor-ohjelmalla ja siinä voidaan testata ovatko syötetyt parametrit sallitulla arvoalueella. Käyttäjän vastuulle jää syöttää iPart-tilaan sellaisia parametreja, että ne ovat sallitulla arvoalueella. Kuvassa 54 iPart-osina kasattua kuvitteellista kanavistoa.

Vaihtoehtoinen työnkulku mallien viemiseksi kokoonpanotilaan on, että ensin aukaisetaan kukin kokoonpanossa tarvittava 3D-malli Inventor-ohjelmassa. Sitten tehdään mallitilassa parametrien muutokset, kun kaikki säännöt ja rajoitteet varmasti toimivat ja tallennetaan erilaisia versioita mallista eri nimillä. Lopulta nämä mallit tuodaan sitten kokoonpanoon. Vaihtoehtoinen työtapana on luotettavampi, koska säännöt ja rajoitteet toimivat varmasti. Testattaessa mallien kokoonpanoa työssä käytettiin iPart-

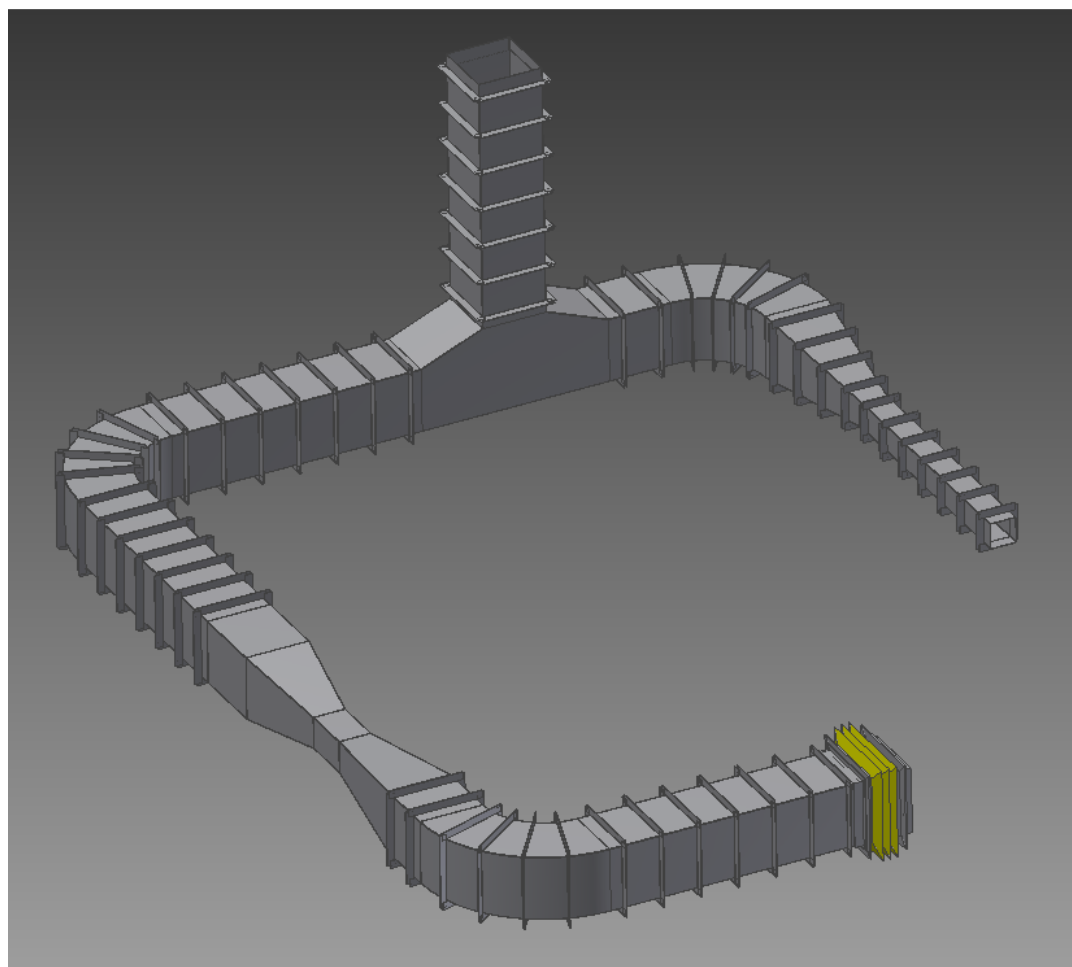
ominaisuutta, mikä vaatii huolellisuutta parametrien syöttämisessä, mutta on kätevä uusien versioiden luomisessa alkuperäisosasta. Käyttäjä itse lopulta päättää, mitä työtapaa tulee käyttämään. Inventor assembly ei ole välttämätön ympäristö kokoonpanon suorittamiseksi. AutoCAD-ohjelmassa saadaan myös hyvin nopeasti Inventorista ulos tuodut dwg-konvertoidut mallit liitettyä toisiinsa.

Place Standard iPart : Mutka.ipt

Keys Tree Table

	Member	Part Number	Duct_w	Duct_h	Duct_t	Duct_angle	Duct_r	Stiffe
New:	Mutka-03	Bend-03-03	500 mm	500 mm	5 mm	90 deg	750 mm	6 mm
1	Mutka-01	Bend-03-01	500 mm	500 mm	5 mm	90 deg	750 mm	6 mm
2	Mutka-02	Bend-03-02	500 mm	500 mm	5 mm	45 deg	750 mm	6 mm

Kuva 53. iPart-osan tuonti kokoonpanossa. Esitäytettyjä rivejä näkyy taulukossa kaksi kappaletta. New-rivillä pystyy luomaan alkuperäisestä osasta uuden version halutuilla mitoilla.



Kuva 54. Inventor-kokoonpanossa kasattua kuvitteellista kanavistoa. Mallit tuotu iPart-osina ja liitetty toisiinsa Constrain-toiminnon avulla.

## 9 POHDINTA

Käytännön osassa tavoitteena oli automatisoida kanavistojen suunnittelua ja se onnistui hyvin. Työn lopputuloksena syntyi valikoima parametrisoituja Inventor-malleja kattilalaitoksen kanaviston yleisimmistä osakokonaisuuksista. Supistuskappalemallia pystyy käyttämään myös suppilona. Kukin malleista on nopeampi tuottaa Inventor-ohjelmalla automaattisesti verrattuna vastaavien mallien tekemiseen AutoCAD-ohjelmalla. Malleja voi tuottaa myös lujuslaskentaa varten, koska Inventor keskustelee mainiosti lujuslaskentaohjelmien kanssa. Teoriaosuudessa lukijalle on annettu riittävä yleiskuva BFB-kattiloiden sekä ilma- ja savukaasukanavien toiminnasta.

Mallien testaaminen tapahtui parametrien arvoja muuttamalla ja havaitsemalla niistä aiheutuvat virheilmoitukset sekä muulla tavalla odottamaton käyttäytyminen. Mallit saatiin toimimaan luotettavasti määrittämällä 3D-mallien luonnokset täydellisesti, luomalla sääntöjä ja rajoitteita sekä ottamalla huomioon virtaustekniset suositukset.

Erilaisten tehtyjen mallien määrä saattaa vaikuttaa suurelta, mutta kanavan muoto (pyöreä/suorakaide) ja käytettävä jäykistämistapa voi vähentää huomattavasti sitä, kuinka monta erilaista mallia tietyssä suunnittelutehtävässä lopulta tarvitaan.

Inventor on laaja suunnitteluohjelmisto, jossa on monia eri osa-alueita. Omalta osaltani kehitystä on tapahtunut ohjelman käyttämisessä ainakin sääntöjen luomisen osalta opinnäytetyön tekemisen aikana.

Vaikka opinnäytetyön käytännön osuuden lopputulos on toimiva, kehittämisen varaa-kin varmasti on. Tulevaisuuden kehittämistehtäviin voisi sisältyä 3D-mallien valikoiman kasvattaminen erikoisemmilla kanaviston osilla. Kehittämisen arvoista olisi myös eristemallien lisääminen kanavien päälle tilanvarauksena siten, että kaikkien kanavan osien eristeet saataisiin näkyviin ja pois näkyvistä yhtä parametria muuttamalla. Lisäksi olisi hyvä toteuttaa mallien työkuvien parametrisointi ja tutkia onko mahdollista luoda kanavistoa AutoCAD-ohjelmasta tuotujen kanavan keskiviivojen ympärille.

## LÄHTEET

Autodesk Inventor suomenkieliset tuotesivut [Viitattu 29.5.2012] .  
<http://www.autodesk.fi/adsk/servlet/pc/index?siteID=448412&id=14603173>

Comatec Oy yrityssivut [Viitattu 29.5.2012].  
<http://www.comatec.fi>

Home, L. 2004. *Inventor 9 perusteet opetusmateriaali*. Cadlink Oy.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 2004. *Höyrykattilatekniikka*. Helsinki: Edita.

Papunen, Reijo 2012. Prosessi-insinööri. Rantotek Oy. Varkaus 24.5.2012. Suullinen tiedonanto.

Rantotek Oy yrityssivut [Viitattu 29.5.2012].  
<http://www.rantotek.fi>

WebDia [Viitattu 29.5.2012].  
<http://www.rte.vtt.fi/webdia/oljylampo/opastus/faq.asp?Viite1=OF155>



