



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Kristian Laurén

# Parametrinen 3D-malli lämmönsiirtimelle

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

29.3.2019

Tekijä Otsikko	Kristian Laurén Parametrinen 3D-malli lämmönsiirtimelle
Sivumäärä Aika	55 sivua + 1 liite 29.3.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Ammatillinen pääaine	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Pekka Salonen Vanhempi suunnittelija Henri Laamanen
<p>Tämä insinöörityö toteutettiin Neste Engineering Solutions Oy:n (NES) toimeksiantona. Työn tavoitteena oli kehittää 3D-suunnitteluohjelmisto Autodesk Inventorilla parametrinen malli BEU-tyyppin lämmönsiirtimille, ja tämän jälkeen testata sen toimintaa ja käyttöä asiakasprojektissa. Toimeksiantajaa kiinnosti erityisesti parametrisen mallin avulla saavutettava suunnittelutyön mahdollinen tehostaminen sekä se, kuinka kehitetty parametrinen malli toimii käytännössä.</p> <p>Laitepiirustukset tehdään NES:llä pääsääntöisesti 2D-suunnitteluohjelmistoilla. Piirustusten teko on olennainen ja välillä aikaakin vievä osa laitesuunnittelijan työtä. Tässä kehitystyössä kerättiin lisäinformaatiota myös siltä varalta, että yrityksessä päädytään tulevaisuudessa käyttämään enenevässä määrin 3D-suunnitteluohjelmistoja laitesuunnittelun tukena.</p> <p>Suunnittelupohjana toimi aiemmassa kehitysprojektissa säiliölle tehty parametrinen 3D-malli ja sen kehitystyöstä saadut käyttökokemukset. Myös säiliömalli oli tehty Autodesk Inventorilla. Suunnittelutyössä noudatettiin painelaitestandarddeja EN 13445-3 ja TEMA R sekä yrityksen omia spesifikaatioita.</p> <p>Insinöörityön tuloksena saatiin kehitettyä toimiva ja suunnittelu-aikaa säästävä parametrinen malli. Mallia demonstroidessa todettiin, että sen avulla saatiin vähennettyä päämittakuvan tekemiseen varattua aikaa jopa 60 %.</p>	
Avainsanat	Autodesk Inventor, lämmönsiirrin, parametrinen malli

Author Title	Kristian Laurén Parametric 3D- Model for a Heat Exchanger
Number of Pages Date	55 pages + 1 appendix 29 March 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Professional Major	Energy and Environmental Technology
Instructors	Pekka Salonen, Senior Lecturer Henri Laamanen, Senior Design Engineer
<p>This Bachelor's thesis was assigned by Neste Engineering Solutions Ltd. (NES). The objective of the thesis was to develop a parametric model for BEU-type heat exchangers with 3D- CAD software Autodesk Inventor and after the development process it was to be demonstrated in a customer project. The client was especially interested in the possible efficiency offered by the parametric model and how it would work in practice.</p> <p>Equipment drawings are mainly drafted with 2D- CAD software in NES. The drafting of equipment drawings is an essential and sometimes a time consuming part of a design engineer's work. The aim in this development project was also to gather additional information if the company decided to start using 3D -CAD software to an increasing extent for the support of equipment design.</p> <p>The developed parametric 3D -model developed and the gained user experience in a previous development project served as the basis of design. The previously developed model was also designed with Autodesk Inventor. Pressure equipment standards EN 13445-3, TEMA R and the company's own specifications were utilized in design work.</p> <p>As a result of the Bachelor's thesis, a fully functioning parametric model was developed, which saved designing time considerably. When demonstrated in practice, it was discovered the model reduced the time reserved to draft an outline drawing up to 60 %.</p>	
Keywords	Autodesk Inventor, heat exchanger, parametric model

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta ja tarkoitus	1
1.2	Lämmönsiirrintyyppin rajaus	1
1.3	Neste Engineering Solutions Oy	2
2	Tietotausta	2
2.1	Lämmönsiirto	2
2.1.1	Lämmön johtuminen	2
2.1.2	Konvektio	5
2.1.3	Lämpösäteily	6
2.2	Lämmönsiirtimen toiminta ja rakenne	8
2.2.1	Levylämmönsiirrin	8
2.2.2	Putkilämmönsiirrin	9
2.3	Painelaitesuunnittelussa noudatettavat standardit ja spesifikaatiot	10
2.4	Tietokoneavusteinen suunnittelu (CAD)	11
2.4.1	3D-suunnittelu	11
2.4.2	Autodesk Inventor	12
3	Parametrisen mallin kehittäminen	18
3.1	Luurankomallin rungon suunnittelu	18
3.1.1	Yhteiden ja laippojen mallinnus	23
3.1.2	Lämmönsiirtimen jalustojen mallinnus	29
3.1.3	Putkiryhmän tukilevyt sekä liuku- ja nostotangot	32
3.1.4	Uloin U-putki ja tuubilayout	34
3.1.5	Jakolevyjen mallinnus	36
3.2	Osakokoonpanot	38
3.3	Kokoonpanomalli	39
3.3.1	Kokoonpanon kokoaminen	39
3.3.2	iLogic-funktiot ja skriptit	39
3.3.3	Lomakkeen käyttö ja muokkaus	45
3.3.4	Piirustusohjelman suunnittelu	47
4	Yhteenveto ja pohdinta	50
	Lähteet	54

Liite. TEMA-standardin mukaisten lämmönsiirrinten rakennejaottelu

## Lyhenteet

2D	Kaksiulotteinen suunnittelu.
3D	Kolmiulotteinen suunnittelu.
BEU	Mallinnuksen kohteena ollut putkilämmönsiirintyyppi.
CAD	<i>Computer Aided Design</i> . Tietokoneavusteinen suunnittelu.
iLogic	Autodesk Inventorin lomakepohjainen käyttöliittymä, jolla muokataan kokoonpanotiedostoja.
NES	Neste Engineering Solutions Oy. Opinnäytetyön tilaajayritys.
OTL	<i>Outer Tube Limit</i> . Uloin tuubiraja.
PED	<i>Pressure Equipment Directive</i> . Painelaitedirektiivi.
TEMA	<i>Tubular Exchangers Manufacturers Association</i> . Vaippa- ja putkilämmönsiirtimien valmistajien järjestö, joka ylläpitää suunnittelustandardeja lämmönsiirtimille.
VB Code	Autodesk Inventorin iLogicissa käytettävä ohjelmointikieli.

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta ja tarkoitus

Neste Engineering Solutions Oy:n (NES) laitesuunnittelusta vastaavalla osastolla tuotetaan jatkuvasti painelaitteisiin liittyviä piirustusdokumentteja. Erityisesti lämmönsiirtimien työpiirustusten luominen voi ajoittain olla aikaakin vievä prosessi, joten yrityksessä heräsi halu selvittää, olisiko edellä mainitussa työvaiheessa tehostamisen varaa. Valtaosa piirustuksiin liittyvästä laitedokumentaatiosta luodaan NES:llä 2D-suunnitteluohjelmistoilla, joten kiinnostuksen kohteena oli myös 3D-suunnitteluohjelmiston tarjoamat edut piirtämisen sekä helppokäyttöisyyden kannalta.

Tätä insinööriyötä edeltävässä kehitysprojektissa oli jo aikaisemmin mallinnettu CAD-ohjelmisto Autodesk Inventorilla parametrinen 3D-malli säiliölle, joten oli luonnollista jatkaa samalla ohjelmistolla myös lämmönsiirtimeen perustuvan mallin kehittelyä. Samalla voitiin hyödyntää säiliömallin kehityksessä saatuja oppeja ja parantaa esille nousseita kehityskohteita parametriseen mallintamiseen liittyen.

## 1.2 Lämmönsiirrintyyppin rajaus

Parametrisen mallin kehitykselle ja testaamiselle varattiin työaika n. kolme kuukautta eli 400 tuntia. Kehitystyö suoritettiin NES:n tiloissa Porvoon Kilpilahdessa. Tiukan aikarajan takia päätettiin, että projektissa keskitytään ainoastaan selkeästi rajatun lämmönsiirrintyyppin mallin kehittämiseen. Mallinnettavaksi lämmönsiirrintyypiksi valittiin putkilämmönsiirrin ja noudatettavaksi lämmönsiirrinstandardiksi Tubular Exchanger Manufacturers Associationin R-tyyppi eli TEMA R. R-luokan lämmönsiirtimiä käytetään yleisesti ottaen petroliprosessoinneissa, mutta myös laajemman mittakaavan prosessointisovelluksissa [1]. Putkilämmönsiirtimissä löytyy suunnitellusta prosessiympäristöstä riippuen monia eri vaihtoehtoja, jotka vaikuttavat mm. lämmönsiirrimen tilavuuteen ja rakenteeseen. Mallinnettavaksi valittiin BEU-tyypin putkilämmönsiirrin, koska se oli rakenteeltaan ja tilauskannaltaan yleisimpiä lämmönsiirrintyyppejä. B merkitsee Bonnet-päätyä, eli pääty on integroitu kiinni jakokammioon, E merkitsee vaippaa, joka on suunniteltu yksinkertaiselle läpivirtaukselle ja U merkitsee sitä, että vaipan sisällä kulkeva putkisto kaartuu U-kirjaimen muotoisesti. Liitteenä on TEMA R -standardista löytyvä lämmönsiirtimien luokittelu. Lisäksi pa-

rametristä mallia suunnitellessa otettiin huomioon Nesteen omat spesifikaatiot, painelaitedi-  
rektiivi (PED) ja lämmittämättömien paineastioiden suunnittelun standardi EN 13445-3.

### 1.3 Neste Engineering Solutions Oy

Neste Engineering Solutions Oy on konsultti-, suunnittelu- ja projektinjohtopalveluihin keskittyvä yritys, joka kuuluu samaan konserniin Neste Oy:n kanssa. NES:llä on maailman kärkiosaamista erityisesti öljynjalostus- ja bioteknologian alueilta. Öljynjalostajien lisäksi yrityksen asiakkaita ovat kaasu-, petrokemian ja kemianteollisuuden sekä biotekniikan alan yritykset maailmanlaajuisesti [2].

## 2 Tietotausta

### 2.1 Lämmönsiirto

Lämmönsiirto on kahden eri lämpötilaisen väliaineen välillä tapahtuvaa lämpövirran vuorovaikutusta. Lämmönsiirtoa tapahtuu kolmella eri tavalla: johtuen, konvektiolla tai lämpösäteilyllä. Yleensä lämmönsiirto on kaikkien näiden kolmen mainitun lämmönsiirtymistavan sekoitusta. [3, s.13.]

#### 2.1.1 Lämmön johtuminen

Lämmön johtuminen on kiinteässä aineessa, nesteessä tai kaasussa tapahtuvaa molekyylien välittämää ja lämpötilaeron aiheuttamaa lämmönkuljetusta. Teknisissä sovel-  
luksissa (esim. lämmönsiirrin) yleisin lämmönkuljetuksen muoto on jatkuva lämmön tuominen, joka ylläpitää lämpövirtaa. Tällöin puhutaan stationäärisestä johtumisesta. [3, s.15.] Lämpö voi johtua myös aineesta toiseen, jos ne ovat kosketuksissa toisiinsa.



Kaavassa 1 on kuvattu Fourierin laki, joka esittää stationaaritilassa kiinteän kappaleen poikkileikkauksen läpi virtaavaa lämpöenergiaa ajassa  $t$ .

$$Q = -\lambda * A * t * \frac{d\theta}{dx} \quad (1)$$

jossa

$A$  = Kiinteän kappaleen poikkileikkaus

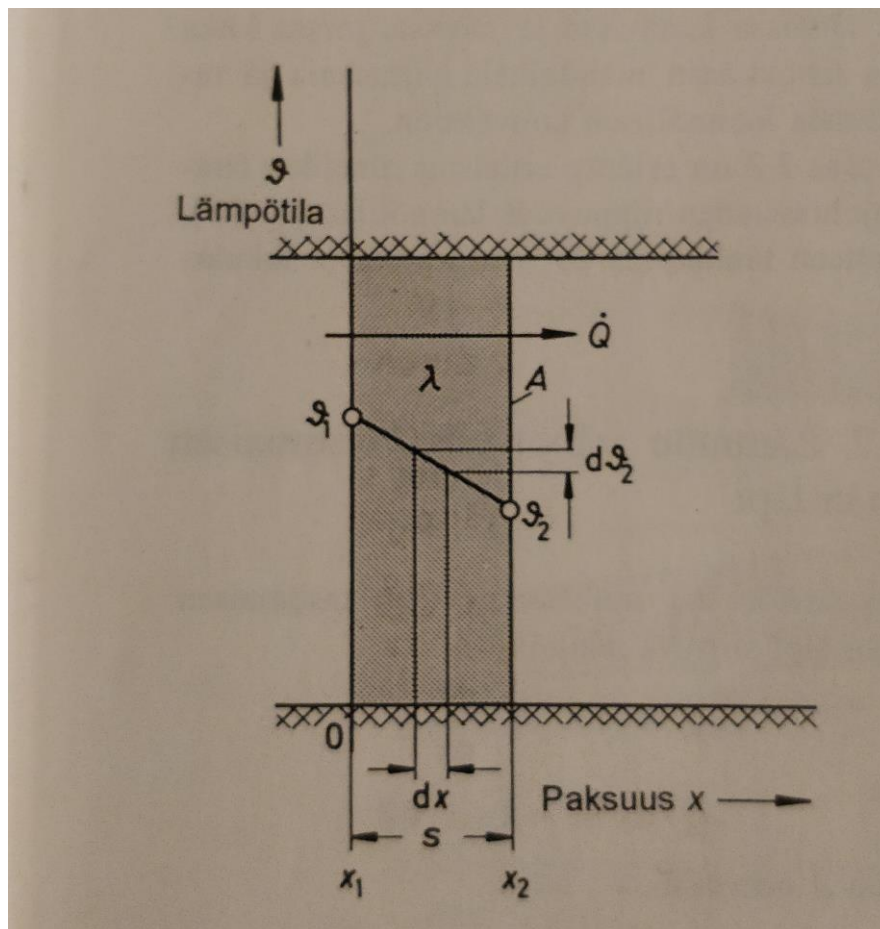
$Q$  = Lämpöenergia

$t$  = Aika

$\lambda$  = Lämmönjohtavuus

$\frac{d\theta}{dx}$  = Lämpötilan lasku pituusyksikköä kohti

Lämmönjohtavuus (kuva 1) vaihtelee väliaineen laadusta ja lämpötilasta riippuen.



Kuva 1 Lämmön johtuminen tasomaisen tasapaksun seinämän läpi [3, s.15.]

Lämpövirta  $\dot{Q}$  kuvaa lämpömäärää jaettuna sen siirtymiseen kuluneella ajalla

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = -\lambda * A * \frac{d\theta}{dx} \quad (2)$$

Kaavassa 2 lämpötilaero on vain yhdessä suunnassa ja lämpötilan oletetaan olevan vakio tätä suuntaa vastaan kohtisuorilla tasoilla. Jos halutaan selvittää lämpövirta pinta-alayksikköä kohti, puhutaan lämpövirran tiheydestä  $\dot{q}$ . [3, s.15.]

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3)$$

Lämpövirran tiheydelle saadaan yhtälö kaavasta 2:

$$\dot{q} = -\lambda * \frac{d\theta}{dx} \quad (4)$$

Lämpö johtuu kiinteässä aineessa molekyylien värähtelyn välityksellä, mutta metalleissa on otettava tämän lisäksi huomioon vielä elektronien välityksellä tapahtuva lämmönjohtuminen. Tämä kasvattaa lämmönjohtavuutta. Sähköä johtavien aineiden lämmönjohtavuudet ovat huomattavasti suurempia, koska metalleissa elektronit liikkuvat kidehilan väleissä, aivan kuten kaasumolekyylit. Metallin lämmönjohtavuutta 20 °C:n lämpötilassa on havainnollistettu kaavassa 5 [3, s.16]:

$$\lambda_{T20^{\circ}C} = \frac{2,45 * x_e * T}{10^8} \quad (5)$$

jossa

$x_e$  = sähkönjohtavuus (l/( $\Omega$ \*m))

$T$  = absoluuttinen lämpötila (K)

Suuruusluokka  $\lambda$  = 10...500

Kaasujen kohdalla lämmönjohtavuus vaihtelee ominaislämpökapasiteetista  $c$  ja viskositeetista  $\eta$  riippuen, koska molekyylit liikkuvat niissä vapaasti huomattavalla nopeudella. Lämpö siirtyy molekyylivärähtelyiden, pyörimisen ja etenevän liikkeen energiana. [3, s.16.]

Kaavassa 6 on esitetty lämmönjohtavuus kaasussa painevälillä 0,1...10 bar ja 20 °C:n lämpötilassa likimääräisesti, huomioonottamatta kaasuja H<sub>2</sub> ja He:

$$\lambda_{20^{\circ}\text{C}} \approx \eta * c_p * \frac{9-x}{4} \quad \text{W/(m}^{\circ}\text{K)} \quad (6)$$

jossa

$\lambda$  = suuruusluokka 0,01...0,25

$x$  = isentrooppiekspONENTTI

$c_p$  = ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa

$\eta$  = dynaaminen viskositeetti (Pa\*s)

Nesteiden lämmönjohtavuudet vaihtelevat seuraavanlaisesti [3, s.16]:

- orgaaniset nesteet,  $\lambda = 0,1...0,2 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$
- vesi, NH<sub>3</sub> ja muut polaariset nesteet  $\lambda = 0,2...0,6 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$
- suolasulat,  $\lambda = 1...4 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$
- metallisulat,  $\lambda = 10...100 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$

Tasomaisen seinän läpi johtuva lämpövirta saadaan johdettua kaavasta 2:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} * A * (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (7)$$

jossa

$s$  = seinämän paksuus

### 2.1.2 Konvektio

Konvektio on lämmön siirtymistä virtaavassa aineessa eli fluidissa, tai sen ja sitä koskettavan kiinteän pinnan välillä. Vapaa eli luonnollinen konvektio perustuu lämpötilaeroista johtuviin tiheyseroihin, jotka synnyttävät nostevoimia ja sitä myöten virtausta. Pakkokonvektiossa virtaus aiheutetaan esimerkiksi kompressorin tai pumpun avulla. Mikäli virtaus on turbulენტtista, on lämmön siirtyminen fluidin sisällä voimakkaampaa. [3, s. 51, s. 82; 4, s. 7.]

Konvektiolla tapahtuva lämmönsiirto kiinteän pinnan ja fluidin välillä lasketaan kaavalla 8:

$$q = \alpha(T_{pinta} - T_{fluid}) \quad (8)$$

jossa

$q$  = lämmönsiirto fluidin ja kiinteän pinnan välillä

$\alpha$  = lämmönsiirtokerroin

$T_{fluid}$  = fluidin lämpötila (K)

Konvektion luonne vaihtelee sen mukaan, onko siinä esiintyvä virtaus laminaarista vai turbulenttista. Laminaarinen virtaus on suoraviivaista, ja sitä havaitaan pienillä virtausnopeuksilla. Turbulenttinen virtaus on pyörteistä, ja sitä esiintyy suurilla virtausnopeuksilla. [4, s.9.]

Virtauslaji voidaan määritellä Reynoldsin luvun avulla. Jos Reynoldsin luku on putkivirtauksessa  $\leq 2300$ , on kyse laminaarisesta virtauksesta. Mikäli Reynoldsin luku ylittää arvon 4000, puhutaan turbulenttisesta virtauksesta. Turbulenttisen ja laminaarisen virtauksen välille sijoittuvat Reynoldsin luvun arvot sisältyvät ns. siirtymävyöhykkeeseen, jolloin virtaus on joko laminaarista tai turbulenttista. Tämä tarkoittaa useimmiten sitä, että virtaus vaihtelee laminaarisen ja turbulenttisen välillä. [4, s.9]

### 2.1.3 Lämpösäteily

Lämpösäteilyssä eli termisessä säteilyssä energia siirtyy sähkömagneettisten aaltojen välityksellä. Lämpösäteilyksi lasketaan yleensä säteily, jonka aallonpituus rajoittuu välille  $\lambda = 0,8 \dots 400 \mu\text{m}$ . Alarajana pidetään näkyvällä aallonpituusalueella  $\lambda = 0,35 \dots 0,75 \mu\text{m}$  olevaa valoa. Säteilyn lämpötilan kasvaessa myös sen energiamäärä kasvaa. Kapaleen kohdatessaan säteily joko heijastuu siitä, imeytyy siihen tai menee siitä läpi. [3, s.117.]

Kaava 9 havainnollistaa lämpösäteilyn energian säilymistä:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (9)$$

jossa:

$\rho$  = heijastunut osuus

$\alpha$  = absorboitunut osuus

$\tau$  = läpi mennyt osuus

Kiinteistä aineista suurin osa on läpäisemättömiä äärimmäisen ohuinakin. Metalleilla tämä raja on 1  $\mu\text{m}$  ja nesteillä 1 mm. Lämpösäteilystä puhuttaessa kappaleet jaetaan värien mukaan sen perusteella, millaiset heijastumis-, imeytymis- tai läpäisevyysominaisuudet niillä on: [3, s.117.]

- **musta kappale** imee kaiken siihen osuvan säteilyn
- **valkoinen kappale** heijastaa kaiken siihen osuvan säteilyn
- **harmaa kappale** imee saman osuuden kaikista aallonpituuksista

Niin sanottu musta kappale lähettää suurimman mahdollisen säteily määrän. Kappaleen lähettämä säteily riippuu sen pinnan laadusta sekä lämpötilasta. Kappaleen lähettämää säteilyä suhteessa mustaan kappaleeseen ilmaistaan emissiivisyydellä  $= \epsilon$ . Kirchoffin laki määrittää, että emissiivisyys  $\epsilon$  on yhtä suuri kuin absorptiosuhde  $\alpha$  [3, s.117]:

$$\epsilon = \alpha \quad (10)$$

Kappaleen lähettämä kokonaissäteily saadaan Stefan-Boltzmannin yhtälöstä:

$$q = \sigma * T^4 \quad (11)$$

jossa:

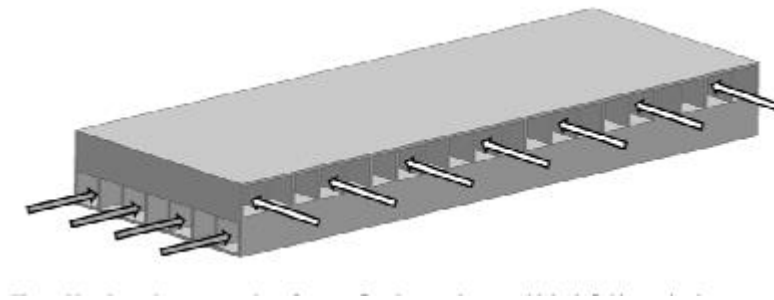
$\sigma$  = Stefan-Boltzmannin vakio =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

$T$  = lämpötila (K)

## 2.2 Lämmönsiirtimen toiminta ja rakenne

Lämmönsiirrin on laite, jonka avulla siirretään lämpöä kahden väliaineen välillä. Väliaineet on yleensä erotettu kiinteällä seinämällä, jotta ne eivät sekoitu keskenään, mutta joskus ne voivat olla myös suoraan kosketuksissa toisiinsa laitteesta riippuen. Termodynamiikan sääntöjen mukaisesti lämpö siirtyy aina kuumemmasta väliaineesta kylmempään. Lämmönsiirtimiä käytetään laajasti useilla eri teollisuudenaloilla, kuten voimalaitoksissa, prosessi- ja elintarviketeollisuudessa. [5, s.7.]

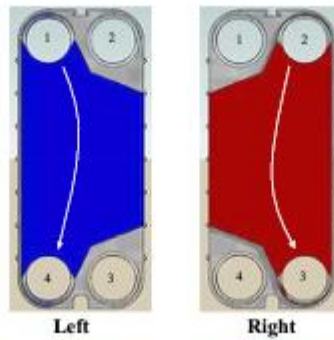
Lämmönsiirtimiä voidaan jaotella esimerkiksi niiden rakennetyypin tai virtauskuvion mukaan. Ristivirtauksessa (kuva 2) eri väliaineet kulkevat toisiinsa nähden kohtisuoraan. Myötävirtauksessa molemmat väliaineet liikkuvat lämmönsiirtimessä samansuuntaisesti ja vastavirtauksessa edelleen yhdensuuntaisesti, mutta vastakkaisiin suuntiin. Teollisuudessa yleisimpiä lämmönsiirintyyppejä ovat levylämmönsiirtimet ja putkilämmönsiirtimet.



**Kuva 2: Esimerkki ristivirtauksesta, jossa väliaineet eivät ole kosketuksissa toisiinsa [5, s.79]**

### 2.2.1 Levylämmönsiirrin

Levylämmönsiirrin rakentuu pääosiltaan lämmönsiirtolevyistä ja niitä yhdistävistä putkista, tukirakenteista ja lämmönsiirrintä ympäröivästä kuoresta. Lämmönsiirtimen sisä- ja ulostuloyhteet tulevat kuoren läpi. Levyissä on yleensä aukot kylmemmän ja kuumemman fluidin virtausväylille (kuva 3), jotka vuorotellen menevät joko levyn läpi tai yhdistyvät niihin. [5, s.117.]

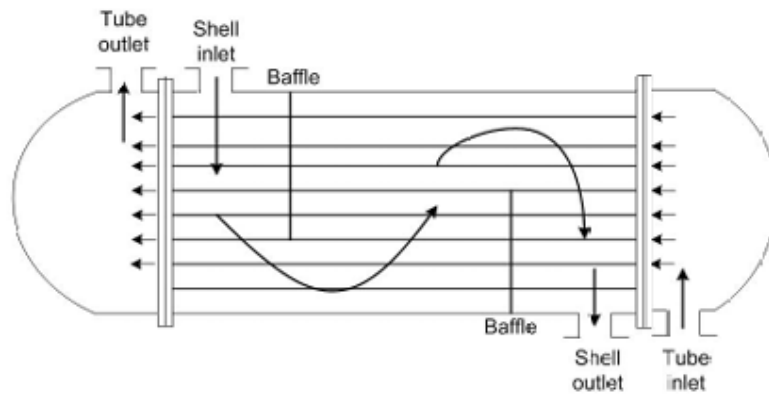


Kuva 3: Esimerkki levylämmönsiirtimen virtauskuviosta [5, s.118]

Levylämmönsiirtimet ovat yleensä kompaktimman kokoisia verrattuna putkilämmönsiirtimiin, sillä niiden lämmönsiirtokerroin on korkeampi johtuen levyjen laajasta lämmönsiirtoalasta. Levylämmönsiirtimiä käytetään erityisesti elintarvike- ja lääketeollisuuden prosesseissa. Niiden etuja ovat mainitun korkean lämmönsiirtokertoimen lisäksi helpohoitaisuus, mahdollisuus poistaa levyjä mikäli prosessi niin vaatii ja vähäinen likaantumisen. Haitoiksi voidaan lukea suuret paineenlaskut levyjen aallotetun muotoilun vuoksi, mahdollisesti suuremmat kustannukset verrattuna putkilämmönsiirtimiin ja puuttuva mallistandardi. [5, s.115, s.119.]

### 2.2.2 Putkilämmönsiirrin

Putkilämmönsiirtimet ovat laajimmin käytetty lämmönsiirrintyyppi prosessiteollisuudessa. Ne ovat kestäviä ja joustavia yksiköitä, jotka toimivat eri paineissa, virtauksissa ja lämpötiloissa. Putkilämmönsiirtimissä (kuva 4) väliaineet kulkevat vaippa- ja putkipuolella. Lämmönsiirtimen päädyissä sijaitsevat putkipuolen sisään- ja ulostulot. Prosessista riippuen ne voivat sijaita joko samalla tai vastakkaisella puolella. Niiden kautta virtaava väliaine siirtyy lämmönsiirtimen poikki putkien välityksellä. Vaippapuolella liikkuva virtaus kulkee samaan tapaan lämmönsiirtimeen vaippaan kiinnittyvien yhteiden kautta. Prosessivaatimuksista riippuen putket voivat tehdä useampia kierroksia lämmönsiirtimen läpi. Tällöin lämmönsiirtimen päädyistä rakennetaan monikanavaisia, jotta putkipuolen virtaus pääsee kääntymään. Putkilämmönsiirtimen toimintaidea mahdollistaa useita eri vaihtoehtoja väliaineiden virtaussuuntien ja sisään- ja ulostuloyhteiden suhteen. Mikäli väliaineiden keskinäistä kontaktia halutaan vielä lisätä, voidaan vaippapuolelle sijoittaa ns. baffeleita, jolloin vaippapuolella virtaava väliaine tekee pidemmän matkan lämmönsiirtimen sisällä. [5, s.176.]



Kuva 4: Putkilämmösiirtimen toimintaidea [5, s.176]

Lämmönsiirron tehostamiseksi voidaan vaikuttaa esimerkiksi putkien läpimittaan ja lukumäärään, baffleiden leikkaukseen ja lukumäärään sekä vaipan halkaisijaan. [5, s.176.]

### 2.3 Painelaitesuunnittelussa noudatettavat standardit ja spesifikaatiot

Painelaitteiden suunnittelussa on otettava huomioon useampia standardeja ja lainsäädännöllisiä asetuksia. Nämä asettavat suunnittelulle omat raaminsa, joiden sisällä on pysyttävä painelaitteen turvallisen käytön varmistamiseksi. Standardien ja lainsäädännöllisten asetusten lisäksi monilla yrityksillä on myös omat tarkentavat ohjeistuksensa, spesifikaatiot, joita ne noudattavat painelaitesuunnittelussa. Tärkeimmät painelaittevalmistusta ja -suunnittelua ohjaavat asetukset ovat EU:ssa hyväksytty Painelaitedirektiivi 2014/68/EU ja tämän pohjalta kotimaiseen lainsäädäntöön sisällytetty Painelaitelaki.

Painelaitedirektiiviä 2014/68/EU sovelletaan ”sellaisten painelaitteiden ja laitekokoaisuuksien suunnitteluun, valmistukseen ja vaatimustenmukaisuuden arviointiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine (PS) on yli 0,5 bar.” (Painelaitedirektiivi 2014/68/EU, luku 1, kappale 1.) [6]

Painelaitelaissa painelaitteella tarkoitetaan ”säiliötä, putkistoa ja muuta teknistä kokonaisuutta, jossa on tai johon voi kehittyä ylipainetta, sekä painelaitteen suojaamiseksi tarkoitettuja teknisiä kokonaisuuksia” (Painelaitelaki, 1. luku, 2. §) [7].



Suomessa virallinen standardisoinnin keskusjärjestö on SFS, joka on koostanut mm. internetpalveluunsa mittavan valikoiman eri toimialakotaisia standardeja. Lämmittämättömien paineastioiden suunnittelun standardi EN 13445-3 [8] on vahvistettu eurooppalaisesta EN-standardista.

## 2.4 Tietokoneavusteinen suunnittelu (CAD)

Tietokoneavusteinen suunnittelu (CAD) on tietokoneohjelmiston hyödyntämistä suunnittelutyön tukena. Lyhenne CAD muodostuu englanninkielisistä sanoista *Computer Aided Design*. Erityisesti suunnittelutyötä varten kehitettyjen tietokoneohjelmistojen avulla saadaan halutusta tuotteesta tai suunnittelukohteesta tiedostomuotoja, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotannossa tai tulostamisessa. [9.] Tietokoneavusteisen suunnittelun avulla voidaan luoda valmiita tuotteita mm. 3D-tulostusta ja CNC-koneistusta hyödyntäen.

Tietokoneavusteinen suunnittelu on käytännössä useimmiten sitä, että suunnittelija piirtää 2D- tai 3D-ohjelmiston tarjoamien komentomahdollisuuksien avulla erilaisia viivoja, ympyröitä tai muita geometrisia muotoja, jotka lopulta muodostavat kuvan halutusta lopputuloksesta. Näitä muotoja voidaan myös esimerkiksi suurentaa, pienentää, siirrellä toiseen sijaan tai muuten manipuloida, jotta kuva tulee yksityiskohtiaan myöten oikein. [10, s.3.]

### 2.4.1 3D-suunnittelu

3D-mallinnuksella kappaleille, osille ja kokoonpanoille pyritään antamaan kaikki ne mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet, jotka löytyvät myös valmistettavasta tuotteesta. Suunnittelun lähtökohtana on se, että tuote mallinnetaan x-, y- ja z-koordinaatistoon kolmiulotteisessa avaruudessa. X-akseli asettuu suunnittelijaan nähden näytön alareunan mukaisesti, y-akseli näytön vasemman reunan mukaisesti, ja z-akseli tulee näytöstä kohti suunnittelijaa. Koordinaattiakselien origon voidaan ajatella sijoittuvan näytön vasempaan alareunaan, jolloin niiden positiiviset suunnat ovat kohti näytön oikeaa laidaa, ylälaitaa ja suunnittelijaa. [11, s.17.]

Valtaosa 3D-mallinnusohjelmista hyödyntää oikeakätistä suorakulmaista koordinaatistoa. Tämän pystyy havainnollistamaan käytännössä suoristamalla oikean käden etusormen ja peukalon suoraan kulmaan, ja laittamalla keskisormen kohtisuoraan edellä mainittuihin nähden. Myös kulmien positiiviset kiertosuunnat voi havainnollistaa oikeakätisellä suorakulmaisella koordinaatistolla. Oikea käsi puristetaan nyrkkiin ja peukalon suoristamalla saa esiin koordinaattiakselin positiivisen suunnan. Koukistettuna olevat sormet määrittävät koordinaattiakselin positiivisen pyörähdys suunnan. Esimerkiksi x-akselin positiivinen pyörähdys suunta on kohti suunnittelijaa. Suunnittelijan on aina muistettava, että kun mallinnetun kappaleen asentoa muutetaan koordinaatistoavaruudessa, muuttuvat samanaikaisesti myös koordinaatistoakselien suunnat. [11, s.17–19.]

3D-mallintaminen suunnittelutapana on viime vuosien aikana kasvattanut merkittävästi osuuttaan, ja tulevaisuudessa yritykset siirtyvät yhä enenevässä määrin 3D-mallinnusohjelmien käyttöön, koska ne ovat huomattavasti tehokkaampia kuin nykyiset 2D-ohjelmat. 3D-mallinnus mahdollistaa mallinnuksen ohella lisäksi useita sellaisia etuja, joita 2D-ohjelmat eivät pysty tarjoamaan, esimerkiksi simuloinnit, animoinnit ym. [11, s.13.]

3D-mallinnusohjelmien skaala on nykyään varsin laaja, ja teollisuuden käytettävissä on monia eri ohjelmavaihtoehtoja riippuen siitä, millaiseen tarpeeseen mallinnusohjelmaa kaivataan. Yleisimpiä käytössä olevia ohjelmistoja ovat mm. SolidWorks, Autodesk Inventor ja Catia. [11, s.16.]

#### 2.4.2 Autodesk Inventor

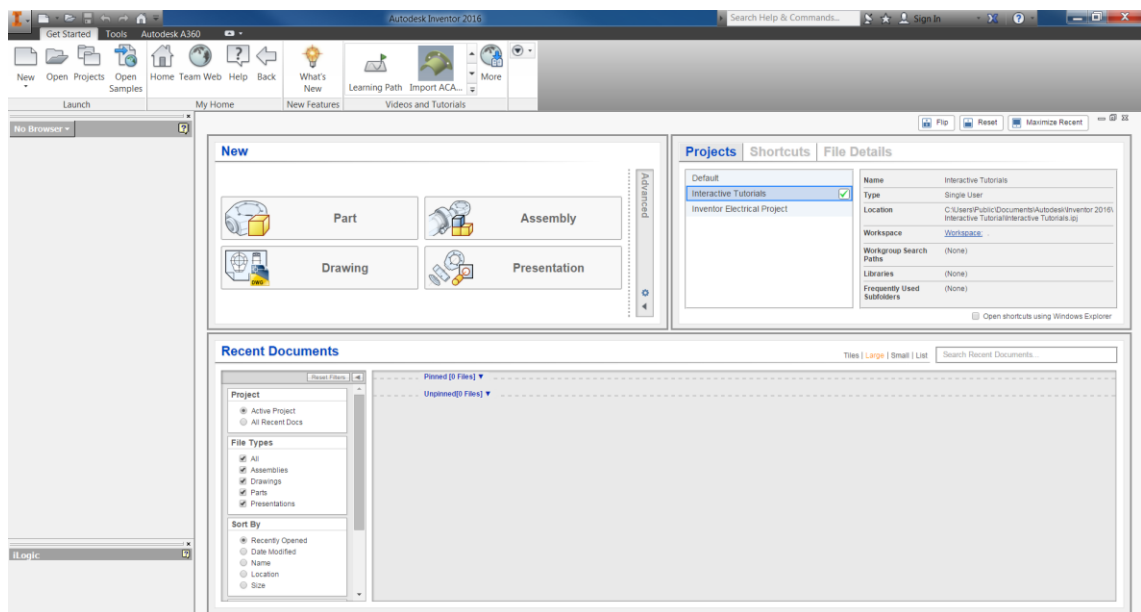
Tässä kappaleessa käydään läpi Autodesk Inventorin käyttöliittymää, ja avataan parametrin mallin kehittämisen kannalta oleellisia käsitteitä ja ominaisuuksia. Inventor sisältää lukemattomia eri suunnitteluominaisuuksia, joten tulevissa kappaleissa tarkastellaan tässä kehitysprojektissa merkittävässä osassa olleita mallinnustyökaluja.

Autodesk Inventor on tuote- ja mekaniikkasuunnittelussa hyödynnettävä 3D CAD-ohjelmisto. Inventorilla on mahdollista tuottaa niin osamalleja, kokoonpanoja kuin piirustuksiakin [12]. Tätä kehitysprojektia silmällä pitäen Inventorin aloitusvalikko (kuva 5) antaa mahdollisuuden valita neljästä eri tiedostomuodosta, joista Presentation-

tiedostomuotoa ei käydä tarkemmin läpi, koska sitä ei hyödynnetty kehitysprojektin aikana:

- Part
- Assembly
- Drawing
- Presentation

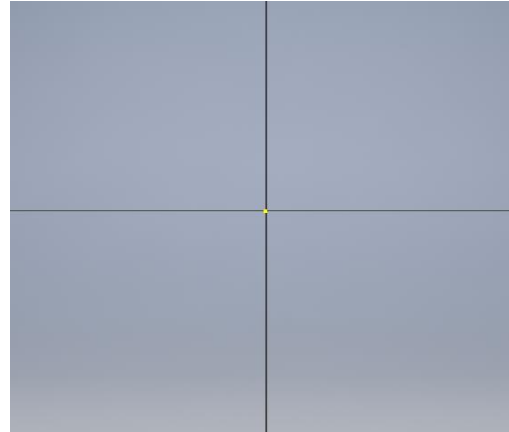
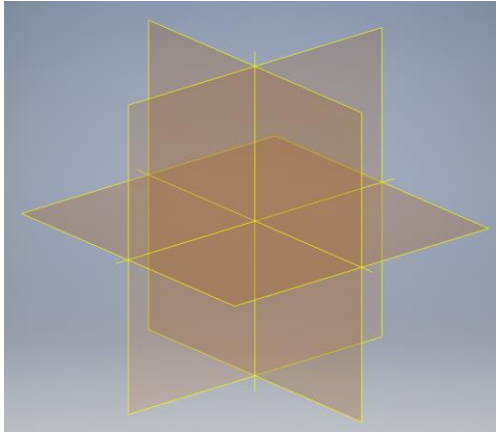
Part-tiedostoon voi piirtää yksittäisen itsenäisen osan, tai sitten piirretty osa voi muodostaa muiden mallinnettujen komponenttien kanssa yhdessä myöhemmin kokoonpanon. Assembly-tiedostoon on mahdollisuus koota useampia Part-tiedostoja, jotka yhdessä muodostavat kokoonpanon. Drawing-tiedostolla voidaan luoda piirustustiedosto Part- tai Assembly-tiedostosta. Presentation-tiedoston avulla saa haluamastaan kokoonpanosta esitystiedoston.



Kuva 5 Inventorin aloitusnäky

## Part-tiedosto

Kun uutta Part-tiedostoa lähdetään piirtämään, *3D Model*-välilehdeltä valitaan *Sketch*-paneelisti "Start 2D Sketch". Tämän jälkeen Inventor tarjoaa mahdollisuuden valita kolmesta eri aloitustasosta eli *Planesta*: YZ, XZ ja XY (kuva 6). Kun haluttu taso on valittu, voidaan varsinainen piirtäminen aloittaa (kuva 7).

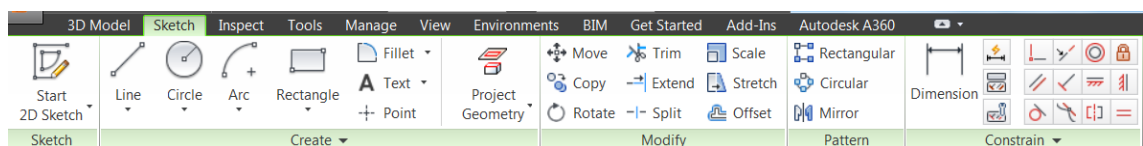


**Kuva 6: Ensimmäisen sketsin yhteydessä näkyvät aloitustasot**

**Kuva 7: Aloitustason valinnan jälkeinen näkymä koordinaatiston keskipisteestä**

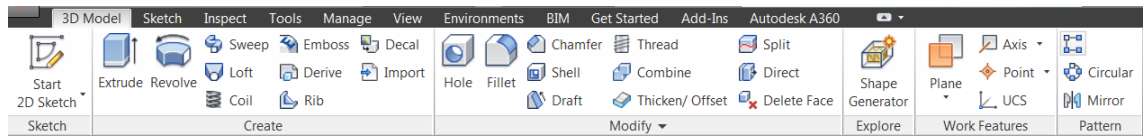
Inventorin *Sketch*-välilehdeltä (kuva 8) löytyy lukuisia vaihtoehtoja piirrettyjen muotojen valinnasta niiden hallintaan. *Create*-välilehdeltä voi valita, haluaako piirtää esimerkiksi viivan, ympyrän vai kaaren. *Modify*-välilehdeltä piirrettyä sketsiä voidaan mm. kopioida, liikuttaa tai skaalata. *Pattern*-välilehdeltä piirrettyjä muotoja pystyy peilaamaan halutun tason suhteen, tai muodostamaan nelikulmaisia tai ympyränmuotoisia kuvioita. *Constrain*-välilehdeltä löytyy mitoitus- ja rajoitustyökalut. Eri rajoitustyökaluilla viivoille tai muille muodoille voi asettaa ehtoja, jotta ne pysyvät halutussa asemassaan tai mitoituksessaan, vaikka sketsissä muutettaisiinkin muita mittoja.

Kun luotuun sketsiin ei enää tehdä muutoksia tai sen muokkaustilasta halutaan poistua, valitaan oikeasta yläkulmasta *Finish Sketch* -komento.



**Kuva 8: Osa *Sketch*-välilehdestä**

Inventorilla on mahdollista luoda monenlaisia kolmiulotteisia kappaleita. *3D Model*-välilehdeltä (kuva 9) löytyvillä vaihtoehdoilla voi johtaa sketseistä esimerkiksi pyörähdy- tai pursotuskappaleita. Lisäksi Part-tiedostoon voidaan tuoda *Derive*-komennon kautta sketsejä tai kiinteitä kappaleita toisesta Part-tiedostosta.

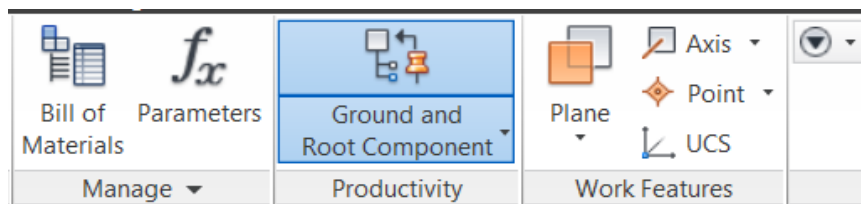


Kuva 9: Inventorin 3D-välilehti

Eräät 3D-välilehden tärkeät ominaisuudet löytyvät *Work Features* -paneelistä. *Plane*-ikonin avulla käyttäjä voi luoda Part-tiedostoonsa uusia tasuja, joille voi piirtää lisää sketsejä. Piirtotasot ovat käytännöllisiä siinä vaiheessa, kun kappaleen onnistuneeseen mallintamiseen ei enää riitä sketsien lisääminen aloituskoordinaatiston XY-, YZ- ja XZ-tasolle. Uusia piirtotasuja voidaan sijoittaa esimerkiksi etäisyyden tai kulman perusteella. Tasojen lisäksi mallintamisen avuksi voidaan lisätä myös apupisteitä ja -akseleita. Sketch-välilehdeltä monistaminen onnistuu myös *3D Modelin* puolella.

#### Assembly -tiedosto

Assembly-tiedosto luodaan halutuista Part-tiedostosta. Kun uusi Assembly-tiedosto on avattu, voi käyttäjä alkaa liittää siihen haluamiaan Part-tiedostoja. Ensimmäiseksi valitaan *Assemble*-välilehden *Component*-paneelistä *Place*-komento. Tämän jälkeen avautuvasta tiedostoikkunasta valitaan haluttu Part-tiedosto, jonka jälkeen se asetetaan halutulle paikalleen Assembly-tiedoston näkymässä. *Productivity*-paneelistä löytyvän *Ground and Root* -komennon (kuva 10) avulla jokaisen yksittäisen Part-tiedoston tai osakokoonpanon lokaalin koordinaatiston origo kiinnitetään kokoonpanon globaalin koordinaatiston origoon.



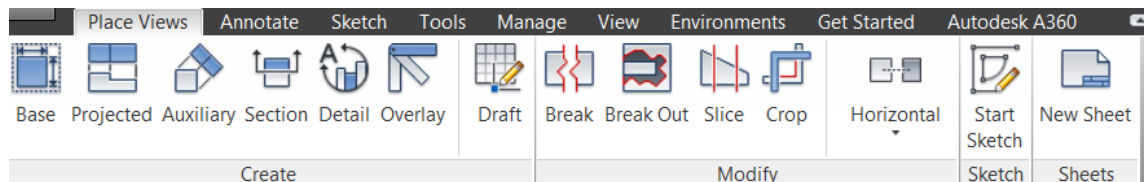
Kuva 10 Ground and Root Component -ikoni

Kokoonpanotiedostossa suunnitellulle objektille on mahdollista lisätä eri osille mm. materiaalitiedot, tai piilottaa näkyvistä haluttuja osia kokoonpanon tarkastelun helpottamiseksi. Lisäksi osia voidaan muokata läpikuultaviksi, jotta kokoonpanossa piiloon jäävät osat tulevat näkyville.

## Drawing -tiedosto

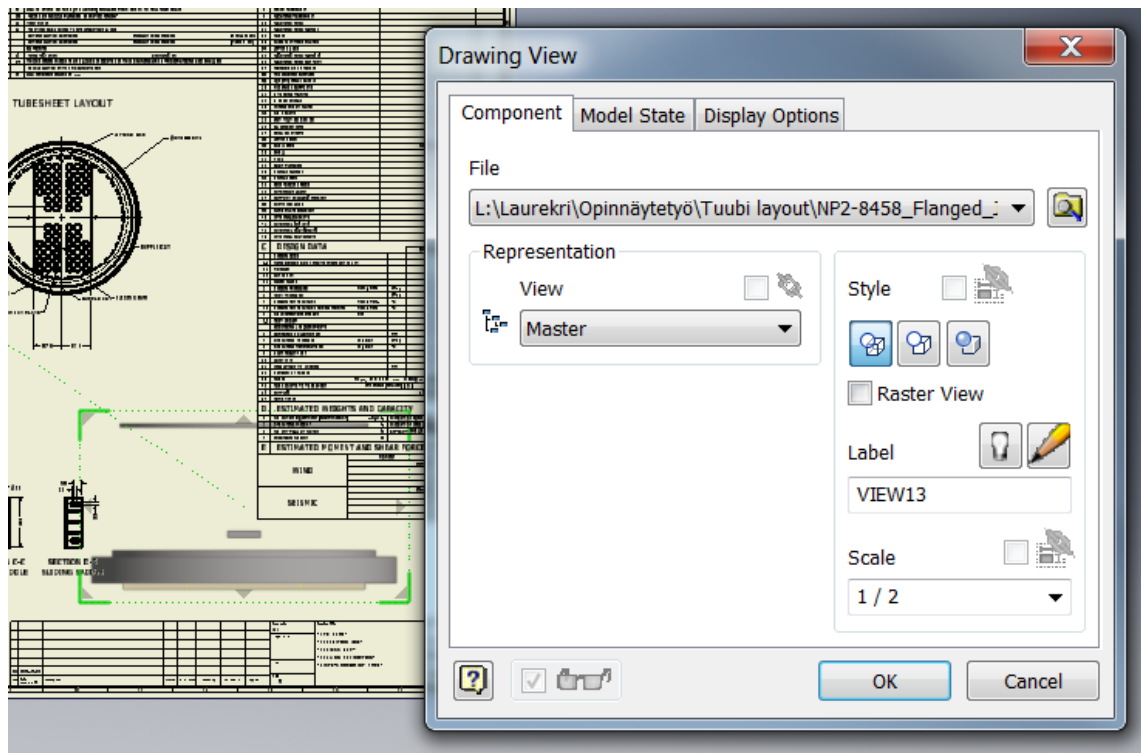
Drawing-tiedostoon luodaan osa- tai kokoonpanopiirustus Part- tai Assembly-tiedostosta. Inventorista löytyy myös valmiita piirustus pohjia, joita voi hyödyntää työpiirustusten alustoina, mutta useimmilla yrityksillä on käytössä itse tehdyt piirustus pohjansa. Näitä on mahdollista kehittää ja muokata Inventorin tarjoamalla työkaluilla, ja tämän jälkeen tallentaa omaksi piirustustiedostopohjaksi.

Kun suunnittelija haluaa siirtää suunnittelemansa osan tai kokoonpanon piirustus pohjaan, on hänen ensin klikattava piirustustiedostossa *Place Views* -välilehteä (kuva 11). Tältä välilehdeltä avautuu *Create*-paneelistä eri vaihtoehtoja sille, millaisia projektioita suunnittelija haluaa siirtää piirustukseensa.



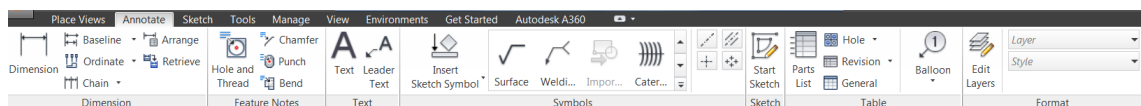
**Kuva 11: Place Views-välilehti**

Yleisimmät työpiirustuksissa käytetyt projektiot ovat objektin sivusta ja edestä otetut, sekä poikkileikkausprojektiot. Myös detaljiprojektioita esiintyy jonkin verran, jos jokin pieni yksityiskohta on saatava suurennettua muuten isokokoisesta objektista. Esimerkiksi klikkaamalla *Base*-ikonia suunnittelijalle avautuu valintaikkuna (kuva 12), jossa hän valitsee ensin tiedoston, joka siirretään piirustukseen. Samaan piirustukseen voi siirtää myös useamman eri tiedoston kuvia. Tämän jälkeen hän voi valita mm. projektion suunnan, mittakaavan ja sen, näytetäänkö objektista myös sen sisäosien geometriaa.



Kuva 12: Base View -valintaikkuna

Annotate-välilehdeltä (kuva 13) piirustukseen voi lisätä mm. mittoja, ikoneita ja tekstiä. Mittoja lisättäessä Inventor siirtää automaattisesti osaan tai kokoonpanoon mitoitettun lukeman piirustukseen.



Kuva 13: Annotate-välilehti

### 3 Parametrisen mallin kehittäminen

#### 3.1 Luurankomallin rungon suunnittelu

Putkilämmönsiirtimen mallinnus aloitettiin ns. luurankomallista, joka suunniteltiin Part-tiedostoon. Luuranko rakentui useista erillisistä sketseistä, tasoista, pinnoista, kirjoite-  
tuista parametreista ja funktioista. Yksittäinen sketsi voi ilmentää joko itsenäistä läm-  
mönsiirtimen osaa, tai sitten useamman sketsin avulla voidaan muodostaa lämmönsiir-  
timen osakokoonpanoja. Mallinnuskohteeksi valittu BEU-lämmönsiirrin (kuva 14) koos-  
tuu kymmenistä itsenäisistä sketseistä, jotka yhdessä muodostavat lopulta lämmönsiir-  
rinkokoonpanon. Tärkeintä sketsejä luodessa oli varmistaa, että lopuksi kaikki sketsien  
vapausasteet oli sidottu, jotta muutoksia kokoonpanomalliin tehdessä kaikki sketsit  
käyttäytyivät ennakoidusti, eikä ikäviä ”räjähdyskiä” tapahtunut.

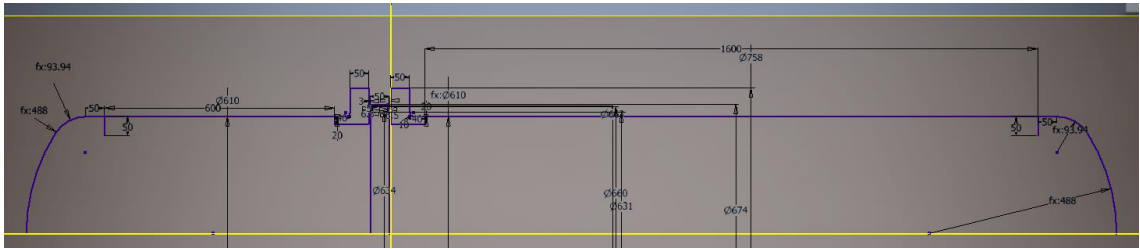


Kuva 14: BEU-typin lämmönsiirrin [13]

Luurankoa lähdettiin kokoamaan lämmönsiirtimen runko-osista, jotka koottiin kaikki  
yksittäisen aloitussketsin alle. Tähän runkosketsiin (kuva 15) piirrettiin lämmönsiirtimen  
molemmat päädyt, jakokammio, tuubivaippa, runkolaipat sekä tuubilevy. Sketsi jaettiin

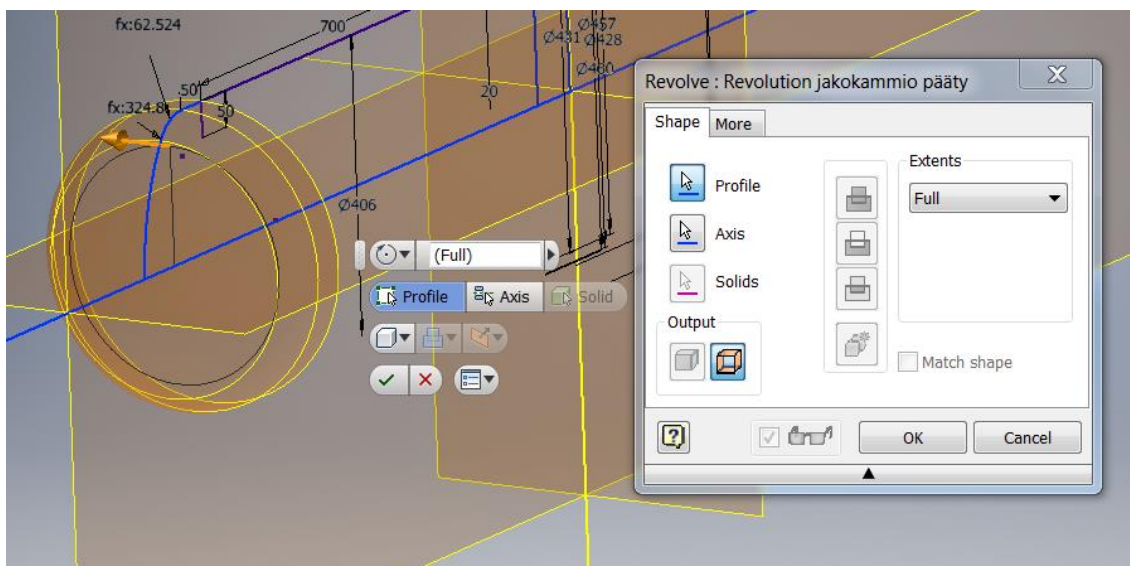


rungon osalta erikseen hallittaviin osiin esimerkiksi apuviivojen ja tiivistevälien avulla. Runko-sketsi piirrettiin YZ-tasolle ja päädyistään kiinni x-akseliin, koska edellä mainitut osat muodostavat lämmönsiirtimen kiinteän kokoonpanon, joten niitä ei ole tarvetta liikutella koordinaatistossa X-, Y- tai Z-suunnassa. Lisäksi YZ-tasolle horisontaalisesti mallintaminen mahdollisti sen, että valmiiseen kokoonpanoon liittyvät osat näkyvät erillisinä tiedostoina avattuina luonnollisessa asemassaan heti lähtötilanteessa.



**Kuva 15: Runkosketsi, johon piirrettiin lämmönsiirtimen päädyt, vaipat, runkolaipat sekä tuubilevy.**

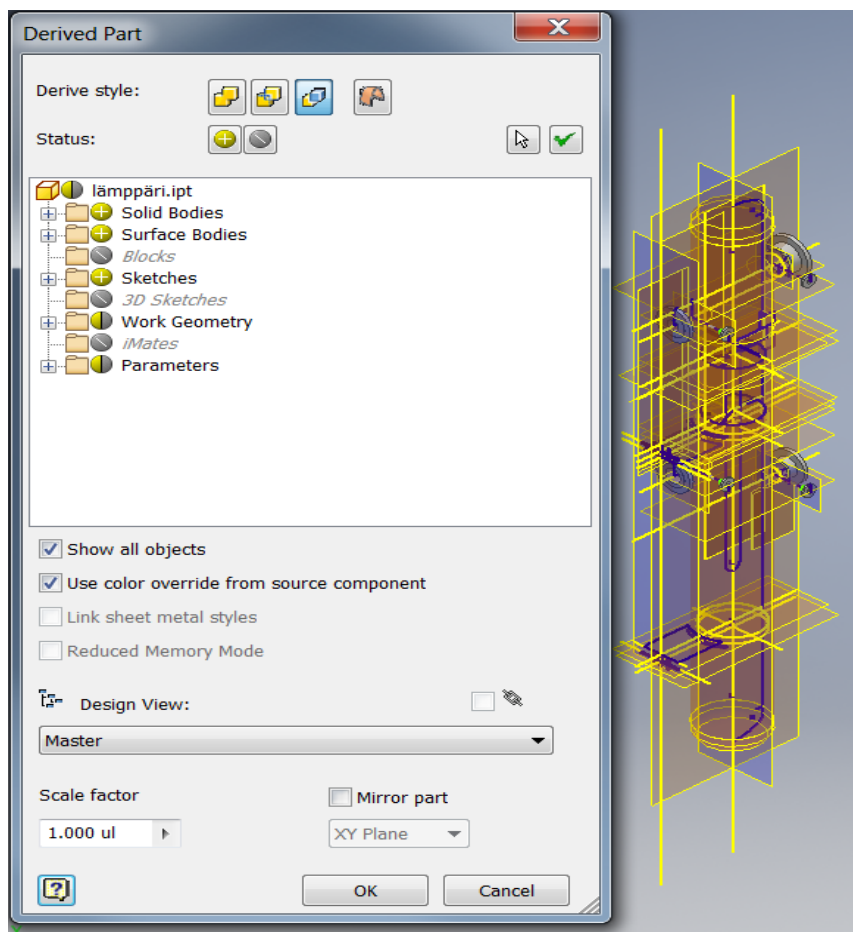
Päädyt mitoitettiin Korbbogen-standardin [14] perusteella ja erotettiin jakokammioista ja tuubivaipasta apuviivan avulla, koska pyörähdyskappaleet (kuva 16) muodostava *Revolve*-ominaisuus ei muuten osaisi erottaa esim. tuubivaippaa ja sen viereistä päätyä erillisinä osinaan. Kaikki rungon pyörähdyskappaleet tehtiin pintamalleina, jotta luuranko pysyisi selkeämpänä ja myöhemmin siihen lisättävät sketsit pysyisivät näkyvillä. Näitä pyörähdyskappaleita tarvittiin myös siksi, että niihin yhdistyviä lämmönsiirtimen osia olisi helpompi mallintaa. Tuubivaipan kylkeen sketsattiin YZ-tasosta vedetylle aputasolle nimikyltti, jonka mitoituksessa noudatettiin Nesteen omaa spesifikaatiota. Aputason etäisyydeksi määritettiin lämmönsiirtimen ulkohalkaisijan ja sen päälle tulevan eristeen yhteenlaskettu mitta.



**Kuva 16 Jakokammion puoleisen päädyn pyörähdyskappale**

Runkolaipat ja tuubilevy erotettiin toisistaan muutaman mm:n leveällä tiivistevälillä, koska varsinaiseen kokoonpanoon ei ollut tarvetta mallintaa tiivisteitä. Tuubivaipanpuoleinen runkolaippa sijoitettiin vasemmasta kyljestään kiinni y-akseliin. Tämä valinta perustuu siihen, että tulevissa mitoituksissa haluttiin määrittellä etäisyyksiä y-akseliin nähden. Piirtämisen aikana osien mitat määriteltiin aiemmin mainittujen standardien ja spesifikaatioiden mukaan.

Lämmönsiirtimen rungon piirtämisen jälkeen sketsistä alettiin muokata erillisiä Part-tiedostoja eli osatiedostoja. Uuteen osatiedostoon tuotiin *Derive*-komennon (kuva 17) avulla luurangon puolella aiemmin luotu pintamallinen pyörähdyskappale. Tämän jälkeen pintamallista tehtiin kiinteä malli *Thicken*-komennon avulla. Tuubivaipan osatiedostoon liitettiin myös nimikyltin sketsi, joka pursotettiin ulospäin vaipan keskustaan nähden.

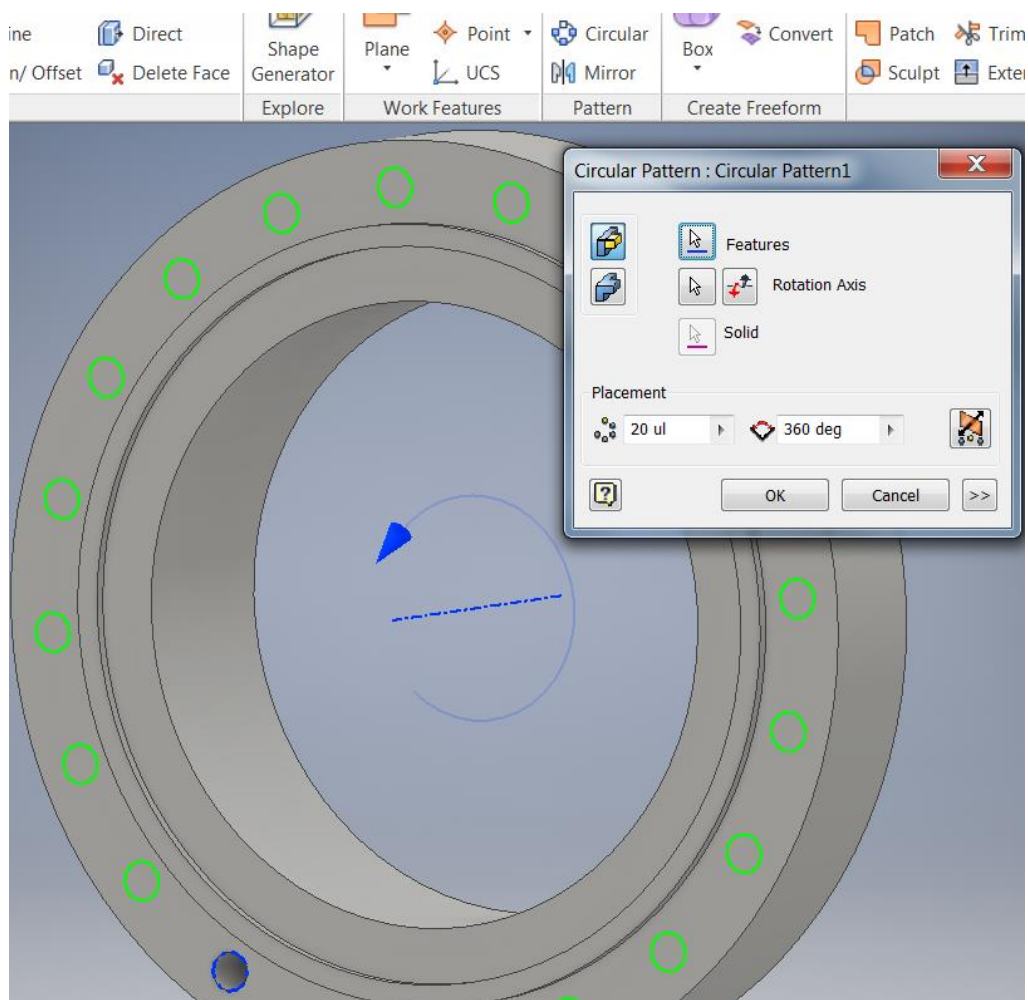


Kuva 17. *Derive*-komennon ikkuna. Pintamallit sijoittuvat kansiorakenteessa *Surface Bodies* -kansion alle.

Jokaisen runko-osan kohdalla seinämän paksuunnus toteutettiin kohti niiden keskustaa, koska luurankomallin puolella päädyt, jakokammio ja tuubivaippa oli jo mitoitettu ulkohalkaisijan perusteella. Kiinteiden mallien seinämänpaksuuteen ei vielä tässä vaiheessa tarvinnut kiinnittää huomiota, koska niitä muutettaisiin myöhemmin parametrisointivaiheessa. Runkolaipoista ja tuubilevyistä tehtiin myös omat osatiedostonsa samaisella *Derive*-komennolla, mutta pintamallien sijasta niistä saatiin kiinteät mallit niiden sketsiääriivivojen kautta. Kun esimerkiksi tuubilevyn sketsi oli tuotu näkyviin osatiedostossa, siitä tehtiin *Revolve*-komennolla kiinteä malli.

Runkolaippoihin oli vielä solidimalliksi muuttamisen jälkeen tehtävä ruuvireiät. Ohje-  
nuorana oli, että laitteen symmetria-akseleiden tulee puolittaa pulttiliitosten pulttinreikien välinen kannas. Pulttireiät mallinnettiin kiertämään runkolaippojen ulointa kehää. Reiät toteutettiin piirtämällä runkolaipan keskustasta viiva, jonka päähän piirrettiin vielä ympyrä. Tästä ympyrästä tehtiin *Hole*-komennon avulla reikä. Jotta reikä ei menisi um-

peen runkolaipan leveyden vaihdellessa, se lukittiin pysymään runkolaipan sivujen vä-  
lillä. *Circular Pattern* -komennolla (kuva 18) reikä saatiin kopioitua runkolaipan kehän-  
mukaisesti, kun komentoikkunassa määritettiin ensin kopioitava piirre, akseli jota reiät  
kiertävät, haluttu reikien lukumäärä ja pyörähdyksen kulma, joka tässä tapauksessa oli  
360°.



**Kuva 18** *Circular Pattern* -ominaisuus

Luurankomallista johdettuun tuubilevyn solidimalliin ei tehty tuubireikiä erillisen tuubi  
layout -osan takia, mutta tiivisteura kuitenkin mallinnettiin. Se mitoitettiin seuraamaan  
runkolaippojen mittamuutoksia, minkä lisäksi jakokammioon sijoittuvat jakolevyt oli  
huomioitava tiivisteuran sketsaamisessa. Jakolevyt sijoittuvat vaaka- ja pystytasossa  
lämmönsiirtimen keskilinjalle, joten jakolevyjen osalta tiivisteurat seurasivat niiden pak-  
suus- ja leveysmuutoksia.

### 3.1.1 Yhteiden ja laippojen mallinnus

Kun lämmönsiirtimen runko oli piirretty valmiiksi, siirryttiin siihen kiinnitettävien yhteiden mallintamiseen (kuva 19). Yhteille tarvittiin vähintään seuraavat parametrit:

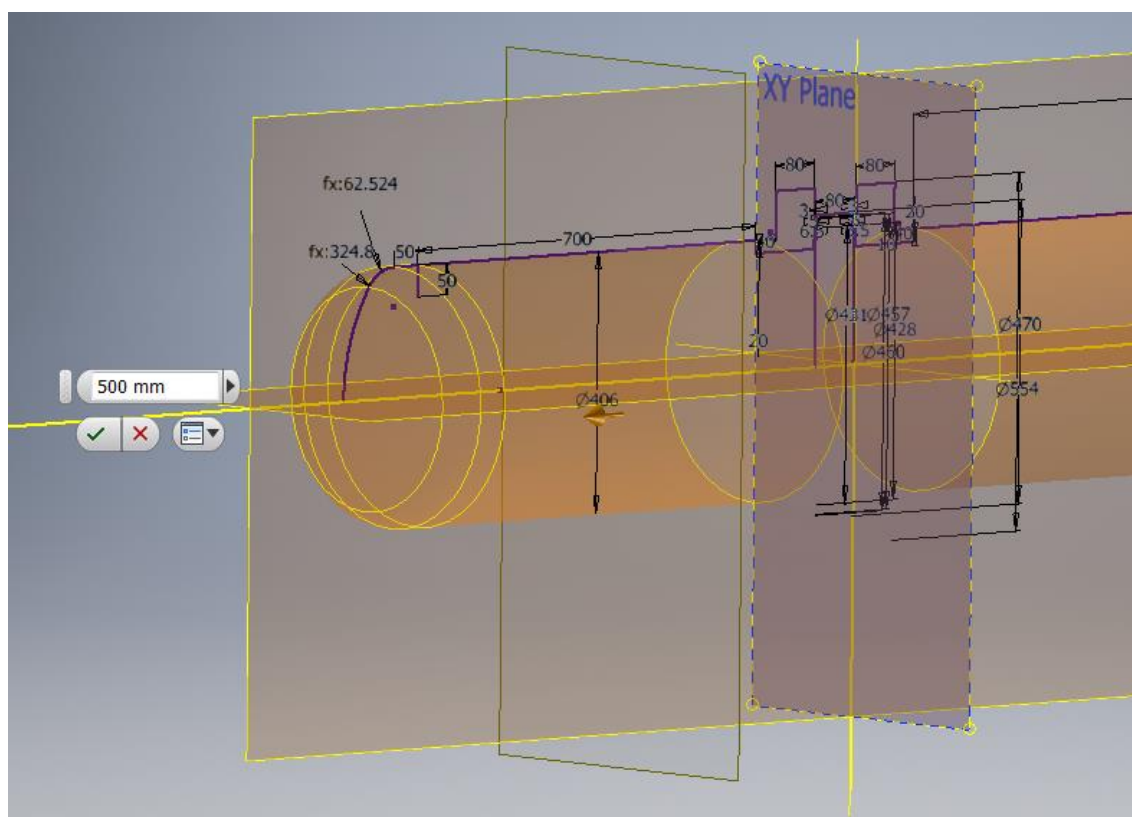
- pituussuuntainen liikuttaminen
- sivusuuntainen liikuttaminen
- kierto lämmönsiirtimen keskiakselin ympäri
- L-mitta lämmönsiirtimen keskilinjalta yhteen tiivistepintaan.



**Kuva 19: Esimerkki lämmönsiirtimissä käytettävistä yhteistä. Kuvassa [15] yhteet on liitetty putkiston avulla muun prosessin osaksi.**

Putkilämmönsiirtimen runkoon kiinnittyy neljä yhdettä: tuubisarjan virtaus kulkee kahden jakokammioon kiinnittyvän yhteen kautta, ja vaippapuolen virtaus samaten kahden tuubivaippaan kiinnittyvän yhteen kautta. Yhteet voivat asemoitua lämmönsiirtimen kylkeen vaihtelevissa kulmissa ja sijainneissa riippuen siitä, kuinka lämmönsiirrin sijoituu muuhun prosessilaitteistoon nähden, ja millaista prosessia varten lämmönsiirintä tarvitaan. Koska yhteitä haluttiin liikutella lopullisessa kokoonpanotiedostossa mahdollisimman vapaasti, mallinnettiin jokainen yhteeseen liittyvä laippa omaksi sketsikseen erillisille aputasoille. Vapaan liikuteltavuuden saavuttamiseksi yhtä sketsiä varten tarvittiin peräti kolme aputasoa: Ensin YZ-tasoon kiinnitettiin kulman suhteen hallittava aputaso, ja sen jälkeen samaan aputasoon kiinnitettiin vielä toinen etäisyyden perusteella hallittava *Offset*-aputaso. Lopuksi tälle aputasolle mallinnettu yhdelaippa sidottiin keski-

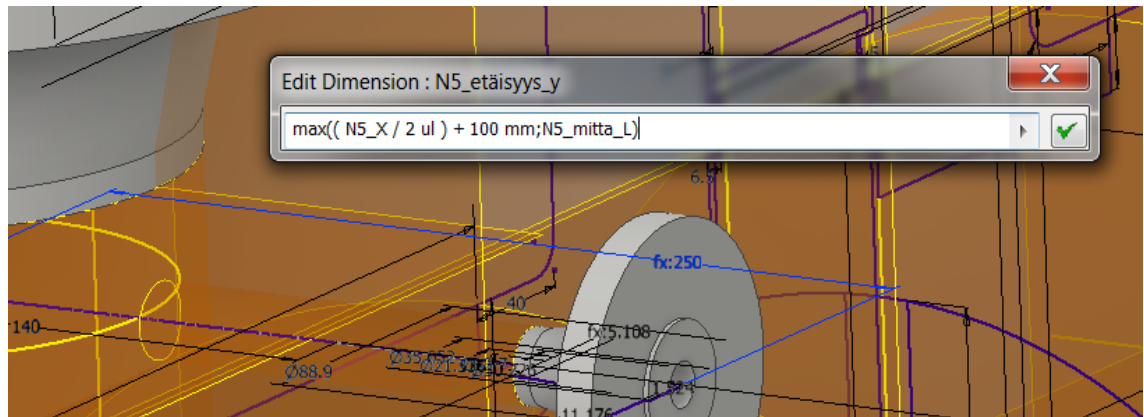
linjastaan vielä XY-tasosta vedettävään aputasoon (kuva 20), jonka avulla säädeltiin yhteen keskilinjän etäisyyttä XY-tasoon nähden.



Kuva 20 XY-tasosta vedetty Offset-aputaso

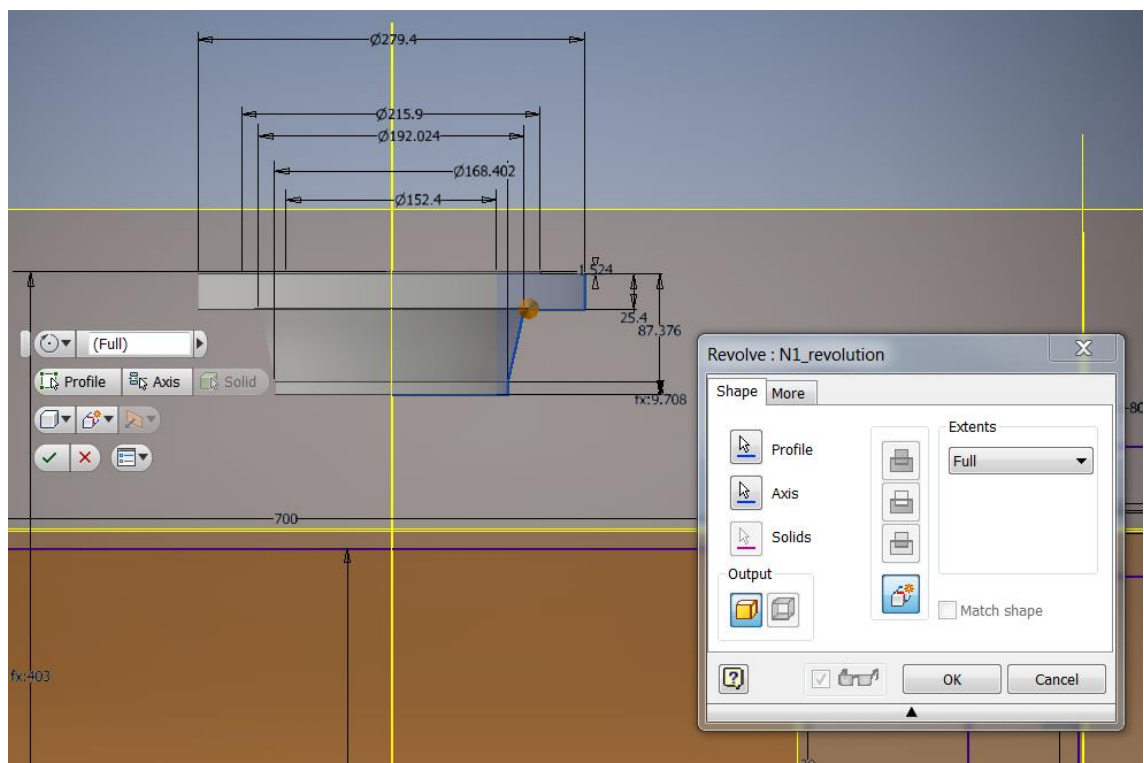
Lämmönsiirrin yhdistetään muun prosessin osaksi yhdelaippojen avulla, sillä ne pultataan kiinni prosessoitavaa ainetta ja lämmönsiirtimeen väliainetta kuljettaviin putkistoihin. Yhdelaippojen mitoitus vaihtelee halutun paineluokan ja tuumakoon mukaan. Koska kehitysprojekti haluttiin pitää selkeästi rajattuna ja välttää tässä vaiheessa ylimääräistä työtä, valittiin yhdelaippojen mitoitus 150#-paineluokan mukaan. Lisäksi rajattiin, että yhteen noudattavat vain ASME B16.5:n määrittämiä mitoituksia korotettujen tiivistepintojen kauluslaipoille. Laippojen sijainti lämmönsiirtimeen vaaka-akseliin nähden tehtiin max-funktiota hyödyntäen (kuva 21). Minimietäisyydeksi lämmönsiirtimeen vaaka-akselista määritettiin eräs laipan halkaisijamitoista + 100 mm. Näin ollen laippa pysyi vähintään tällä etäisyydellä vaaka-akselista, vaikka Mitta "L" olisikin sitä lyhyempi. Mitta "L" merkitsi tässä yhteydessä etäisyyttä yhdelaipan tiivistepinnasta lämmönsiirtimeen vaaka-akseliin. Mitta "L":stä luotiin jokaiselle yhteelle oma käyttäjäparametrinsa, jolle annettiin haluttu mitta. Funktiolla taattiin, ettei lämmönsiirtimeen rungon tuumakokoa kasvatettaessa yhdelaippa jää vahingossa edes osittain rungon sisäpuolelle.





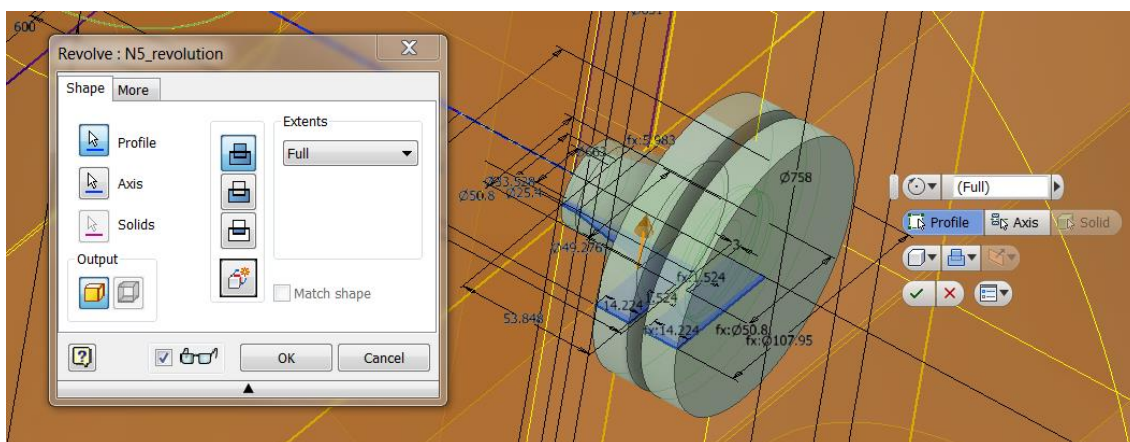
Kuva 21 Yhdelaippojen mitoituksessa käytetty max-funktio. N5\_X on eräs yhdelaipan sisähalkaisijamitoista.

Kun kaikkien pääyhteiden laippasketsit oli piirretty, niistä muodostettiin *Revolve*-ominaisuuden avulla pyörähdyskappaleet (kuva 22). Tämä tehtiin jo luurankomallin sisällä siksi, että niiden tarjoamasta tiivistepinnasta voitiin määrittää aputasot pääyhteisiin liittyville pienemmille ilmausyhteille. Lisäksi tällä menettelyllä varmistettiin, että niistä saatiin tehtyä pintamallit yhdeputkille, jotka mukailivat vaipan muotoja.



Kuva 22 Erään pääyhteen pyörähdyskappale

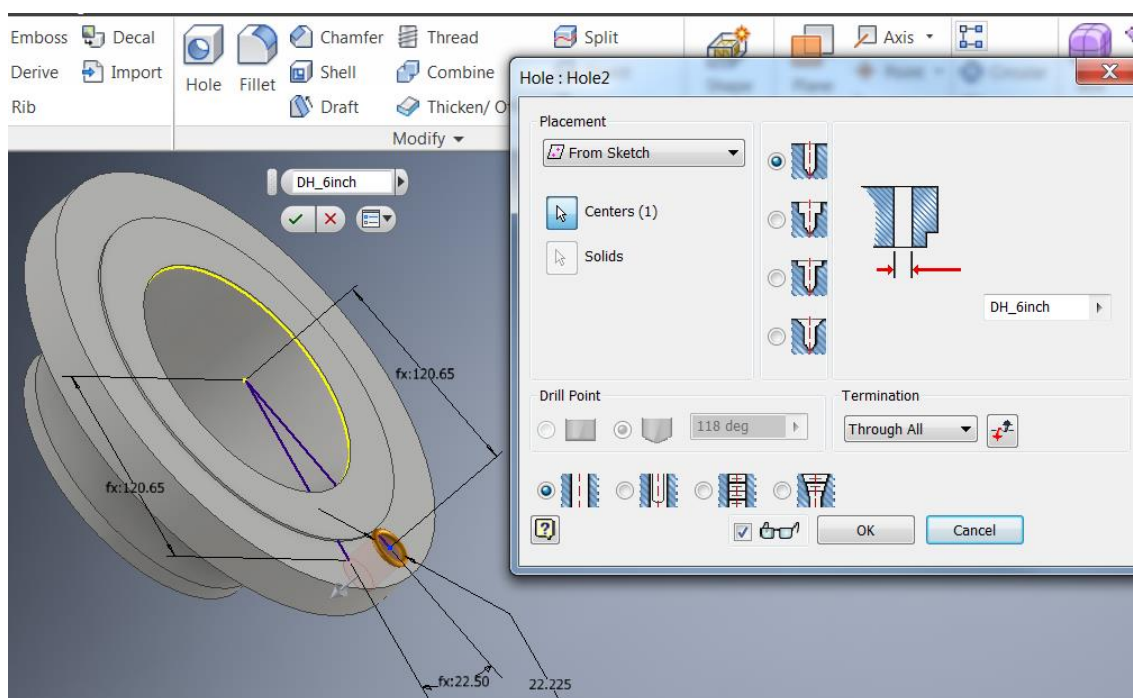
Ilmausyhteiden laipat mitoitettiin samalla periaatteella kuin pääyhteetkin. Aputasojen kautta ilmausyhteiden korkeutta rungon keskiakseliin nähden pystyttiin säätämään helposti samalla logiikalla kuin pääyhteiden sijaintia y-akseliin nähden. Jotta ilmausyhteitä kyettiin liikuttamaan myös pääyhteiden ympäri, lisättiin sketseihin kulmamitta apuviivaa hyödyntäen. Näin ilmausyhteet saatiin haluttuun kulmaan ilman aputason lisäämistä, ja varsinainen luurankomalli saatiin pidettyä hieman siistimpänä. Ilmausyhteiden päihin piirrettiin vielä umpinaiset sokealaipat. Laippojen välille jätettiin runkolaippojen ja tuubilevyn tapaan kolmen mm:n tiivistevali. Tämän jälkeen sketseistä tehtiin päälaippoja mukaillen pyörähdyskappaleet luurankomallin puolella (kuva 23).



**Kuva 23** Ilmausyhteen pyörähdyskappale

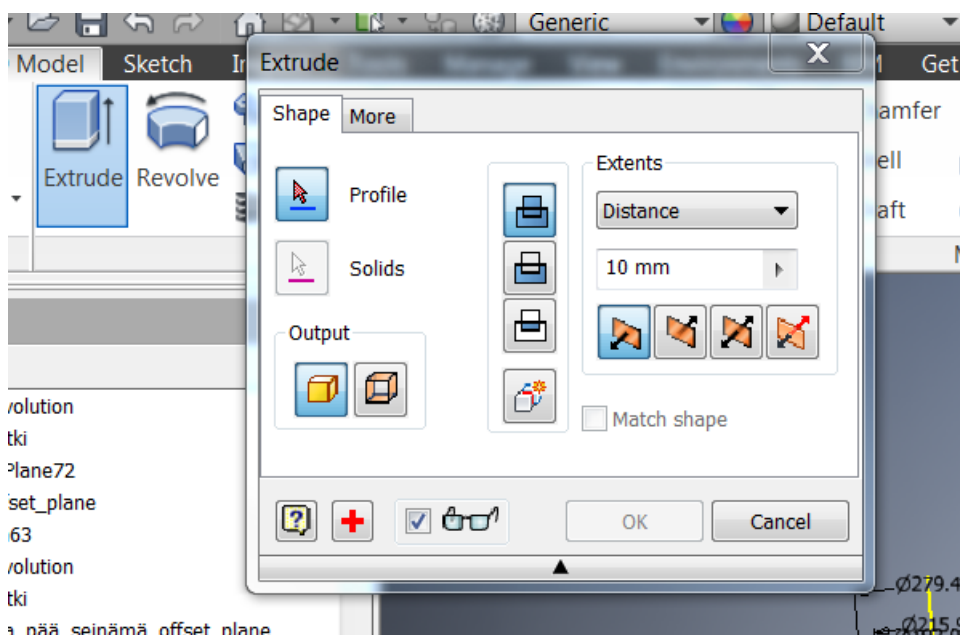
Jokaisesta laipasta luotiin oma osatiedostonsa. Sketseistä johdettiin kiinteät pyörähdyskappaleet, joihin lisättiin runkolaippojen tapaan vielä ruuvireiät aiemmin kuvaillulla metodilla (kuva 24).





Kuva 24 Yhdelaipan pyörähdyskappale sekä ruuvisijainti. Tummansinisillä ääriviivoilla erottuu reikäsketsi, josta reikä johdettiin.

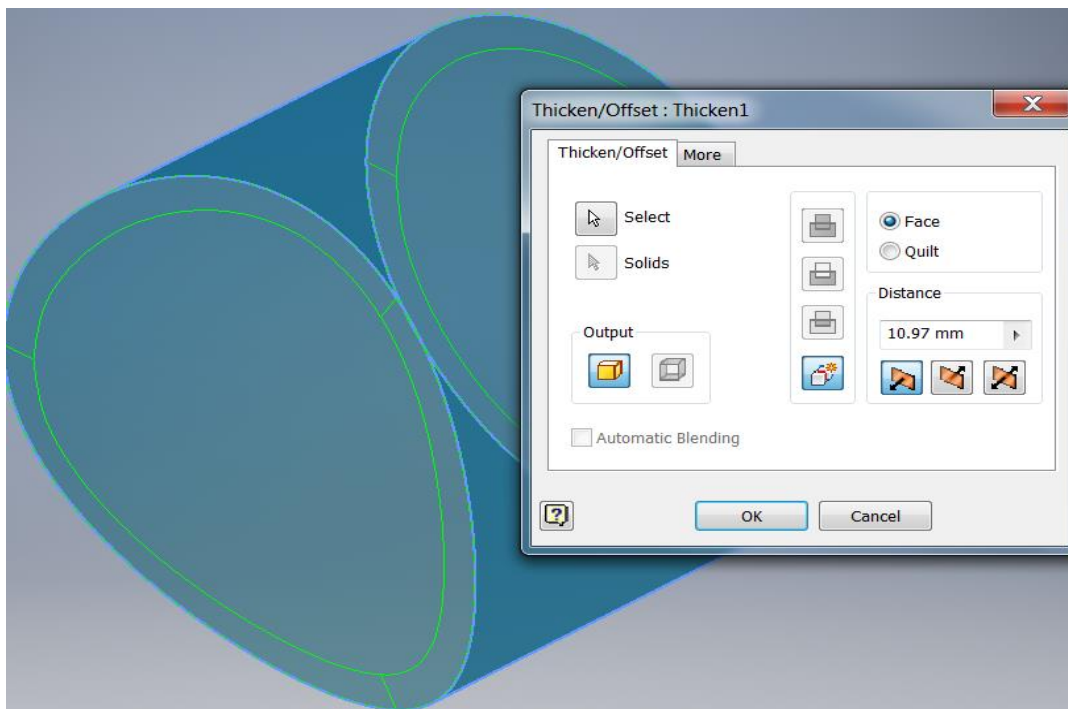
Laippojen mallintamista seurasi ne lämmönsiirtimen runkoon yhdistävien putkien luominen. Putket tehtiin tässä vaiheessa mallinnustyötä ns. pintamalleina *Extrude*-ominaisuudella (kuva 25), jotta luurankomallin puolella olisi selvemmin nähtävissä putkien sijainti. Lisäksi pintamalleista johdettiin myöhemmin putkien osatiedostot. Extrude-ominaisuudessa pystyi valitsemaan halutun pursotuksen suunnan ja sen, pursotetaan-ko esimerkiksi annetun etäisyyden tai kahden pinnan välisen etäisyyden perusteella. Tässä tapauksessa haluttiin, että putki pysyy automaattisesti yhdelaipan alaosan ja lämmönsiirtimen rungon välissä, vaikka niiden välistä etäisyyttä muutettaisiinkin.



Kuva 25 Extrude-valikko

Osatiedostojen puolella yhdeputkien pintamalleista johdettiin kiinteät versiot. Tämän saavuttamiseksi käytettiin *Thicken*-komentoa (kuva 26), jota oli käytetty jo aiemmin päätyjen ja vaippojen osatiedostoissa. Myös yhdeputkien seinämät vahvistettiin kohti niiden keskiakselia, sillä putkien halkaisija noudatti laippojen alaosien ulkohalkaisijaa.

Kun kaikki yhdetiedostot oli saatu onnistuneesti luotua, niistä tehtiin pääyhdekohtaiset alikokoonpanot, jotta kokoonpanopuolen tiedostopuu pysyi selkeämmän näköisenä.



Kuva 26 Yhdeputken seinämänvahvistus *Thicken*-komennolla

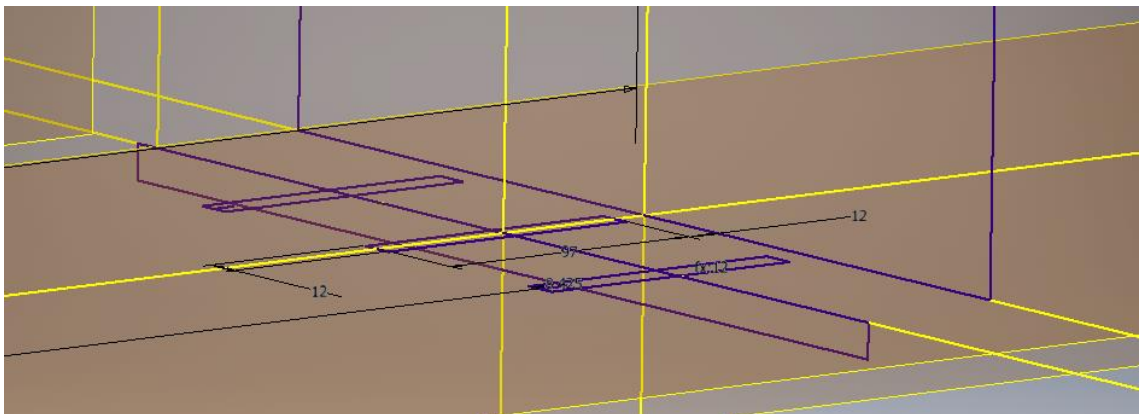
### 3.1.2 Lämmönsiirtimen jalustojen mallinnus

Lämmönsiirtimen jalustojen mitoituksen suhteen noudatettiin Nesteen omia spesifikaatioita. Lähtökohtana oli, että yhtä jalustaa kohden piirrettiin kolme sketsiä, jotka yhdessä muodostivat jalustan eri osat. Suunnittelun lähtökohtana oli, että kumpaakin jalustaa voitaisiin liikuttaa niin samanaikaisesti kuin erikseenkin. Lisähaasteita toi vielä se, että myös jalustan sisällä piti olla mahdollisuus vaikuttaa jokaiseen jalustan muodostavan osan mitoitukseen, koska lämmönsiirtimen koko määrittelee myös niiden paksuuksia sekä leveyksiä. Jalusta ei myöskään saanut jäädä vaipan sisään, kun lämmönsiirtimen halkaisijaa kasvatettiin.

Jalustojen mallinnus aloitettiin lähempänä runkolaippoja sijaitsevasta jalustasta. YZ-tasosta vedettiin ensin aputaso, jolle piirrettiin jalustan satulaosa ja pohjalevy. Tämä aputaso muodosti myös kiinteän pään jalustan vertikaalisen keskilinan. Satulasketsissä oli huomioitava, että sen yläpinta mitoitettiin kiinni tuubivaippaan. Tämä onnistui siten, että satulan yläkaari mitoitettiin funktion avulla pysymään tuubivaipan säteen etäisyydellä lämmönsiirtimen vaaka-akselista.

Ensimmäisenä luodusta aputasosta vedettiin toinen aputaso hieman erilleen runkolaip-  
pojen suuntaan, johon mallinnettiin jalustan vahvikeseinämä. Myös vahvikeseinämän  
yläosan oli myötäiltävä satulan linjoja. Tämä saavutettiin käyttämällä satulan etäisyyttä  
määrittävää funktiota, ja lisäämällä tämän antamaan etäisyyteen vielä satulan pak-  
suusmitta. Näin seinämä saatiin pysymään jatkuvasti kiinni satulassa, vaikka satulan  
etäisyys lämmönsiirtimen vaaka-akseliin nähden muuttuisikin.

Kolmas kiinteän pään jalustaa varten tarvittu aputaso vedettiin ylhäältä XZ-tasosta poh-  
jalevysketsin yläpintaan. Taso sidottiin kiinni pohjalevysketsiin (kuva 27), minkä jälkeen  
tasopintaan piirrettiin uusi sketsi jäykistinseinämille. Jäykistinseinämät asettuvat jalus-  
tassa pohjalevyn ja satulan väliin. Riippuen lämmönsiirtimen halkaisijasta, niitä on Nes-  
teen spesifikaation mukaan oltava joko yksi tai kolme kappaletta. Koska näiden seinä-  
mien lukumäärää pystyttiin jatkossa iLogic-funktioilla säätämään, piirrettiin jäykistinsei-  
nämäsketsiin kaikki kolme jäykistintä.

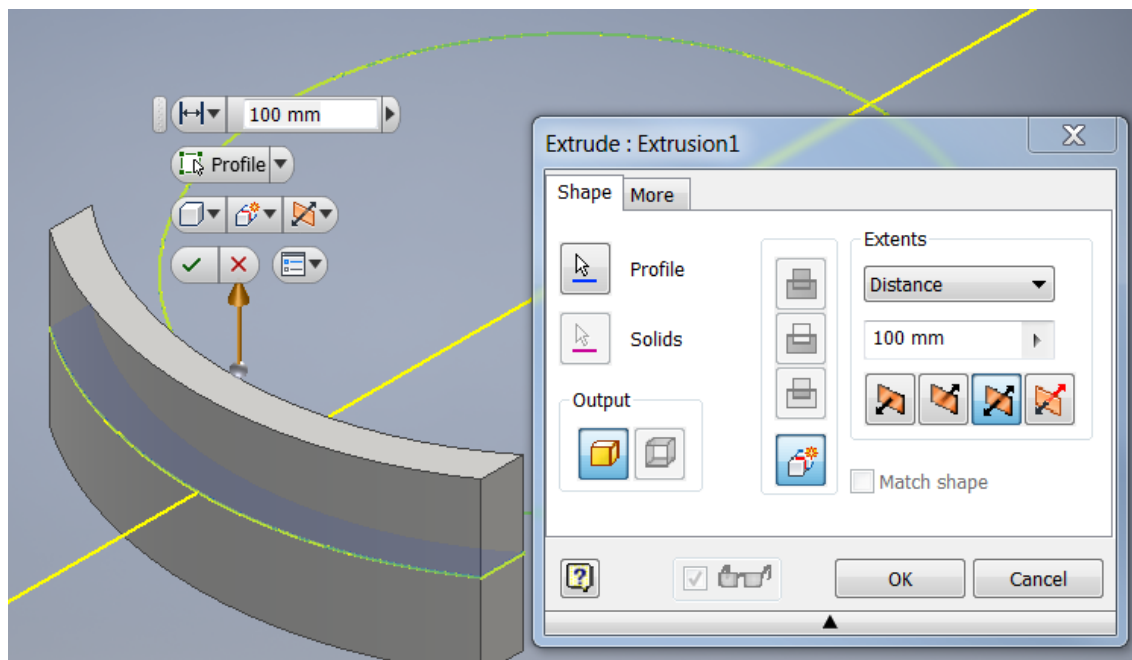


**Kuva 27** Pohjalevy- ja seinämäsketsit sidottiin kiinni *Project Geometry*-ominaisuuden avulla jäykis-  
tinseinämiä varten luotuun aputasoon, joka näkyy kuvassa tummempana alueena.

Taaempi jalusta mallinnettiin muuten samalla idealla, mutta sen vahvikeseinämä tuli  
spesifikaatioiden määräämänä jalustan keskilinjan vastakkaiselle puolelle. Jalustojen  
keskilinjojen välille laitettiin etäisyysmitta, jotta niiden keskinäisen välimatkan säätely  
onnistuisi.

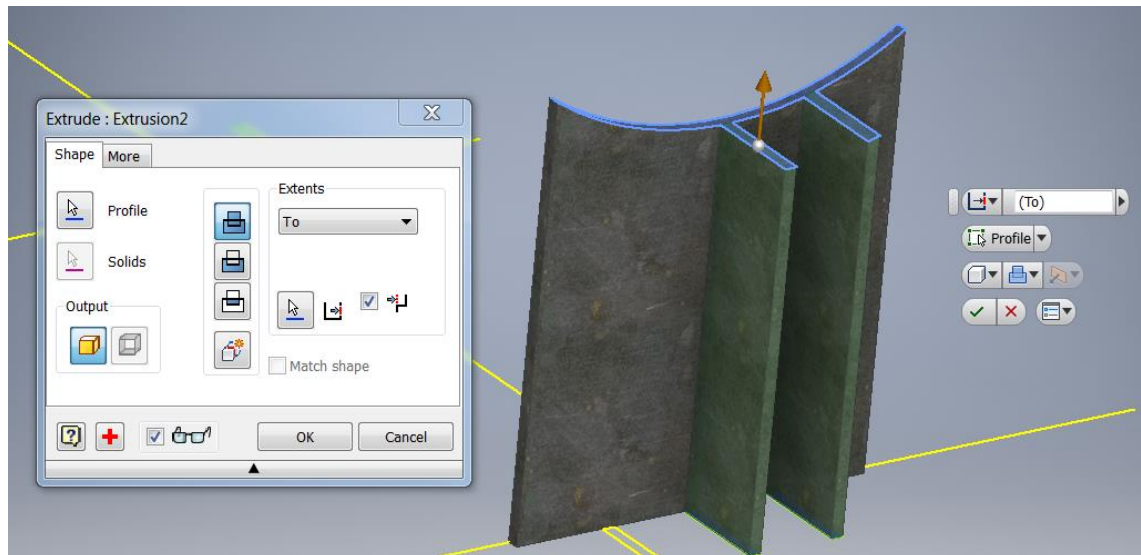
Kaikki jalustasketsien osatiedostot muodostettiin *Extrude*-komennolla. Satula- ja pohja-  
levysketsien pursotus suoritettiin siten, että niiden pituutta kasvatettiin lämmönsiirtimen  
vaaka-akselin mukaisesti symmetrisesti molempiin suuntiin (kuva 28). Pohjalevyihin  
piirrettiin osatiedostojen puolella reiät kiinnityspulteille. Reikäketseihin sisällytettiin

mahdollisuus sille, että kummankin pohjalevyn kiinnitys toteutettaisiin liukuvana, eli kiinnityspulteilla olisi hieman liikkumavaraa lämmönsiirtimen vaaka-akselin suuntaisesti. Tämäntapaisella rei'ityksellä otetaan huomioon lämmönsiirtimessä prosessin aikana tapahtuva lämpölaajeneminen.



**Kuva 28** Satulasketsien pursotus toteutettiin symmetrisesti molemminpuolisesti

Vahvike- ja jäykistinseinämien kiinteät mallit tehtiin poikkeuksellisesti samaan osatiedostoon jalustakohtaisesti, koska tämä helpotti mallinnustyötä ja halutun lopputuloksen saavuttamista. Vahvikeseinämien pursotus tapahtui kohti jalustojen keskilinjoihin. Jäykistinseinämät pursotettiin vahvistinseinämän yläosaan asti (kuva 29), minkä jälkeen ne pitivät sen kanssa saman korkeuden ja kaarevuuden.



**Kuva 29** Jäykistinseinämät noudattivat pursotuksen jälkeen vahvikeseinämän korkeutta ja kaarevuutta.

Pursotettuihin vahvikeseinämiin sketsattiin maadoituskorvakkeet jäykistinseinämien puoleisille sivustoille. Maadoituskorvakkeiden kautta lämmönsiirtimestä voidaan johtaa mahdolliset vaaralliset virtapiikit turvallisesti toisaalle.

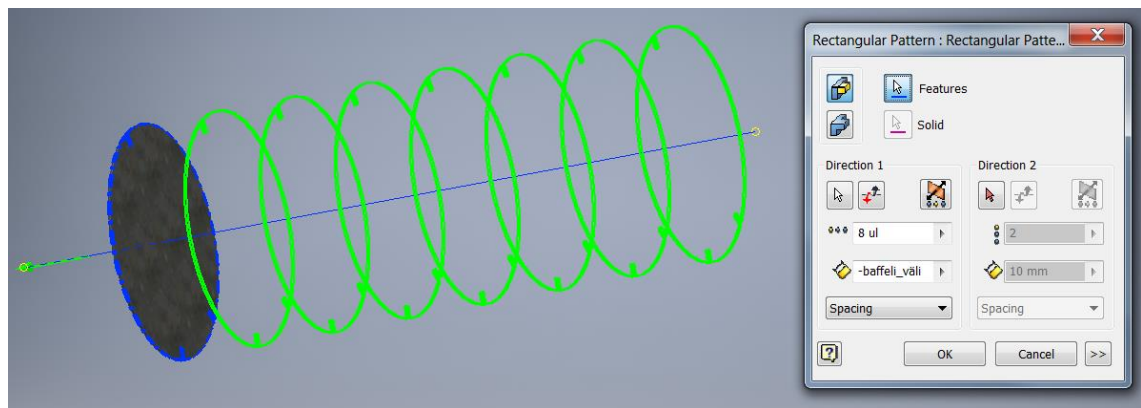
### 3.1.3 Putkiryhmän tukilevyt sekä liuku- ja nostotangot

Lämmönsiirtimen rungon ja ulkopuolelle näkyvien osien piirtämisen jälkeen siirryttiin sisäosaan tulevien osien mallintamiseen. Tukilevyt sijoittuvat lämmönsiirtimessä ns. tuubipuolelle eli jakokammion vastakkaisen vaipan sisustaan. Tukilevyillä on kaksi tärkeää tehtävää. Niiden on tuettava ja pidettävä koossa tuubipuolella kulkevaa U-putkiryhmää. Lisäksi ne reitittävät vaipan sisustassa eli U-putkiryhmän ympärillä kulkevan nesteen virtausta joko horisontaalisessa tai vertikaalisessa suunnassa sisääntuloyhteeltä ulostuloyhteelle. Päämittakuvaan ei ollut tarvetta mallintaa tarkemmin näkyviin tukilevyjen määrittämää virtausreittiä, joten tukilevyistä jätettiin pois osakokoonpanokuvaan piirrettävät horisontaali- tai vertikaalisuuntaiset leikkaukset.

Tukilevyjen mallintaminen aloitettiin vetämällä aputaso tuubilevyn pinnasta jalustojen suuntaisesti. Tälle aputasolle piirrettiin ensimmäinen tukilevy. Tukilevyn säde rajattiin pienemmäksi kuin lämmönsiirtimen rungon ja sen kuoren paksuuden muodostama erotus. Lisäksi tukilevyihin tehtiin urat nosto- ja liukutangoille, joita pitkin tukilevyihin liitetty U-putkiryhmä liu'utetaan lämmönsiirtimen vaipan sisälle. Tukilevyjen alaosaan

tulevien liikutankojen urien välille mitoitettiin säädettävä kulma, koska esimerkiksi tuubipuolelle liittyvien yhteiden koko ja sijainti määrittää myös liikutankojen sijainnin. Liu-ku- ja nostotangoille tehty sketsi noudatti mitoitukseltaan tukilevyn vastaavaa. Sketsi piirrettiin tuubilevyn laitaan kiinnitettyyn aputasoon, koska liuku- ja nostotangot tulevat tuubilevyyn kiinni.

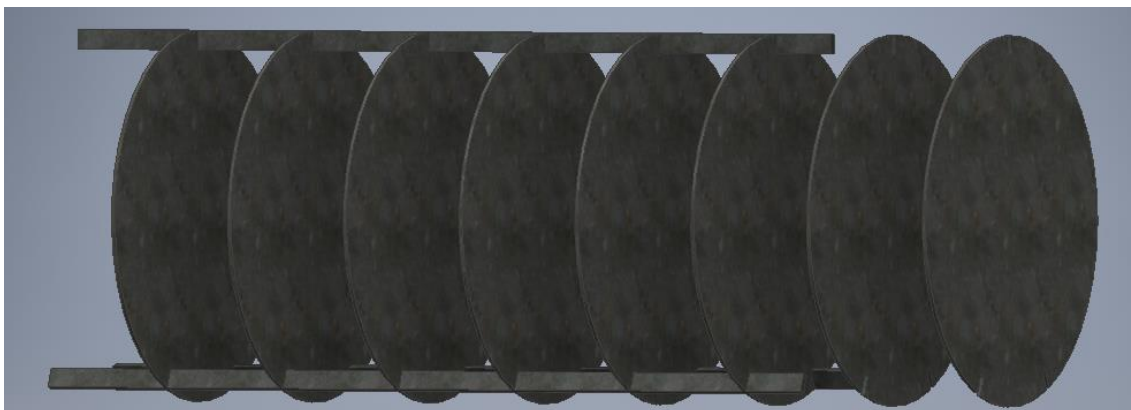
Tukilevy- ja tankosketsit johdettiin kiinteiksi malleiksi saman osatiedoston alla. Tukilevysketsistä pursotus tehtiin kohti tuubivaipan päätä. Pursotuksen jälkeen tämä kiinteä malli kopioitiin *Rectangular Pattern* -komennolla (kuva 30) jatkamaan lämmönsiirtimeen vaaka-akselin mukaisesti. Tällä tavalla tukilevyille saatiin määriteltyä tasaiset välit. Samaisen komennon sisällä oli mahdollista muuttaa kopioitavien tukilevyjen määrää sekä niiden välistä etäisyyttä.



Kuva 30 Tukilevyjen kopiointi tapahtui *Rectangular Pattern* -komennolla.

Nosto- ja liikutangot pursotettiin kopioitujen tukilevyjen tapaan lämmönsiirtimeen vaaka-akselin suuntaisesti (kuva 31). Niiden pituus jätettiin vapaasti säädeltäväksi.





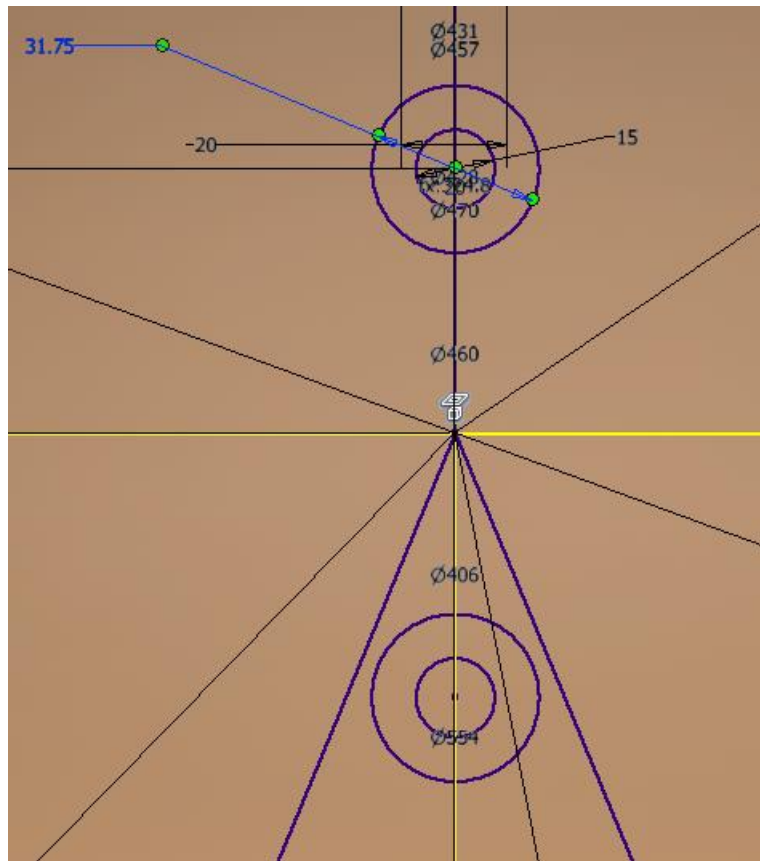
Kuva 31. Näkymä vahvikelevyistä sekä nosto- ja liukutangoista

### 3.1.4 Uloin U-putki ja tuubilayout

Parametrisen mallin edistyessä todettiin, että jos malliin lisättäisiin vielä kaikki tuubilevyn reiät ja mahdollisuus vaihdella U-putkien lukumäärää sekä ryhmitystä, tulisi siitä mahdollisesti jo liian raskas käyttäjäkokemuksen sujuvuuden kannalta. Lukemattomien eri putkiryhmävaihtoehtojen prosessointi veisi Inventorilta enemmän aikaa ja vaatisi myös enemmän laskentatehoa. Tästä syystä kokoonpanotiedostossa näkyvään tuubilevyyn päätettiin tulevassa osatiedoston luomisvaiheessa mallintaa vain tiivisteurat ja uloimman U-putken reiät, ja tehdä vielä uusi erillinen tiedostonsa, jossa tuubilayoutiin pääsisi vaikuttamaan tarkasti ja ilman pelkoa siitä, että Inventor ei jaksaisi suorittaa tarvittavia muutoksia riittävän tehokkaasti.

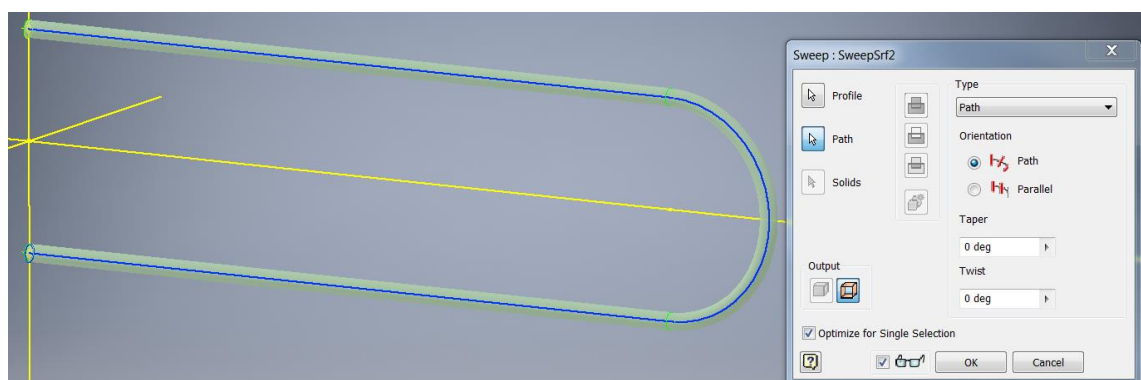
Uloimman U-putken mallintamista varten luotiin tuubisijoittelua varten uusi sketsi (kuva 32), johon piirrettiin tuubireiät ja niiden sisälle tuubihalkaisijaa ilmaisevat ympyrät tuubilevyn ylä- ja alaosaan y-akselille. Alaosaan tulevat ympyrät peilattiin *Mirror*-komennolla XZ-tason kautta. Tämän jälkeen ylempien ympyröiden keskipisteestä aloittaen piirrettiin YZ-tasolle U-kirjaimen muotoinen sketsi, joka päätettiin alempien ympyröiden keskipisteeseen. Näiden kahden eri sketsielementin avulla pystyttiin tämän jälkeen mallintamaan päämittakuvassa tarvittava uloin U-putki.





Kuva 32 Näkymä tuubisijoittelusketsistä. Sisemmät ympyrät kuvastavat putkihalkaisijaa ja uloisimmat ympyrät putkireikien halkaisijaa.

Kun sketsielementit oli tuotu osatiedostoon, muodostettiin U-putki pintamallina Sweep-komennolla (kuva 33). Putken profiiliksi valittiin tuubisijoittelusketsiin piirretyt sisemmät ympyrät, ja putken reitiksi otettiin U-kirjaimen muotoon tehty sketsi. Näiden valintojen jälkeen muodostettiin pintamallina lämmönsiirtimen uloin U-putki.

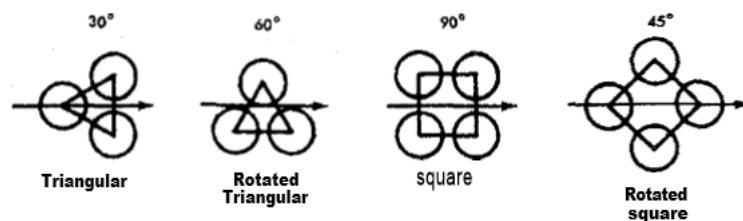


Kuva 33 Sweep-komennolla toteutettu U-putken pintamalli

Tarkkaa tuubilayoutia varten mallinnettiin siis vielä oma erillinen osatiedostonsa tuubilevylle. Tuubilevyn muuteltaviksi ominaisuuksiksi määriteltiin:

- putkiston asettelu ja kulma
- virtaussuunta
- uloin tuubiraja (OTL)
- putkiväli
- vahvikelevyjen leikkuuraja
- nostotangon dimensiot
- liukutankojen dimensiot ja kulmat
- mahdollisen törmäyslevyn dimensiot ja sijainti
- tiivistyslattojen asettelu, lukumäärä ja dimensiot
- ensimmäisen tukilevyn etäisyys tuubilevystä sekä tuubilevyn ja vaipan väliin jäävä etäisyys
- putkirivien lukumäärät horisontaali- ja vertikaalisuunnassa
- sidetankojen lukumäärä, sijainti ja halkaisija.

Lisäksi tuubilevyn ulkohalkaisijan paksuuden sekä vaipan paksuuden piti olla määriteltävissä, jotta saatiin tarkka ja riittävä kuva tuubiasettelusta (kuva 34).



**Kuva 34: TEMA RCB-standardin mukaiset putkiston kulma-asettelut [16, s.28.]**

### 3.1.5 Jakolevyjen mallinnus

Jakokammion sisälle sijoittuvat jakolevyt (pass partition plates) nimensä mukaisesti jakavat jakokammion eri osastoihin. Prosessista riippuen levyjä voi olla määrällisesti yhdestä useampaan. U-putkiin kulkeva virtaus ohjautuu niiden kautta.

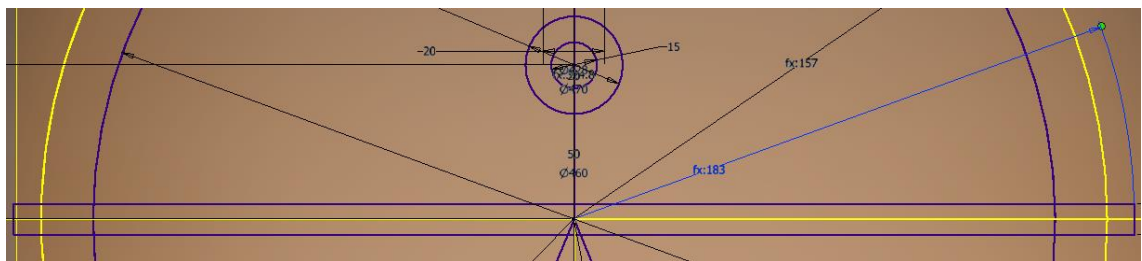
Jakolevyjen mallinnuksen suunnittelun lähtökohtana oli, että tämän kehitysprojektin puitteissa luotiin vaihtoehdot kaksi- ja nelikanavaiselle jakokammionlelle. Ensimmäisenä piirrettiin XZ-tason suunnassa jakokammion halkaiseva jakolevy. Suunnittelussa oli

otettava huomioon myös se, että jakolevyn ja sitä ympäröivien seinämien väliin ei jää tyhjää tilaa, vaan se noudattaa leveytensä puolesta tarkasti sitä ympäröivien seinämien rajoja. Jakolevyyn tarvittavat sketsit toteutettiin kolmessa osassa, koska jakokammionpuoleinen runkolaippa, jakokammion vaippa ja pääty saattavat olla halkaisijaltaan erikokoisia. Jakolevyn ensimmäinen osa piirrettiin XY-tasosta vedettyyn aputasoon, jonka etäisyydeksi määritettiin kaavalla 12:

$$\begin{aligned} \text{etäisyys} = & \text{tuubilevyn leveys} + \text{vaippapuolen tiivisteväli} \\ & - \text{tuubilevyn tiivisteuran leveys} \end{aligned} \quad (12)$$

Tuubilevystä lähtevä osa mallinnettiin vain säteensä suhteen, koska sketsin toinen puoli peilattiin YZ-tason toiselle puolelle. Sketsiä varten otettava aputaso vedettiin myös XY-tasosta ja sen etäisyyteen lisättiin kaava 1:n mittojen lisäksi runkolaipan paksuusmitta. Leveydeksi tuli puolikas rungon ulkohalkaisijasta, ja tästä vähennettiin vielä runkolaipan seinämän paksuus (kuva 35). Jakolevyn paksuus pidettiin samana koko jakokammion pituudelta.

Jakokammion vaippaosuudella kulkevalle jakolevyn osuudelle riitti leveydeksi ulkohalkaisijan leveys, josta vähennettiin vielä vaipan seinämän paksuus. Tämän sketsin XY-tasosta vedetyn aputason etäisyyteen lisättiin vielä jakokammion vaipan pituusmitta. Leveys jakokammion päätyyn loppuvalle osuudelle jakolevystä määrittyi siten, että rungon ulkohalkaisijasta vähennettiin päädyn seinämänpaksuus.

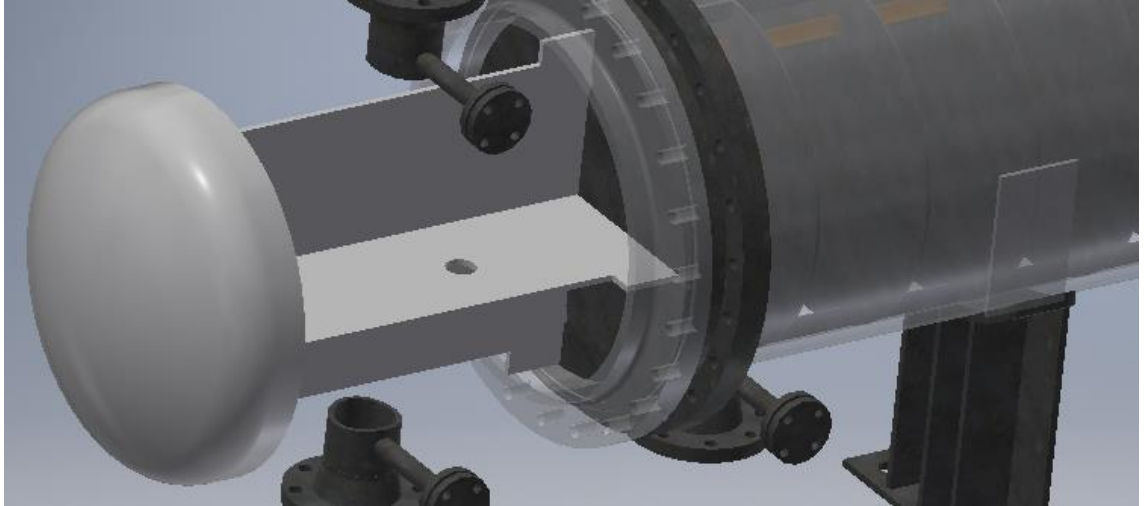


**Kuva 35** Vaakatasossa piirretyn jakolevysketsin runkolaipanpuoleinen osa. Jakolevyn säde korostettu sinisellä.

Nelikanavaista jakokammiota varten tehtiin täysin samanlaiset sketsit aiemmin luoduille aputasoille, mutta sketsit asetoitiin vertikaalisesti XY-tason suuntaisesti.

Jakolevyjen osatiedostossa vaaka- ja pystysuuntaiset sketsit pursotettiin toisiinsa kiinni. Jakolevyt sijoitettiin jakokammion päätykappaleelle luotuun osatiedostoon, jotta le-

vyt myötäilisivät pursotuksen jälkeen tarkasti päädyn sisäseinämiä (kuva 36). Vaakata-sossa sijaitsevaan jakolevyn pintaan piirrettiin kolme ympyrää, joista muodostettiin *Ho-le*-komennolla reiät. Reikien funktio on toimia valutusreikinä, jos lämmönsiirrin halutaan tyhjentää esimerkiksi huoltotöiden ajaksi.



Kuva 36 Jakolevyt näkyvät kuvassa vaaleanharmaana runkolaipan ja päädyn välissä.

### 3.2 Osakokoonpanot

Ennen kokoonpanomallin kokoamista yhteiden ja putkien sekä jalustojen osatiedostoista luotiin vielä osakokoonpanot, jotta kokoonpanomallin rakennepuu ei paisuisi liian laajaksi. Lämmönsiirrin-komponentit tuotiin osa kerrallaan uusiin osatiedostoihin, joissa ne yhdistettiin toisiinsa *Ground and Root* -komennolla. Omiin osakokoonpanoihinsa koottiin jokainen pääyhde sekä niihin liittyvät ilmausyhteet. Tällä tavalla muodostettiin neljä osakokoonpanoa, jotka nimettiin niiden sisältämien yhteiden mukaan. Jalustoja varten tehtiin kaksi osakokoonpanoa. Yhteen osakokoonpanoon tuotiin jalustakohtaisesti satula, vahvikeseinäjä, jäykistinseinämät ja pohjalevy.

### 3.3 Kokoonpanomalli

#### 3.3.1 Kokoonpanon kokoaminen

Kokoonpanomallin kasaaminen tehtiin samalla logiikalla kuin osakokoonpanojen vastaava. Uuteen kokoonpanotiedostoon tuotiin kaikki parametriseen malliin liittyvä osatiedosto tai -kokoonpano kerrallaan. Kun osat oli tuotu onnistuneesti kokoonpanotiedostoon, alkoi parametriseen malliin liittyen työläin osuus, eli *iLogic*-skriptien, -funktioiden ja komentolomakkeen tekeminen.

Inventorin *iLogic*-ominaisuus mahdollistaa kokoonpanotiedoston muokkaamisen lomakepohjaisen käyttöliittymän avulla. *iLogicissa* käytettävä ohjelmointikieli on *VB Code*. Lomakepohjaan voi lisätä numeraalinsyöttökenttiä, joiden arvoja muuttamalla niihin linkitetty parametri, esimerkiksi osatiedostosta löytyvä mitta, vaihtaa pituuttaan. Pelkkien arvojen muuttamisen lisäksi *iLogicissa* voidaan käyttää mm. myös *True/False*-komentoja ja *If*-lausekkeita, jolloin vaikkapa yhtä parametria arvoa muuttamalla myös toisissa siihen linkitetyissä parametreissa tapahtuu muutoksia. Yksinkertaisimmillaan *iLogic*-komennot ovat koodissa 1 esitetyn komennon mukaisia:

```
Parameter("kokoonpanon osa", "parametri") = "pääkokoonpanoon luotu parametri" (1)
```

Tässä koodinpätkässä sulkujen sisällä olevat tekstit määrittävät sen, mistä osatiedoston parametrissa on kyse. Yhtäsuuruusmerkin jälkeinen parametri on luotu kokoonpanotiedoston puolella. Koodin avulla kokoonpanopuolen parametrin arvoa muuttamalla myös siihen linkitetty osatiedoston parametri saa saman arvon.

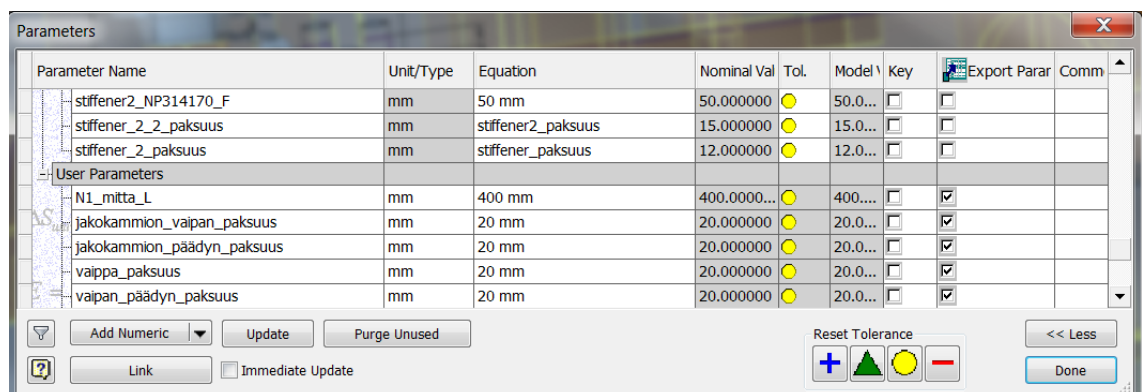
#### 3.3.2 *iLogic*-funktiot ja skriptit

Inventorin komentolomake tarvitsee toimiakseen taustalleen erilaisia skriptejä ja funktioita. Kokoonpanomallia varten piti luoda ensin luurankomallin puolella satoja eri parametrejä, minkä jälkeen kokoonpanotiedostossa oli näille parametreille vielä luotava oma vastaava parametrinsa, jos niitä haluttiin hallita lomakkeen kautta. Kun luurankomallin puolella luotiin uusi mitoitus tai aputaso, sille muodostui automaattisesti oma nimeämätön parametrinsa. Näille parametreille annettiin lähes kaikille oma nimi, joka kertoi joko niiden sijainnin tai funktion. Tarkan nimeämisen avulla parametrit oli myöhemmin helppo identifioida, kun niiden hallintaan oli aika vaikuttaa komentolomakkeen

kautta. Automaattisesti syntyvien parametrien lisäksi Inventorissa on mahdollisuus luoda myös käyttäjäparametreja. Nämä ovat käytännöllisiä, jos esimerkiksi funktioihin haluaa sisällyttää sen toiminnan kannalta oleellisia arvoja, joita halutaan muuttaa lomakkeen kautta.

Kokoonpanomallin parametrien luonti toteutettiin pääsääntöisesti samassa järjestyksessä kuin luurankomallien sketsien luominen. Kokoonpanoparametrit pyrittiin nimeämään samoin kuin luurankomallin parametrit, jotta niitä olisi myöhemminkin helppo hallita. Inventor ei kuitenkaan anna nimetä täysin samannimisiä parametreja, joten kokoonpanopuolen parametrit aloitettiin yleensä isolla kirjaimella, kun taas luurankomallin parametrit kirjoitettiin kokonaan pienillä kirjaimilla. Muutoin sisarparametrit pidettiin samannimisinä selkeyden takia.

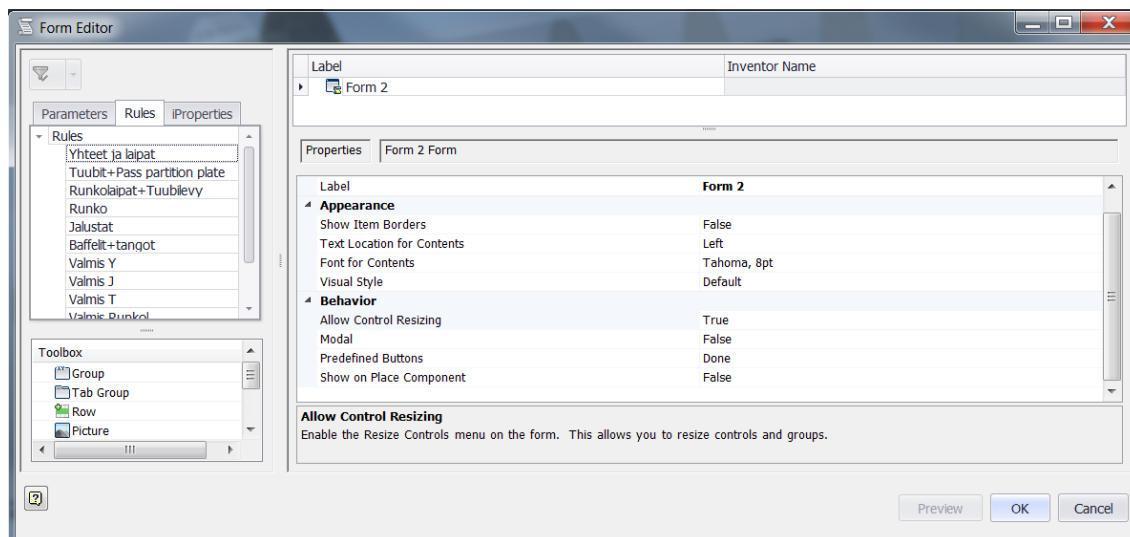
Kun luurankomallin puolelta oli päätetty parametri, piti kokoonpanomallissa valita *Manage*-välilehdeltä *Parameters*-valikko (kuva 37). Tästä valikosta löytyi mahdollisuus lisätä parametreja joko numeerisessa tai tekstimuodossa. Numeerisille parametreille oli mahdollista vielä tämän jälkeen valita oma sopiva yksikkönsä riippuen siitä, oliko kyseessä esimerkiksi kulmaa, pituutta tai määrää merkitsevä parametri. Parametrin mallin luonnissa riitti, kun käytettiin edellä mainittuja yksiköitä. Kun luurankoparametria vastaava kokoonpanoparametri oli tehty valmiiksi, se piti vielä lisätä lomakkeeseen.



Kuva 37 Esimerkki parametri-ikkunan näkymästä

Lomakkeen luontia varten *Manage*-välilehdeltä piti klikata *iLogic Browser* -valikkoa. Tämän jälkeen kokoonpanotiedostoon avautui *iLogic*-komentoikkuna, jonka pystyi liittämään näkyviin kokoonpanorakenteen alapuolelle, jolloin se pysyi koko ajan näkyvisä näytön alalaidassa.

Lomake-editorin sisällä oli seuraavaksi paikallistettava Parameters-välilehdeltä äskettäin luotu kokoonpanoparametri, jonka jälkeen se raahattiin Label-tunnuksen alla olevaan lomakkeeseen (kuva 38). Näin parametri tuotiin onnistuneesti lomakkeeseen käsiteltäväksi.

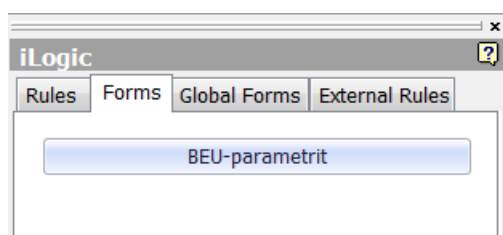


**Kuva 38** Näkymä *iLogic*-lomake-editorista. Lomakkeeseen lisättävät parametrit sijaitsivat *Parameters*-välilehdellä, josta ne raahattiin *Label*-tunnuksen alle.

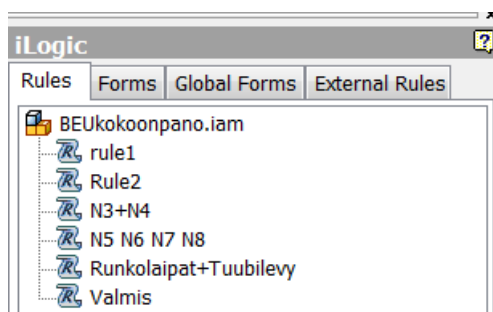
Uusi lomake (kuva 39) perustettiin klikkaamalla komentoikkunassa hiiren oikealla korvalla *Forms*-välilehteä, jonka jälkeen klikattiin *Add form* -vaihtoehtoa.

Luotu parametri ei vielä tällaisenaan kuitenkaan riittänyt, koska sitä ei ollut vielä linkitetty ohjaamaan luurankomallissa sijaitsevaa sisarparametriaan. Jotta lomakkeessa näkyvään valikkoon voitiin syöttää esimerkiksi eri pituusmittoja, piti sitä varten luoda oma parametrikohtaisensa skripti.

Skriptien tekemistä varten *iLogic*-komentoikkunassa piti mennä *Rules*-välilehdelle, ja klikata siellä jälleen hiiren oikeaa korvaa (kuva 40). Avautuvista vaihtoehdoista valittiin *Add Rule*. Uusi *Rule* eli sääntö nimettiin sen mukaan, minkä osakokonaisuuden skriptejä sen alle lisättiin.



Kuva 39 Lomakevälilehti



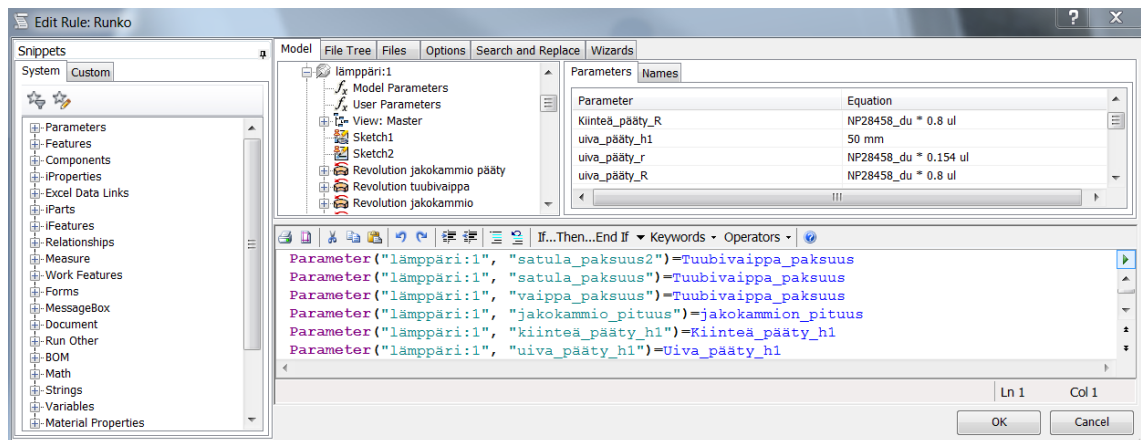
Kuva 40 Sääntövälilehti

Sääntöeditorin (kuva 41) sisällä piti tämän jälkeen lähteä rakentamaan skriptiä, jonka avulla lomakkeeseen lisätty parametri lähtisi toimimaan. Sääntöihin lisättävät skriptit rakentuvat funktioista ja parametreista. Yksinkertaisimmillaan skriptit koostuivat luurankomallin ja kokoonpanomallin parametreista. Tällaisen skriptin rakentamiseksi oli ensin etsittävä tarvittu luurankoparametri. Jotta luurankomallin parametrit oli mahdollista löytää sääntöeditorin kautta, piti kokoonpanomalliin lisätä *Place Component* -komennolla myös luurankomallin osatiedosto. Kun tiedosto oli lisätty, sen näkyvyys asetettiin pois kokoonpanopuusta käsin ruksaamalla pois *Visibility*-kohta. Näin luurankomallin kaikki parametrit olivat käytettävissä lomaketta varten.

Seuraavaksi haettavat parametrit paikallistettiin sääntöeditorissa *Model*-välilehdessä näkyvästä kokoonpanopuusta. Puusta etsittiin luurankomallintiedosto, jonka jälkeen siitä klikattiin nähtäville sen sisältämät malli- tai käyttäjäparametrit, jotka avautuivat näkyviin sääntöeditorin oikealle laidalle. Tämän jälkeen parametrilistasta valittiin tuplaklikkaamalla haluttu kohde, jonka jälkeen se ilmestyi funktiomuodossa editorikenttään. Viimeisessä vaiheessa tämä parametri piti enää linkittää kokoonpanomallissa luodun sisarparametrinsa kanssa. Tämä onnistui siten, että luurangosta haetun parametrin ja kokoonpanomallista haetun parametrin välille lisättiin yhtäsuuruusmerkki, jon-

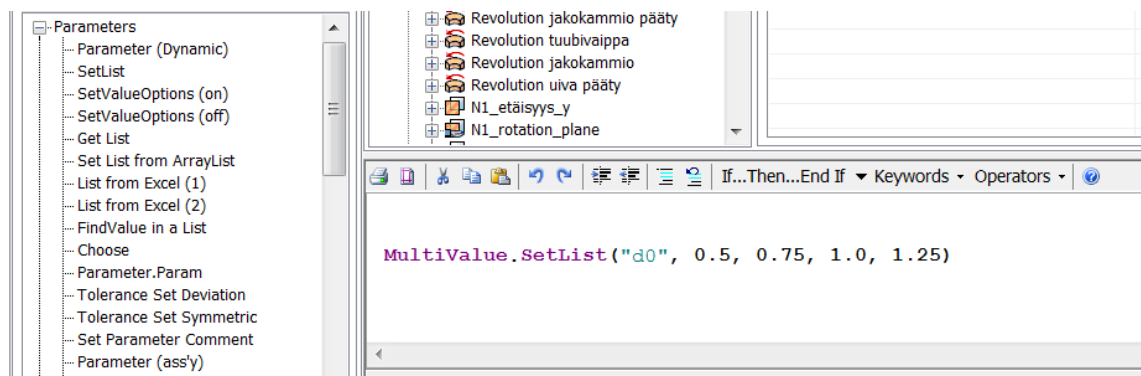


ka jälkeen parametrien linkitys oli valmis. Nyt lomakkeesta oli mahdollisuus vaihtaa keskenään linkitettyjen parametrien arvo.



Kuva 41 Sääntöeditori. Tekstikentässä näkyvillä vasemmalla puolella luurankoparametreja ja oikealla puolella kokoonpanoparametreja.

Ajoittain lomakkeen käytössä tuli tarve alasvetovalikoille. Tätä ominaisuutta tarvittiin esimerkiksi tilanteissa, jossa lomakkeessa näkyvän kentän arvoa muuttamalla haluttiin vaikuttaa useamman luurankomallin parametrin toimintaan. Näissä tilanteissa sääntöeditorista valittiin käytettäväksi *Setlist*-parametri (kuva 42). Tämän parametrin avulla oli mahdollista antaa kokoonpanoparametrille useita numeerisia tai tekstipohjaisia arvoja.

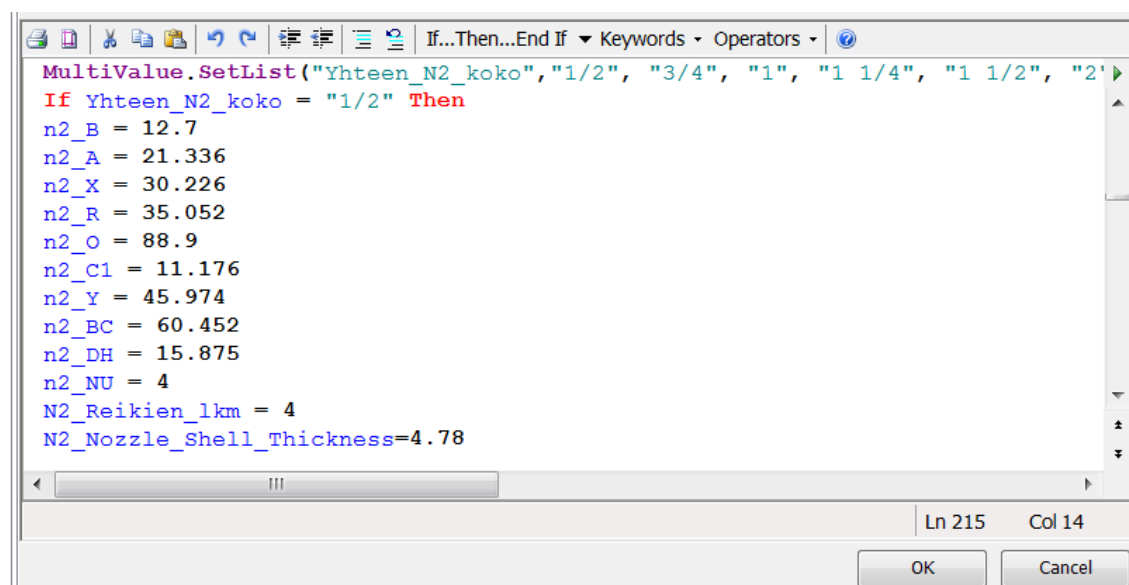


Kuva 42 *Setlist*-parametri. Vihreällä näkyvään osuuteen lisättiin kokoonpanoparametri ja tämän jälkeen mustalla värjättyihin arvoihin syötettiin joko numeerisia tai tekstipohjaisia arvoja.

Parametrisessa mallissa *Setlist*-parametreja sekä alasvetovalikkoja hyödynnettiin mm. runkolaippojen, yhdelaippojen ja jalustojen käsittelyssä. Lomakkeen käytön nopeuttamiseksi esimerkiksi runkolaippojen haluttiin käyttäytyvän siten, että valikosta pystyi määrittämään runkolaippojen koon, jolloin yhdellä valinnalla kaikki runkolaippojen sekä

sitä mukana seuraavan rungon halkaisijan dimensiot muuttuisivat. Käytännöllisin työkalu tämän saavuttamiseen oli *If*-funktio.

*If*-funktiossa (kuva 43) kokoonpanoparametrille asetetaan ehto, jonka täytyessä myös muut siihen linkittyvät kokoonpanoparametrit vaihtavat arvoa. Usein tämän ehdon valinta toteutettiin *Setlist*-parametrin pohjalta, joka oli ennen *If*-funktioita luotava kokoonpanoparametrille. Kun *Setlist*-parametriin oli syötetty tarvittavat arvot, voitiin *If*-funktioita lähteä rakentamaan. Kun kokoonpanoparametrille oli asetettu ehto, kirjoitettiin perään *Then*. Sen jatkoksi lisättiin kaikki ne itse luodut kokoonpanoparametrit, joiden haluttiin muuttavan arvoaan, jos ehtolause toteutuu. Näiden kokoonpanoparametrien perään lisättiin yhtäsuuruusmerkin jälkeen se arvo, minkä halutaan toteutuvan ehdon täytyessä. *If*-funktioita oli mahdollista jatkaa siten, että ennen uuden ehdon kirjoittamista tämän lauseen eteen lisättiin *Else If*. Tämän jälkeen haluttuja ehtoja lisättiin samalla tavalla, kunnes niitä oli käyttäjän mielestä riittävä määrä. *If*-funktio lopetettiin kirjoittamalla komentosarjan perään *End If*. Kaikissa funktioiden käytössä oli muistettava, että jokainen funktiossa käytettävä kokoonpanoparametri oli toimiakseen linkitetty myös johonkin luurankomallin parametriin.



```

MultiValue.SetList("Yhteen_N2_koko", "1/2", "3/4", "1", "1 1/4", "1 1/2", "2")
If Yhteen_N2_koko = "1/2" Then
n2_B = 12.7
n2_A = 21.336
n2_X = 30.226
n2_R = 35.052
n2_O = 88.9
n2_C1 = 11.176
n2_Y = 45.974
n2_BC = 60.452
n2_DH = 15.875
n2_NU = 4
N2_Reikien_lkm = 4
N2_Nozzle_Shell_Thickness=4.78

```

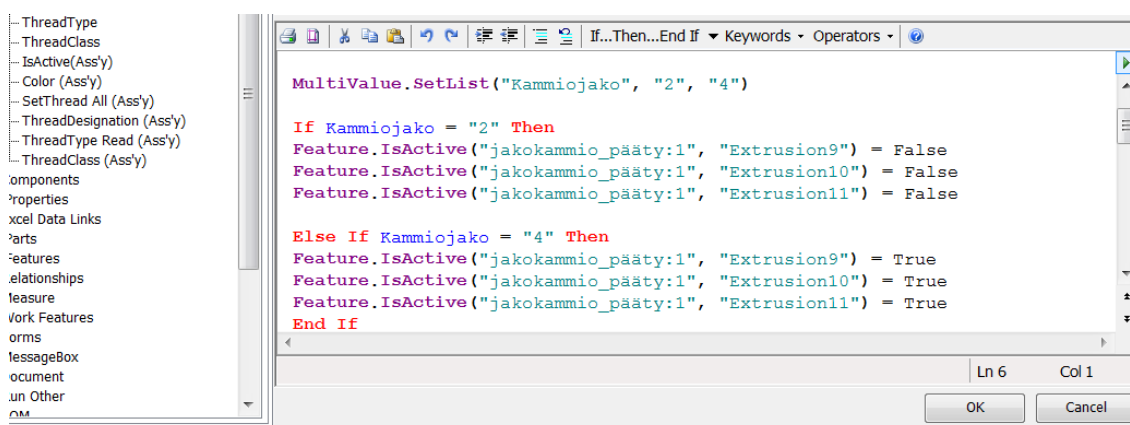
Ln 215 Col 14

OK Cancel

Kuva 43 *If* -funktio

*If*-funktioita käytettiin runkolaippojen lisäksi myös mm. yhdelaippojen ja jalustojen mittojen muuttamiseen, eli kaikkiin sellaisiin kohteisiin, joissa mitat määräytyivät standardien tai spesifikaatioiden määrittämien listojen mukaan.

*Setlist*-parametrien pohjalta toteutettiin myös tilanteet, joissa jonkin lämmönsiirrin-komponentin kappalemäärään haluttiin vaikuttaa valikoiden kautta. Yksi tällainen tapaus oli jakokammion kanavaisuuden hallinta. Tämän hallintaa varten luotiin *Setlist*-parametri, johon vaihtoehtoiksi lisättiin kaksi- tai nelikanavaisuus (2, 4). Sääntöeditorin *Featureseista* valittiin *IsActive*-parametri (kuva 44). Kun tähän parametriin lisättiin hallittavan ominaisuuden sijainti osatiedostosta ja perään lisättiin yhtäsuuruusmerkin jälkeen *True/False*, pysyi jakokammion vertikaalinen jakolevy joko piilossa tai tuli näkyviin ehdosta riippuen.



```

MultiValue.SetList("Kammiojako", "2", "4")

If Kammiójako = "2" Then
Feature.IsActive("jakokammio_pääty:1", "Extrusion9") = False
Feature.IsActive("jakokammio_pääty:1", "Extrusion10") = False
Feature.IsActive("jakokammio_pääty:1", "Extrusion11") = False

Else If Kammiójako = "4" Then
Feature.IsActive("jakokammio_pääty:1", "Extrusion9") = True
Feature.IsActive("jakokammio_pääty:1", "Extrusion10") = True
Feature.IsActive("jakokammio_pääty:1", "Extrusion11") = True
End If

```

Kuva 44 *IsActive*-parametrin käyttöä *If*-funktion tukemana

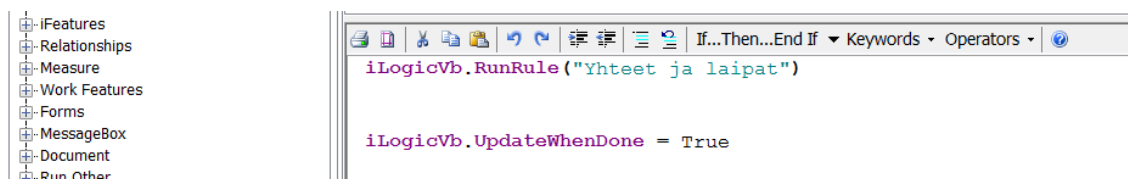
### 3.3.3 Lomakkeen käyttö ja muokkaus

Muutokset kokoonpanomalliin suoritettiin *iLogic*-lomakkeen kautta. Lomakkeen ulkoasua oli mahdollista muokata ja järjestää esimerkiksi siten, että tietyt lämmönsiirtimen osat jaettiin omiin segmentteihinsä, jolloin lomake oli loppukäyttäjää ajatellen selkeämpi.

Lomake päätettiin jakaa kuuteen eri osioon, jotka olivat

- runko
- yhteen ja laipat
- runkolaipat ja tuubilevy
- jalustat
- tukilevyt ja tangot
- tuubit ja jakolevyt.

Jokaiseen segmenttiin lisättiin oma Valmis-nappinsa, sillä jos lomakkeessa olisi ajettu kaikki muutokset läpi yhdellä komennolla, olisi Inventorin käyttämä laskenta-aika venynyt käyttökokemuksen sujuvuuden kannalta liian pitkäksi. Valmis-nappeja varten piti tehdä jokaiselle segmentille oma erillinen sääntönsä, ja ne nimettiin segmentin alkukirjaimen mukaan. Sääntöihin tuli ainoastaan kaksi skriptiä, joiden tehtävä oli ajaa sääntö läpi sekä päivittää kokoonpanomallin kuva, kun Inventor on laskenut muutokset (kuva 45).



**Kuva 45** Kuvassa näkyvä ylempi skripti ajoi läpi Yhteet ja laipat-segmentin säännön, ja alempi skripti päivitti kokoonpanon, kun sääntö oli ajettu onnistuneesti läpi.

Lomake-editorissa oli mahdollista lisätä myös rivejä, joten jokaiselle riville jätettiin aina kaksi osiota, jotta lomaketta ei tarvitsisi selata liikaa arvoja antaessaan. Runkoon liittyvien parametrien muutokset tehtiin manuaalisesti syöttämällä parametrin viereiseen kenttään arvo, minkä jälkeen klikattiin Valmis-nappia. Koska Yhteet ja laipat -osiossa (kuva 46) oli paljon parametreja, ne järjestettiin vielä omille välilehdilleen yhderyhmäkohtaisesti. Loput segmentit toteutettiin samantapaisesti.

Yhteet ja laipat	
N1 ja N5 Laippamitat	
f <sub>x</sub> Yhteen N1 tuumakoko	Yhteen_N1_koko
f <sub>x</sub> N1 Etäisyys y-akselista	N1_Etäisyys_y
f <sub>x</sub> N1 Offset	N1_Offset_plane
f <sub>x</sub> N1 Orientation	N1_Orientation
f <sub>x</sub> N1 Mitta L	N1_Mitta_L
f <sub>x</sub> Ilmausyhteen N5 tuumakoko	Yhteen_N5_koko
f <sub>x</sub> Ilmausyhteen N5 Offset	N5_Offset
f <sub>x</sub> Ilmausyhteen N5 Orientation	N5_Kulma
f <sub>x</sub> Ilmausyhteen N5 Mitta L	N5_Mitta_L
N2 ja N6 Laippamitat	
N3 ja N7 Laippamitat	
N4 ja N8 Laippamitat	
Valmis	Valmis Y

**Kuva 46** Lomake-editorin näkymä Yhteet ja laipat -osion asettelusta

Lomake-editorissa pystyi myös nimeämään parametreja uusiksi siten, että varsinaisessa lomakenäkymässä näkyvä parametriteksti poikkesi alkuperäisestä. Lisäksi tekstin sijaintia ja fonttia pystyi vaihtamaan, ja tekstipohjaisen arvonsyöttökentän saattoi vaih-

taa myös *slider*-pohjaiseksi. Lomakkeessa oletuksena olevan *Done*-napin sai myös piilotettua asetuksista pois.

Lomakkeen (kuva 47) käyttö oli varsin helppoa. Käyttäjän tuli segmentti kerrallaan valita mieleisensä arvot alaspöytävalikoista tai syöttää ne suoraan tekstikenttiin. Lomakeparametrit oli nimetty selkeästi ja joissain tapauksissa niihin oli liitetty vielä Nesteen spesifikaation dokumenttinumero ja kirjainkoodi, jotta käyttäjä varmasti tiesi mitä lämmönsiirtimeen arvoa oli muuttamassa. Kun käyttäjä oli mielestään lisännyt segmenttiin kaikki uudet arvot, piti vain painaa *Valmis*-nappia, minkä jälkeen Inventor pienen miettimisen jälkeen päivitti muutokset kokoonpanomalliin. Jos käyttäjän ei enää tarvinnut tehdä muutoksia johonkin segmenttiin, pystyi niiden sisällön piilottamaan ylälaidasta. Näin lomaketta sai supistettua samalla pienempään tilaan.

**Kuva 47 Osanäkymä valmiista lomakkeesta**

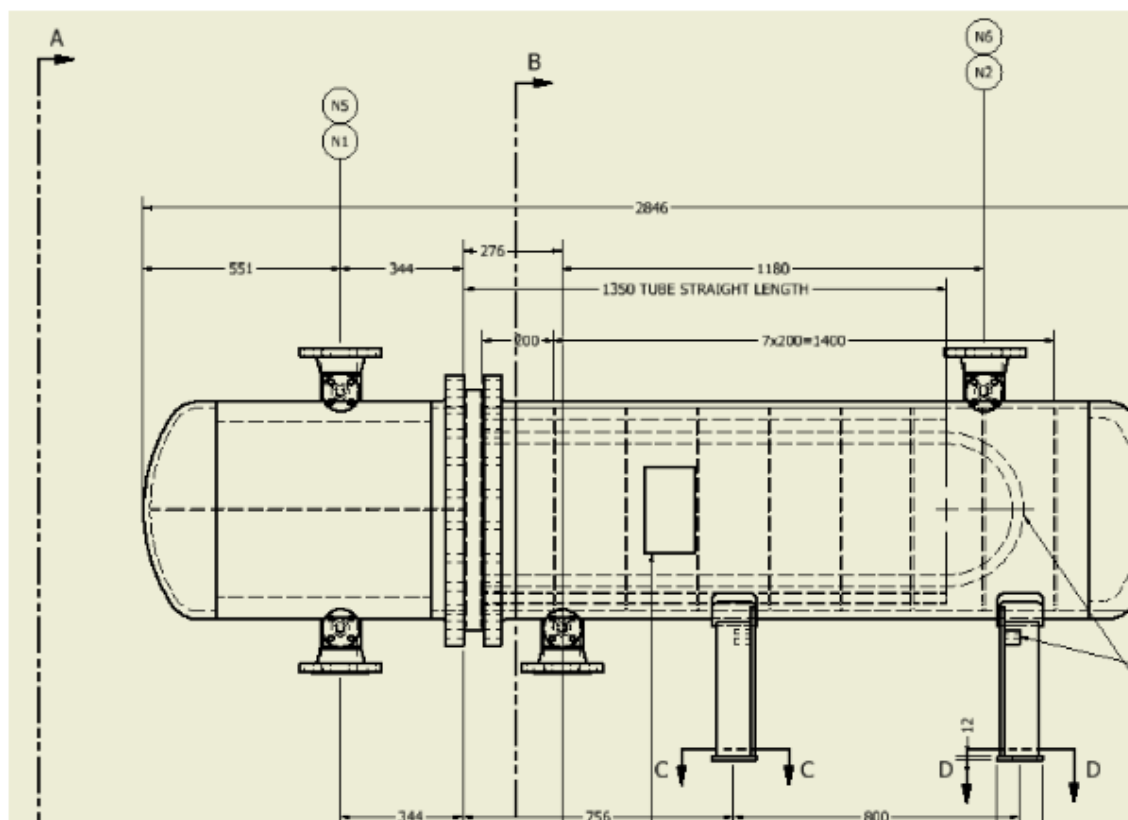
Ennen piirustusohjelman tekemistä kokoonpanomalli kävi läpi vielä huolelliset kuormitustestit, joissa käytiin läpi eri mitoituskenaarioita. Jos testeissä havaittiin virheitä, niitä korjattiin pois sitä mukaa, kun niitä ilmeni.

### 3.3.4 Piirustusohjelman suunnittelu

Kokoonpanomallin piirustusohjelmia ei tarvinnut tehdä aivan alusta alkaen. Autocad kuuluu Inventorin kanssa samaan Autodeskin tuoteperheeseen. Koska Nesteen virallisia piirustusohjelmia löytyi Autocad-versioina, oli mahdollista tuoda nämä vanhat piirustusohjelmat Inventoriin ja pilkkoa niiden taulukot erillisiksi sketsisymboleiksi. Nämä sket-

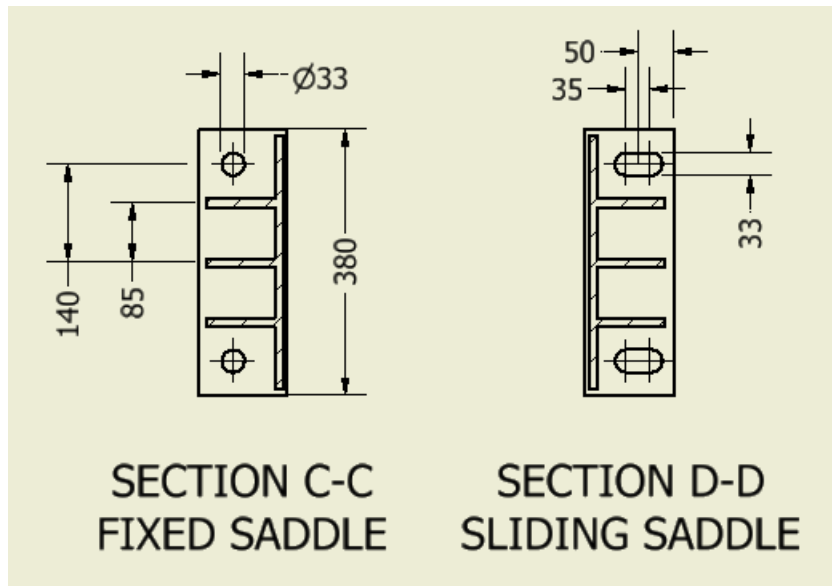
sisymbolit sitten liitettiin uuteen piirustus pohjaan. Vanhoista taulukkopohjista johdetut sketsisymbolit eivät kuitenkaan välittyneet Inventorin puolelle täysin virheettöminä, vaan mm. niiden muotoilua ja kiinnityspisteitä oli vielä erikseen korjailtava.

Kun piirustus pohja päämittakuville oli saatu muotoilultaan ja taulukoiltaan mieleiseen järjestykseen, oli seuraava työvaihe linkittää siihen vielä sisältöä. Piirustus pohjan sisällä valittiin *Manage*-välilehdeltä *Replace Reference Model* -komento, jolloin Inventor antoi valita uusiksi piirustuksessa näkyvillä olevan mallin. Tällä työkalulla piirustuksessa näkyväksi lisättiin kokoonpanomalli (kuva 48) sekä tuubilevystä tehty erillinen malli.



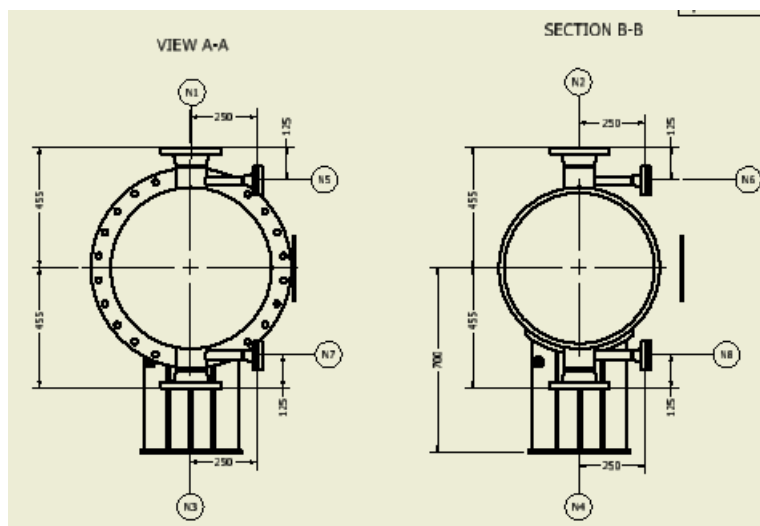
Kuva 48 Lämmönsiirtimen *Base View*

Päämittakuvien sisällölle oli asetettu muutamia vaatimuksia: lämmönsiirtimestä oli esitettävä ns. perusnäkö (Base View), jossa lämmönsiirrin näkyy sivulta ja takaa esitettynä, ja muutamia osanäkymiä (Section View) (kuva 49), joissa tietyistä lämmönsiirtimen osista on projektoitu poikkileikkausnäkö. Osanäkymät otettiin kummastakin jalustasta niiden yläpuolelta katsottuna, ja rungon keskiosan kohdilta yksi, jossa esitettiin tarkemmin tuubivaippaan liittyvien yhteiden sijainnit (kuva 50).



Kuva 49 Jalustojen yläpuolelta otetut osanäkymät

Piirustus pohjaan myös lisättiin valmiiksi mahdollisimman moni mitta, jotta käyttäjän ei tarvitsisi enää päämittakuvan puolella keskittyä muuhun kuin asetteluun ja suunnittelu- sekä materiaalitietojen lisäämiseen. Pohjaan tuli myös erilaisia lämmönsiirtimen ominaisuuksia ja osia selostavia selitetekstejä.



Kuva 50 Yhdesijainteja havainnollistavat osanäkymät

## 4 Yhteenveto ja pohdinta

Kehitysprojektin tavoitteena oli kehittää toimiva ja käyttäjäystävällinen parametrinen malli BEU-tyyppin lämmönsiirtimien päämittakuvien tekemistä varten, ja tämä tavoite pääpiirteittäin saavutettiin.

Luurankomalli saatiin valmiiksi lähes suunnitelmien mukaisesti. Esimerkiksi pääyhteiden liikuttaminen z-akselin suuntaisesti ei onnistunut ensimmäisellä yrittämällä, koska yhteiden sijaintia tässä suunnassa säädettiin aluksi vain yksinkertaisella etäisyysmitalla XY-tasoon nähden. Tämä johti siihen, että kun yhteiden sijaintikulmaa, offset-etäisyyttä tai rungon mitoitusta muutettiin, ne alkoivat liikkua itsestään koordinaatistossa epätoivottuihin suuntiin. Tämä ongelma ratkaistiin sitomalla yhteet keskilinjastaan erillisiin XY-tasosta vedettyihin aputasoihin, jonka jälkeen yhteiden z-suuntainen liike tapahtui aputasoja liikutellen. Tämän jälkeen myös lämmönsiirtimen muiden mittojen muuttaminen ei vaikuttanut yhteiden haluttuun sijaintiin. Luurankomallin tekoprosessissa lisäpohdintaa aiheutti myös toimivien funktioiden miettiminen. Yksittäisen sketsin oikeanmallinen liikkuminen vaati usein pitkiä funktioita, joita tehdessä piti miettiä myös niiden vaikutusta luurankomallin muihin sketseihin. Tämä prosessi onneksi nopeutui kehitysprojektin edetessä, kun Inventorin toimintalogiikka tuli tutummaksi ja sketsaaminen muuttui rutinoituneemmaksi.

Osatiedostoja tehdessä muutama osa oli kiinteän mallin luomisen yhteydessä sisällytettävä yhteiseen osatiedostoon alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen, koska niitä ei saatu noudattamaan haluttuja muotoja ilman tätä toimenpidettä. Myös jakolevyjen kiinteät mallit piti koota useammasta sketsistä, koska yksittäisestä sketsistä luotu jakolevy ei noudattanut riittävän tarkasti jakokammion seinämien muodostamia rajoja.

Suurin osatiedostojen luomiseen liittyvä ylimääräinen tehtävä oli erillisen tuubilevyn ja siinä näkyvän tuubiasettelun mallintaminen. Tähän ratkaisuun päädyttiin, koska kokoonpanomallin pelättiin muuttuvan käyttäjän kannalta liian raskaaksi, jos kokoonpanoon olisi liitetty vielä monivaiheinen tuubiasettelun modifiointi. Yksittäisten mitoitusmuutosten tekeminen ja näiden muutosten läpivieminen lomakkeen kautta vei jo itsessään pisimmillään jopa minuutteja, joten lisäodottaminen olisi vienyt pois kehitysprojektin yhtenä tavoitteena ollutta tehokkuuden lisäämistä.



Kokoonpanomallin puolella eniten päänvaivaa aiheuttivat mitoituslomakkeen toiminta, skriptien virheettömyysvaatimus ja *iLogic*-funktioiden toiminnan opettelu. Alkuvaiheessa lomaketta testatessa havaittiin, että osa muutoksista ei välittynyt näkyviin kokoonpanomalliin, vaan ne saatiin näkyviin vasta useiden kokoonpanomallin päivitysten ja skriptien uusinta-ajojen jälkeen. Tämä ratkaistiin luomalla jokaiselle säännölle omat komentofunktionsa, joilla päivitykset ja sääntöjen ajot toteutuivat samanaikaisesti, kun lomakkeesta hyväksyttiin kokoonpanomalliin tehdyt mitoitusmuutokset.

Kokoonpanomallin virheettömän toiminnan kannalta sitä ohjaavien skriptien ja funktioiden on myös oltava virheettömiä. Esimerkiksi yhteiden toimintaan vaikuttavien skriptien tekeminen oli ajoittain sarjatuotantoon verrattavaa manuaalista tekemistä, jolloin sekaan saattoi livahtaa näppäilyvirheitä, jotka johtivat joko skriptin toimimattomuuteen tai kokoonpanomallin virheelliseen toimintaan. Tämän takia jonkin verran aikaa kului skriptien ja *iLogic*-funktioiden tarkastamiseen ja korjaamiseen, kun malli ei toiminutkaan halutulla tavalla.

Kun parametrissa mallia tehtiin, kehitysprojektin aikana pidetyissä seurantalavereissa tuotiin esille hyviä kehityskohteita. Erään ehdotuksen innoittamana piirustus pohjaan lisättiin valmiiksi yleisimpiä tarvittavia mittoja ja poikkileikkauksuvia lämmönsiirtimen rungosta sekä jalustoista. Mittojen lisääminen helpotti myös mitoitusvalintoja kokoonpanomallin puolella, sillä osa lomakkeessa näkyvillä olevista etäisyyksistä eivät ole sellaisia, joita yksittäisinä tarvittaisiin päämittakuvissa. Tästä johtuen esimerkiksi lämmönsiirtimen kokonaispituuden laskemiseksi käyttäjän on ensin mitoitettava useita muita etäisyyksiä oikein, kuten esimerkiksi tuubi- ja jakokammiovaipan pituus. Mitoitusta tehdessä oli siis suoritettava ajoittain yhteen- ja vähennyslaskuja, jotta päämittakuvan kannalta oleelliset etäisyydet saatiin oikein. Lisäksi pohjaan lisättiin erillisiä *Note*-tekstejä, koska näistä ei ollut olemassa aiempia tekstipohjaisia taulukkomalleja, jotka olisivat vakiintuneet käyttöön päämittakuvien yhteydessä.

Piirustus pohjaan ei alkutavoitteista huolimatta keksitty tapaa linkittää kaikkia oleellisia suunnittelutietoja. Yhdediedoista saatiin kuitenkin linkitettyä mm. yhdenumerot ja tuumakoot. Tietojen manuaalinen syöttö ei kuitenkaan olennaisesti hidastanut päämittakuvan täyttämistä, koska ne pystyttiin syöttämään taulukkopohjaiseen valikkoon, josta ne sitten päivittyivät piirustuksessa näkyviin taulukoihin.

Kehitysprojektin perimmäisenä tavoitteena oli selvittää, nopeutuuko päämittakuvien laadinta oleellisesti käytössä olleeseen 2D-piirtämiseen verrattuna ja onko tulevaisuudessa syytä siirtyä enenevässä määrin 3D-pohjaiseen mallintamiseen. 2D-mallinnuksella tehtävään päämittakuvan laadintaan oli varattu keskimääräisesti noin kymmenen tuntia suunnittelu-aikaa. Uudella parametrisella mallilla ennätettiin kellottaa kolmen päämittakuvan laadinta, joiden pohjana toimivat asiakasprojektista saadut suunnittelu-arvot. Piirretyt kuvat sisälsivät siis todellisia lämmönsiirtimiä, eikä niitä varten jouduttu keksimään tekaistuja suunnittelu-arvoja ja -mittoja, jotta tehokkuusvertailu saatiin suoritettua.

Päämittakuvien laadinnan jälkeen voitiin havaita tehokkuuden kannalta positiivinen trendi. Ensimmäisen päämittakuvan piirtämisessä kului noin viisi tuntia, joten työskentelytehokkuudessa oli havaittavissa jo selvä parannus suunnittelijoilta saatuun aika-arvioon nähden. Toisen päämittakuvan kohdalla käytetty aika supistui jo neljään tuntiin, ja viimeisen päämittakuvan valmistuttua aikaa oli kulunut sen aloituksesta reilu kolme tuntia.

Käytetyn ajan lyheneminen johtui ensisijaisesti siitä, että päämittakuvia laadittaessa ehti syntyä Inventorin käyttörotiinia jo näinkin pienen otannan aikana. 2D-suunnittelun puolella eri yksityiskohtien piirtäminen vie huomattavasti aikaa. Vaikka päämittakuvan pohjana käytettäisiin vanhoja piirustuksia, on niihin muutosten tekeminen työlästä, jos esimerkiksi yhdesijainteja tai runkohalkaisijoita pitää lähteä muuttamaan. Tällöin lähes koko pohjaan joudutaan väistämättä tekemään aikaa vieviä muutoksia. Parametrisen mallin avulla piirtäminen ja mitoittaminen väheni lähes olemattomiin.

Vaikka yksittäisten mittojen muutosten läpivieminen kesti lomakkeessa mahdollisesti minuutinkin, ei muutettavia parametrejä ollut kokoonpanomallissa kuitenkaan kuin reilut 80 kappaletta. Kun eri lämmönsiirtimen osat oli vielä jaoteltu kuuteen eri kategoriaan, oli muutokset mahdollista syöttää kategoria kerrallaan valmiiksi, ja tämän jälkeen ajaa ne lomakkeesta läpi. Lisäksi on harvinaista, että kaikkia lomakkeessa olevia parametreja joutuisi muuttamaan päämittakuvaa tehdessä, joten tämäkin osaltaan vähensi päämittakuvan laadintaan menevää aikaa.

Koska olin itse tekemässä kellotuksen kohteina olevia päämittakuvia, ei niihin käytetty aika vertaudu vielä ongelmattomasti mahdollisesti sellaisten suunnittelijoiden tuloksiin, jotka eivät ole Inventoria käyttäneet. Inventor on kuitenkin käyttöliittymältään varsin

samantapainen muiden 3D-suunnitteluohjelmistojen kanssa piirustus- ja kokoonpanopuoliensa osalta, ja useimmilta suunnittelijoilta löytyy joko koulu- tai työhistoriastaan kokemusta myös 3D-mallintamisesta. Lomakkeen suunnittelussa pyrittiin kiinnittämään huomiota käyttäjäystävällisyyteen, jotta kynnys parametriseen mallin käyttämiseen olisi mahdollisimman pieni. Tämän perusteella voi arvioida, että myös ohjelmaa tuntemattomien käyttäjien on mahdollista saavuttaa melko nopeallakin aikataululla sama tehokkuustaso kuin tätä insinööriyötä varten tehdyissä kelloituksissa.

Tulevaisuutta ajatellen kehitysprojektista saatiin paljon rohkaisevaa dataa. Mikäli yrityksessä päätetään vielä jatkaa muiden lämmönsiirintyyppien parametristen mallien kehittämistä, on tätä kehitystyötä helppo käyttää ko. projektissa pohjana. Mahdollisina seuraavina parametrisointikohteina näkisin erilaisten runkolaippaliitosvaihtoehtojen lisäämisen. Lisäksi BEM- tai BES- tyyppin lämmönsiirtimien luominen voisi tulla seuraavaksi kysymykseen, koska niissä parametriseen malliin tehtävät muutokset rajoittuisivat putkistoryhmiin ja tuubivaipanpuoleiseen päätyyn. Myös yhdelaippojen paineluokkien lisääminen on seuraava luonnollinen kehityskohde. Tässä kehitysprojektissa käytetty paineluokka oli #150, mutta tämän lisäksi löytyy vielä luokat #300, #400, #600, #900, #1500 ja #2500. Parametrissa mallia varten suunnitellut jalustat on luotu enintään 1300 mm:n halkaisijan lämmönsiirtimille. Jos tulevaisuudessa halutaan mallintaa vielä isompia lämmönsiirtimiä, on myös jalustoihin tehtävä lisämuutoksia.

## Lähteet

- 1 Shell and tube heat exchanger standards: Part 1. 19.5.2016. Verkkoaineisto. <http://www.enerquip.com/heat-exchanger-blog/shell-and-tube-heat-exchanger-standards-part-1/> Luettu 10.1.2019.
- 2 Neste Engineering Solutions, Tietoa meistä. Verkkoaineisto. <https://www.neste.com/fi/konserni/tietoa-meist%C3%A4/tutkimus-ja-kehitys/neste-engineering-solutions> Luettu 20.10.2018.
- 3 Wagner, W. 1994. Lämmönsiirto. Helsinki: Opetushallitus. Luettu 5.1.2019.
- 4 Lampinen, M. J. & Kotiaho, V. W. 2015. Johdatusta lämmönsiirto-oppiin. Verkkoaineisto. [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/392188/mod\\_resource/content/1/LAMMONSIIRTO4.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/392188/mod_resource/content/1/LAMMONSIIRTO4.pdf) Luettu 7.1.2019.
- 5 Branson, S. T. 2011. Heat Exchangers: Types, Design, and Applications. New York: Nova Science Publishers, Inc. Luettu 13.1.2019.
- 6 Painelaitedirektiivi. 2014.
- 7 Painelaitelaki. 2016.
- 8 Lämmittämättömien paineastioiden suunnittelun standardi EN 13445-3. 2014.
- 9 Mitä on CAD? Verkkoaineisto. all3D Oy. <http://www.all3d.fi/mita-on/mita-on-cad/> Luettu 27.12.2019.
- 10 Sarcar, M.M.M., Mallikarjuna Rao, K. & Lalit Narayan, K. 2008. Computer Aided Design and Manufacturing, New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited. Luettu 17.12.2018.
- 11 Tuhola, E. & Viitanen, K. 2008. 3D-mallintaminen suunnittelun apuvälineenä. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. Luettu 7.1.2019.
- 12 Autodesk Inventor, ominaisuuksista. 2019. Verkkoaineisto. <https://www.autodesk.fi/products/inventor/features> Luettu 7.1.2019.
- 13 BEU-tyypin Lämmönsiirrin. 9.12.2015. TITAN Metal Fabricators. Verkkoaineisto. <https://plus.google.com/+Titanfabricators/posts/XM2o6TLDQc2> Luettu 19.1.2019.

- 14 Korbboggen-standardin mukaisen päädyn mitoitus. Verkkoaineisto. Fondeyur, S.L.  
<http://www.fondeyur.com/korboggen-heads.aspx> Luettu 15.11.2018.
- 15 Lämmönsiirrinjärjestely. 20.6.2017. Verkkoaineisto. Mountain States Engineering and Industrial Controls Blog.  
<https://blog.mnteng.com/2017/06/shell-and-tube-heat-exchangers.html> Luettu 19.1.2019.
- 16 Harrison, Jim 1999. Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association. New York. Luettu 25.1.2019.

TEMA-standardin mukaisten lämmösiirrinten rakennejaottelu

SECTION 1 HEAT EXCHANGER NOMENCLATURE

FIGURE N-1.2

