

Opinnäytetyö AMK
Konetekniikan koulutus
2021

Daniel Vedel

SÄILIÖPUOLIPERÄVAUNUN LUJUUDEN TARKASTELU



Daniel Vedel

SÄILIÖPUOLIPERÄVAUNUN LUJUUDEN TARKASTELU

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan säiliöpuoliperävaunun lujuutta. Opinnäytetyö tehtiin KAR-Lehtonen Oy:lle. Säiliöpuoliperävaunua, jota tutkittiin, on ensimmäinen Suomessa valmistettu yksilö. Säiliöpuoliperävaunua tullaan käyttämään Vaarallisten aineiden kuljetuksissa. Tavoitteena oli antaa varmuutta yrityksen omiin FEM-analyysituloksiin.

Työssä selvitettiin aluksi, minkälaisia rasiutilanteita lähdetään tutkimaan. Tilanteet, joihin kiinnitettiin huomiota, olivat kuljetettavan aineen hydrostaattisen paineen ja kokonaisuudesta johtuvat rasitukset. 3D-malli, jonka yritys oli luonut SolidWorksillä, muutettiin simulaatioon soveltuvaksi, jonka jälkeen simuloitiin tilanteet. Simulaatio suoritettiin Simcenter Nastran -ohjelmalla.

Keskeisimmät ongelmat olivat saada yrityksen oma 3D-mallin kokoonpano ja osat siirrettyä Siemens NX -ohjelmaan ja saada osien elementtiverkostot kiinnitettyä toisiinsa kokoonpano-FEM:illä. Kokoonpanon sekä suurin osa osista ja näiden siirtäminen 3D-mallinnusohjelmasta toiseen ilman suuria komplikaatioita oli vaikeaa, joten päädyttiin mallintamaan suurin osa osista itse ja luomaan oma kokoonpano Siemens NX:llä. Kokoonpano-FEM:issä malli saatiin toimimaan kokeilemalla erilaisia keinoja ohjelmiston valmistajan luoman kirjan/ käyttöoppaan avulla, mikä oli opettavaista ohjelman toiminnasta.

Opinnäytetyön tuloksia verrattiin yrityksen omiin tuloksiin ja todettiin, että luotu rakenne tulee kestävänsä siihen kohdistuvat rasitukset. Parannusvaihtoehtoina annettiin vahvikkeiden lisääminen kriittisiin kohtiin.

ASIASANAT:

Elementtimenetelmä, Tuotekehitys, Rakenne, Lujuuslaskenta

BACHELOR'S | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree programme

2021 | 38 of pages

Daniel Vedel

EXAMING THE STRENGTH OF A TANK SEMI-TRAILER

This thesis is going to examine the strength of a tank semi-trailer. The thesis was commissioned by KAR-Lehtonen Oy. The tank semi-trailer which is examined in this work is the first off, its kind to be produced in Finland. This tank semi-trailer is built to transport dangerous goods. The goal of this thesis is to give reassurance to the company's own results.

The first step in this thesis was to sort out what kind of load cases are going to be examined. The cases which are going to be examined in this work are the displacements that hydrostatic pressure and maximum mass are going to inflict to the structure. The 3D model which the company had created with SolidWorks was modified to be suitable for simulation. The simulation was performed with the program Simcenter Nastran.

The primary problems were to transfer company's 3D models assembly and parts to Siemens NX and to connect element meshes to each other's in assembly FEM. Transferring the assembly and the parts from a 3D software to another without getting too many complications appeared to be quite complicated so in the end it was forced to re model most of the parts and to make a new assembly. Getting the model to work in assembly FEM section was through trials and errors and by the help of a book/ user manual provided by the manufacturer which was very educational process.

The results of the thesis were compared with the company's own results and the structure were found and reassured withstand the strains that the tank semi-trailer is going to encounter. As development proposals were reinforcing the critical spots.

KEYWORDS:

Finite element method, Product development, Structure, Strength calculation

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 KAR-LEHTONEN OY	9
3 SÄILIÖPUOLIPERÄVAUNU	10
4 ELEMENTTIMENETELMÄ	11
4.1 Elementtiverkko	11
4.2 Solmusuuret	12
4.3 Globaali yhtälösystemi	13
4.4 Simcenter Nastran	13
4.4.1 Lineaarinen analyysi	13
4.4.2 Epälineaarinen analyysi	14
4.4.3 Dynaaminen analyysi	14
5 LUJUUSTARKASTELUN KULKU	15
5.1 Hydrostaattinen paine	15
5.2 Maksimaalinen massa	17
6 MALLI	19
6.1 Kokoonpanon valmistelu	19
6.2 Ideaalikappale	20
6.2.1 Levyelementin luonti	22
6.2.2 Sektoreiden jako	22
6.3 Elementtiverkotus	23
6.3.1 2D mesh	24
6.4 Assembly FEM	26
6.4.1 Osien tuonti assembly FEM:iin	26
6.4.2 Liitokset	27
6.5 Simulointi	30
6.5.1 Liitokset	31
7 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	33

8 ARVIOINTI JA POHDINTA	36
--------------------------------	-----------

LÄHTEET	37
----------------	-----------

KAAVAT

Kaava 1 $[K] \{U\} = \{R\}$	13
Kaava 2. Suora ympyrälieriö (Seppänen ym. 2010,32)	18
Kaava 3. Katkaistu kartio (Seppänen ym. 2010,32)	18

KUVAT

Kuva 1. KAR-Lehtonen Oy 2021	9
Kuva 2. Pokattu säiliöpuoliperävaunu. KAR-Lehtonen Oy kuljetussäiliöt 2021.	10
Kuva 3. Säiliön päätyseinään luotu elementtiverkko.	12
Kuva 4. Elementtien solmukohtat	12
Kuva 5. Säiliöön mallinnetut vetopöytä ja teli alustat.	15
Kuva 6. Hydrostaattisen paineen reunaehdot.	16
Kuva 7. Hydrostaattisen paineen voima ja aloitus piste.	17
Kuva 8. Maksimi massan voimavektorit.	18
Kuva 9. Yksi ongelmista kokoonpanon tuomisesta NX:ään.	20
Kuva 10. Osa osien valmisteluun käytettyjä työkaluja.	21
Kuva 11. Väliseinä ennen ja jälkeen valmistelun.	21
Kuva 12. Väliseinän ennen ja jälkeen levyelementeiksi luomisesta.	22
Kuva 13. Vaipan sektorit.	23
Kuva 14. 2D Mesh parametrit ja vaipan mesh:it.	24
Kuva 15. Vaipan elementtiverkko.	24
Kuva 16. Katkaistun kartion elementtiverkko.	25
Kuva 17. Assembly FEM:in aloitusruutu.	26
Kuva 18. Assembly FEM väliseinien aktivoinnin jälkeen.	27
Kuva 19. Tehdyt liitokset ja siihen käytetty työkalu.	27
Kuva 20. Väliseinän ja vaipan liitos kohta.	28
Kuva 21. Vetopöydän alustan elementtiverkon ylitys vaipan elementtiverkosta.	29
Kuva 22. Siemens NX:stä löytyvät ratkaisutyylit.	30
Kuva 23. Liitoksien tarkasteluun käytetty ratkaisumenetelmä.	31
Kuva 24. Kokoonpano ilman toimivia liitoksia.	32
Kuva 25. Kokoonpano toimivilla liitoksilla	32
Kuva 26. Maksimaallisen massan tuloskuva.	33
Kuva 27. Vertaus yrityksen omaan simulaatioon.	34
Kuva 28. Hydrostaattisen paineen aiheuttamat siirtymät.	34
Kuva 29. Hydrostaattisen paineen aiheuttama jännitys MPa.	35

TAULUKOT

Taulukko 1. Öljy ja polttoaine ominaisuudet (Global Combustion 2021).

16

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

FEM	Finite Element Method; Laskennallinen menetelmä, jolla lasketaan rakenteen fyysisiä ominaisuuksia.
LFO	Light Fuel Oil. Kevyt polttoöljy.
Vetoalusta	Puoliperävaunujen liitosmekanismi kuorma-autoihin.

1 JOHDANTO

Tämä on opinnäytetyö, jossa tutkitaan säiliöpuoliperävaunun lujuutta elementtimenetelmällä. Tarkoituksena on ottaa valmiiksi mallinnettu säiliö ja muuttaa se simulaatioon soveltuvaksi rakenteeksi. Rakenteesta poistetaan simulaation kannalta turhia osia, kuten reikiä, ja muutetaan rakennetta yksinkertaisemmaksi. Kokoonpanon kappaleet muutetaan 3D solideista levyiksi elementeiksi, jotta simulaatio olisi tietokoneelle kevyempi käsitellä ja säästääkseen aikaa.

Säiliöistä halutaan selvittää, mihin kohtiin rasitukset kohdistuvat ja minkälaisia siirtymiä rasitus aiheuttaa materiaalille. Skenaariot, joita tutkitaan, on kokonaisuudessaan ja hydrostaattisen paineen aiheuttamat rasitukset Osaa tuloksista verrataan yrityksen omiin simulaatioihin, mitkä on tehty toisella ohjelmalla. Tulosten kannalta tärkeintä on selvittää, mihin kohtiin rasitukset tulevat kohdistuvat. Niiden tulosten osalta, joita voidaan verrata toisiinsa toivottavaa olisi, että ne ovat mahdollisimman samankaltaisia keskenään.

2 KAR-LEHTONEN OY

Tämän opinnäytetyön aiheena on pökatun-puoliperävaunun lujisuuden tarkastelu FEM-ohjelmalla. Työ toteutetaan KAR-Lehtonen Oy:lle, jonka toimipaikka sijaitsee Liedossa. KAR-Lehtonen Oy on perheyritys, joka toiminut vuodesta 1971 vaarallisten aineiden kuljetussäiliöiden valmistajana. Yrityksen ensimmäinen omavalmisteinen vaunu valmistui vuonna 1976. Yritys työllistää tänä päivänä 16 henkilöä ja suurimmat myynnit tehdään Suomeen ja Ruotsiin. Vuonna 2020 yrityksen liikevaihto oli 3,3 miljoonaa euroa.

Yritys valmistaa myös muita säiliötä kuten esimerkiksi Bitumi-, vakuumi- ja imusäiliöitä. Yritys suorittaa myös säiliötarkastuksia sekä huolto- ja muutostöitä. Tässä työssä tarkastettava säiliöpuoliperävaunu on ensimmäinen Suomessa valmistettu ja suunniteltu säiliöpuoliperävaunu. Yritys on itse suunnitellut säiliön rakenteet ja materiaalit on hankittu alihankkijalta. Aihe on valittu tuotekehitys tarkoituksella.



Kuva 1. KAR-Lehtonen Oy 2021

3 SÄILIÖPUOLIPERÄVAUNU

Tuote, jonka lujuutta lähdetään tarkastelemaan, on pokattu puoliperävaunu. Puoliperävaunu on yksi pitkä yhtenäinen vaunu, joka liitetään vetoautoon vetopöytäliitännällä. Tällaista ajoneuvoyhdistelmän kuljettamista varten tarvitaan CE-ajokortti ja EU-direktiivien täyttämä ammattipätevyys, joka pitää uusia 5 vuoden välein. Puoliperävaunun käyttötarkoitus on kuljettaa vaarallisia aineita, kuten kevyt polttoöljyä ja polttoaineita, pitkillä matkoilla asfaltoiduilla teillä. Työn tarkoituksena on tarkastella, millaisia voimia ja rasituksia perävaunun geometria tulee kohtaamaan ja kestävänsä. Tärkein tarkasteltava kohta perävaunussa on säiliön katkaistu kartio osuus pienemmän ja isomman lieriön välissä.



Kuva 2. Pokattu säiliöpuoliperävaunu. KAR-Lehtonen Oy kuljetussäiliöt 2021.

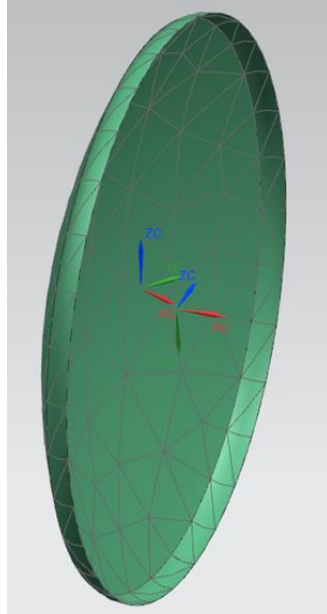
Säiliön kokonaismitta on 17 520 mm, ja säiliö on jaettu kolmeen osaan. Pienempi lieriö, Katkaistu kartio osuus ja isompi lieriö. Pienemmän lieriön pituus on 3900 mm ja halkaisija 2010 mm. Pienempää lieriöön on kiinnitetty katkaistu kartio, joka on myös tämän työn suurin tarkastelu kohde. Itse katkaistu kartion osuus ei ole iso, mutta sijainnin kannalta välttämätön ja suurimman rasituksen kohteena. Katkaistun kartion mitat ovat pituus 1000 mm, pienemmän lieriön kiinnityskohdan halkaisija on 2010 mm ja isomman lieriön kiinnityskohta 2360 mm. Ison lieriön osuus onkin suurin säiliöstä. Isomman lieriön pituus on 11930 mm ja halkaisija 2360 mm. Perävaunun tarkoituksena on kuljettaa mahdollisimman paljon nestemäisiä aineita. Jotta omamassa ei olisi liian suuri, niin säiliö on valmistettu alumiinista, joka on kevyt materiaali. Perävaunun omamassa on 11 t ja täytettynä 60 t. Ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu kokonasi massa vetoauton kanssa on 68 t.

4 ELEMENTTIMENETELMÄ

Yksinkertaisissa geometrioissa saadaan ratkaisu lineaarisesta lujuusopista. Vaikeammassa tilanteissa ratkaisuja ei löydetä suljetussa muodossa, vaan joudutaan tyytymään likimääräiseen arvoon ja ratkaisuun. Tämän takia on kehitetty numeerisia ratkaisumenetelmiä, mistä parhaaksi on todettu elementtimenetelmä. Finite Element Method laajalti käytetty lujuuslaskenta menetelmä, jolla ratkaistaan fyysisiä ominaisuuksia differentiaaliyhtälöiden avulla. Elementtimenetelmä on otettu käyttöön 1950-luvulla lentokoneolosuhteissa, josta se levisi muihin teollisuudenaloille. Ray Clough keksi ”finite element” nimen vuonna 1960 ja tutkimusten myötä elementtimenetelmän luotettavuus kasvoi. Elementtimenetelmän tulokset ovat kuitenkin likimääräisiä ja tarkkuuteen vaikuttaa interpoloinnista ja integroinnista syntyvät virheet. Tarkkuuteen vaikuttavat myös elementtikermitusten korvaaminen ekvivalenttisilla solmukuormituksilla sekä mallinnusvirheet. (Cook ym. 2001,14.)

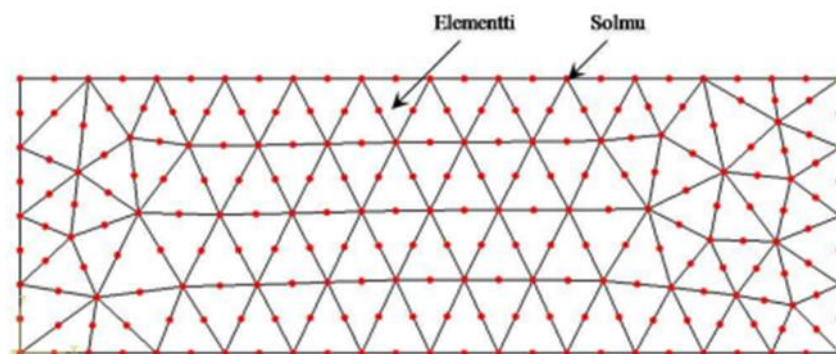
4.1 Elementtiverkko

Tuotetta ja rakennetta suunniteltaessa yleensä halutaan tietää mitä rasituksia sille tapahtuu tietyillä kuormituksilla. Mutkikkaissa rakenteissa rakenteet jaetaan äärellisiin osiin, jotka ovat geometrialtaan tarpeeksi yksinkertaisia. Näitä osia kutsutaan elementteiksi. Kappaleen eri osiin luoduissa elementtiverkoissa elementtien koot voivat vaihdella.



Kuva 3. Säiliön päätyseinään luotu elementtiverkko.

Kappaleen eri osissa voidaan käyttää samanaikaisesti erityyppisiä, eri muotoisia ja eri materiaaliominaisuuksia omaavia elementti verkkoja. Tämän takia elementtimenetelmästä joustavan yhdistettyjen rakenteiden analysoinnissa. Vierekkäiset elementit liittyvät toisiinsa kohdissa, joita kutsutaan solmuiksi.



Kuva 4. Elementtien solmukohtat

4.2 Solmusuureet

Elementtiverkon solmuihin liittyy siirtymä- ja voimasuureet. Siirtymäsuureet ovat translaatio- ja rotaatiosiirtymät. Voimasuureisiin kuuluu jännitykset, poikkileikkaus rasitukset

ja pintarakenteiden rasiustiheydet. Käytettävät solmusuureet riippuvat elementtityypistä. Elementtiverkossa on yleensä suuri määrä solmuja ja elementtejä, joita käsitellään yksittäisinä ja kokonaisuuksina. Tämän takia elementtimenetelmässä hyödynnetään matriisilaskentaa.

4.3 Globaali yhtälösystemi

Elementtien sisälle muodostuneet yhtälöt kootaan globaaliin yhtälösystemiin, jolla saadaan selvitettyä kappaleen tuntemattomat suureet. Tuntemattomille solmuarvoille muodostetaan lineaariset yhtälöryhmät sijoittamalla elementtien jäykkyyismatriisit, solmuvoimukset ja ekvivalenttiset solmuvoimukset. Tätä muodostuvaa yhtälöryhmää kutsutaan elementtiverkon perusyhtälöksi.

$$\text{Kaava 1 } [K] \{U\} = \{R\}$$

Missä $[K]$ on globaali jäykkyyismatriisi, $\{U\}$ siirtymävektori ja $\{R\}$ voimavektori.

4.4 Simcenter Nastran

Simcenter Nastran on toiminut Finite Element Method analyysien standardina jo 40 vuotta. Simcenter Nastran ratkaisee useimmat analyysiongelmat lineaarisessa ja epälineaarissa analyysissä, dynaamisessa vasteessa, roottorin dynamiikassa, aeroelastiisuudessa ja optimoinnissa. Etuna on se, että kaikki nämä ratkaisut ovat saatavana yhdellä ratkaisijalla, on se, että syöttö- ja tulostiedostomuodot ovat samat kaikille ratkaisutyypeille. Tämä yksinkertaistaa huomattavasti mallintamisprosesseja. (Femto 2020.)

4.4.1 Lineaarinen analyysi

Lineaarinen analyysi olettaa, että materiaaleja ei rasiteta kriittisten pisteiden yli ja muodonmuutokset pysyvät pieninä kokonaismittoihin nähden. Nastranilla on hyvä valikoima lineaarisia analyysitoimintoja. Se voi ratkaista esimerkiksi staattisia ongelmia, kuten määrittämään jos rakenne tulee pettämään määrättyllä voimalla. Nastran ratkaisee myös dynaamisesti ohimeneviä ongelmia, joissa voimat muuttuvat ajan myötä. Lisäksi

Nastrania käytetään ratkaisemaan vääntymisen kuormituskapasiteetit ja lämmönsiirto käyttäytymistä. (Femto 2020.)

4.4.2 Epälineaarinen analyysi

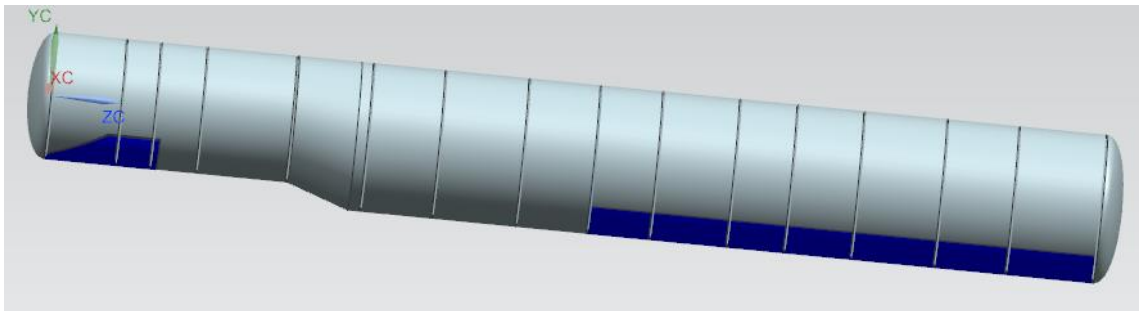
Kun muodonmuutokset ovat suuria, lineaaristen materiaali oletukset ovat virheellisiä tai kosketus on tekijä, niin epälineaarinen analyysi on sopiva simulaatiovalinta. Epälineaarisen analyysiratkaisijan avulla pystytään simuloimaan esimerkiksi moottorin tiivisteiden suorituskykyä. (Femto 2020.)

4.4.3 Dynaaminen analyysi

Nastran kattaa dynaamiset ongelmat kuten taajuudet, satunnaiset kuormitukset ja iskuvasteet. Dynaamisilla vastausominaisuuksilla on keskeinen rooli eri sovelluksissa, kuten matkustajien mukavuus lentokoneissa ja autoissa eri olosuhteissa, värähtelyiden vaikutusta kuluttaja tuotteissa ja elektroniikassa. Dynaamisen analyysin tuloksia käytetään yleensä syötteenä muihin analyyseihin, kuten joustavien kappaleiden liikeanalyysiin. (Femto.eu 2020.)

5 LUJUUSTARKASTELUN KULKU

Pokattuapuoliperävaunun lujuutta lähdetään tutkimaan lineaarisella elementtimenetelmällä. Puoliperävaunusta mallinnetaan vain säilön osuus, mihin liitetään yksinkertaisilla malleilla vetopöydän alusta ja telin.

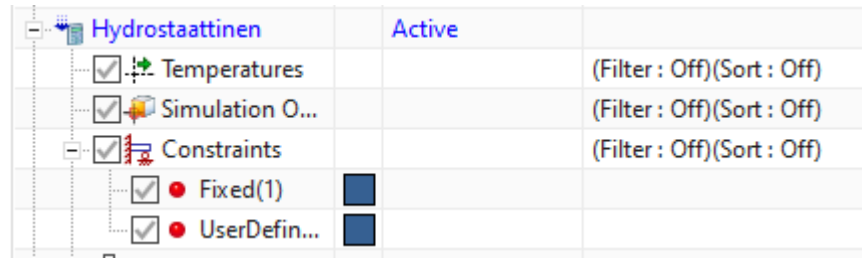


Kuva 5. Säiliöön mallinnetut vetopöytä ja teli alustat.

Tämä johtuu siitä, että vetopöydän alusta ja teli ovat lähestulkoon vakio-osia jokaisessa perävaunussa ja täten niiden lujuus tiedetään jo. Kumminkin näitä osia tarvitaan simulaation suorittamista varten, koska ne ovat tukirakenteita ja niihin asetetaan reunaehtoja. Syy miksi pelkkä säiliö mallinnetaan, eikä koko kokonaisuutta johtuu siitä, että tässä työssä halutaan selvittää kestääkö kyseinen säiliö siihen kohdistuvia rasituksia. Samalla kokonaisuuden simulointi saattaisi viedä päivistä jopa viikkoihin, johtuen käytössäni olevan tietokoneen laskentakapasiteetin rajallisuudesta.

5.1 Hydrostaattinen paine

Simulaatiossa lähdetään tilanteesta missä perävaunu on kiinnitetty täyteen lastattuna vetoautoon, jolla on seisonta jarru päällä ja auto seisoo tasaisella alustalla. Samalla syystä tai toisesta perävaunun jarruissa on ongelmia, ne eivät reagoi vetoauton seisonta jarruun ja ne pysyvät vapaana. Simulaatiossa halutaan selvittää hydrostaattisen paineen aiheuttamat voimat, ja mihin ne kohdistuvat tällaisessa tilanteessa.



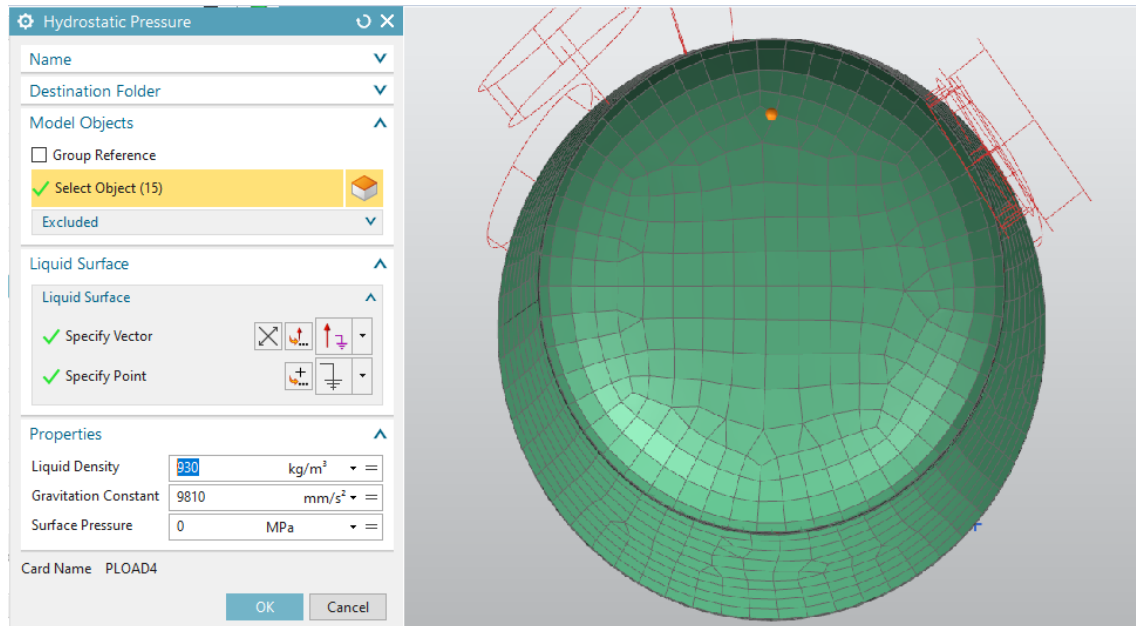
Kuva 6. Hydrostaattisen paineen reunaehdot.

Ennen simulaation aloittamista mallille pitää antaa reunaehdot ja voimat. Reunaehdot asettavat mallille vapauksia ja rajoitteita liikkuvuuteen. Tässä työssä annetaan vetoalustalle fixed constraint, mikä tarkoittaa, että tällä osiolla mallista ei ole minkäänlaisia vapauksia liikkua mihinkään suuntaan. Teli alustalle annetaan vapaudet liikkua eteen- ja taaksepäin. Perävaunussa on ilmanpaineilla toimivat jarrut ja jos systeemissä ei ole ilmanpainetta, nämä jarrut lukittautuvat automaattisesti. Koska vaunu on kiinnitetty autoon kiinni, niin voidaan olettaa, että vanun jarrut ovat vapautettuna. Teli alustalle voidaan antaa UserDefined constraint, missä voidaan määrittää kaikki vapausasteet kiertymiä myöten.

Property	Units	Diesel Oil (Gas Oil)	Light Fuel Oil (LFO)	Medium Fuel Oil (MFO)	Heavy Fuel Oil (HFO)
Composition:					
Carbon	%C	85.7	85.5	85.3	85.1
Hydrogen	%H	13.4	11.5	11.2	10.9
Sulphur	%S	0.9	3	3.5	4
Density @ 15C	kg/l	0.84	0.96	0.98	1
Specific Gravity		0.84	0.93	0.95	0.97

Taulukko 1. Öljy ja polttoaine ominaisuudet (Global Combustion 2021).

Voimaa asentaessa halutaan ensimmäiseksi selvittää mikä kuljetettavista aineista omaa suurimman tiheyden neliometriä kohti. Tämä tieto saadaan Global Combustion 2021 taulukosta Specific Gravity kohdasta, koska perävaunun käyttötarkoituksena on kuljettaa polttoaineita tai kevyt polttoöljyä. Taulukosta 1 huomataan, että Light Fuel Oil:illa omaa suurin tiheyden kaikista kuljetettavista aineista. Kyseinen tiheys on 930 Kg/m^3 .



Kuva 7. Hydrostaattisen paineen voima ja aloitus piste.

Kuvassa 7 on asetettu Hydrostaattisen voimavektorit säiliön sisäpinnalle. Voiman ominaisuudeksi Liquid Density kohtaan on pistetty taulukosta 1 selvitetty tiheys. Koska valmistajan määrittämä säiliön täyttöprosentti on 90 %, niin siirretään nesteen pintataso 700 mm mallin origosta ylöspäin. Tämä määritetään kuvan 7 Liquid Surface Specify Point kohdasta.

5.2 Maksimaalinen massa

Simulaatiossa lähdetään tilanteesta, missä perävaunu seisoo ylitäytettynä vetoautoon kiinnitettynä tasaisella alustalla. Simulaatiossa halutaan selvittää mihin maksimaalisen massan aiheuttama rasitus kohdistuu ja minkälaisia rasituksia rakenne tulee kohtaan. Vetoautolla on seisontajarru päällä ja oletetaan tilanne missä perävaunu ei reagoi seisontajarruun ja pitää akselit vapaina.

Aluksi pitää selvittää säiliön teoreettinen maksimaalinen tilavuus. Aloitetaan laskemalla säiliön etuosan lieriön, sekä takaosan isomman lieriön tilavuudet geometrian suoran ympyrälieriön tilavuus kaavalla. Isomman ja pienemmän lieriön välissä olevaan kappaleeseen käytetään geometrian katkaistun kartion kaavaa. Lopuksi nämä tilavuudet lisätään toisiinsa ja selvitetään säiliön teoreettinen maksimaalinen tilavuus.

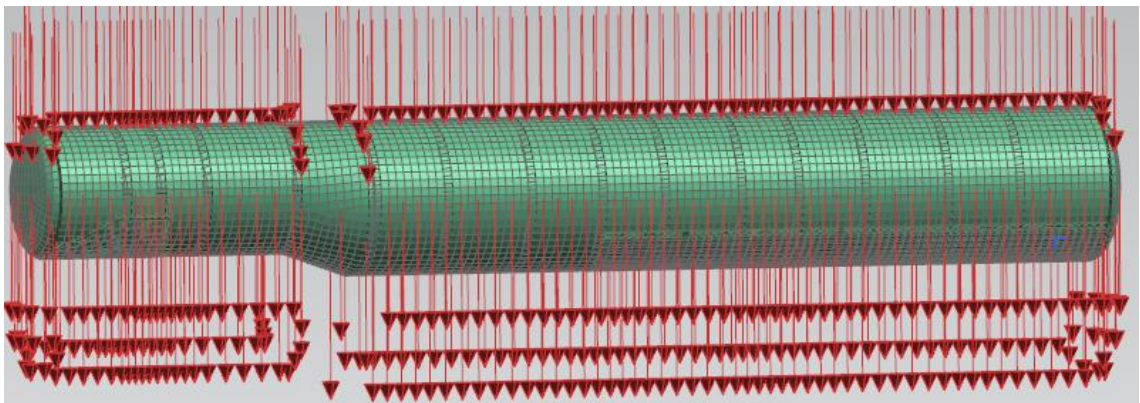
$$V = \pi r^2 h$$

Kaava 2. Suora ympyrälieriö (Seppänen ym. 2010,32)

$$V = \frac{h}{3} (A_1 + \sqrt{A_1 A_2} A_2)$$

Kaava 3. Katkaistu kartio (Seppänen ym. 2010,32)

Säiliön maksimaallinen tilavuus on 67,59 m³. Tilavuus kerrotaan taulukko 1 Specific Gravity kohdan Light Fuel Oil palstan 930 Kg/m³ kanssa ja saadaan kuljettavan nesteen massa, johon lisätään säiliön oma massa 1100 Kg. Säiliön ja kuljetettavan nesteen kokonaismassaksi saadaan pörästettynä 73859 kg. Kokonaismassa kerrotaan vielä pu-toamiskiihtyvyyden 9.81 m/s² kanssa, jotta saadaan tietää mikä voima rakenteeseen kohdistuu. Tulokseksi saadaan 724557 N voima.



Kuva 8. Maksimi massan voimavektorit.

Kuvassa 8 on asetettu voimavektorit kulkemaan alaspäin kohti maata ja annettu voiman arvoksi laskettu tulos 724557 N.

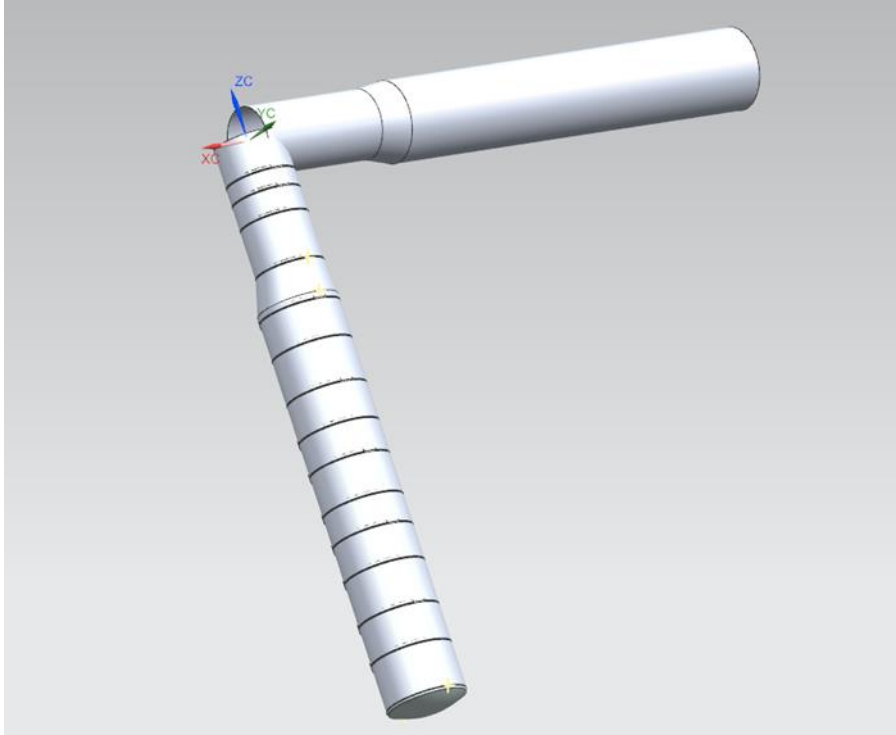
Reunaehdoiksi annetaan samat kuin hydrostaattisessa paineessa. Vetoalustalle annetaan Fixed constraint, eli se ei liiku mihinkään suuntaan mallissa. Teli alustalle annetaan vapaus liikkua eteen ja taakse päin.

6 MALLI

Tuote jonka lujuutta lähdetään tarkastelemaan, on pokattupuoliperävaunun säiliö. Puoliperävaunun käyttötarkoitus on kuljettaa vaarallisia aineita, kuten kevyt polttoöljyä ja muita polttoaineita. Työn tarkoituksena on tarkastella millaisia voimia ja rasituksia perävaunun geometria tulee kohtaamaan ja kestävään. Tärkein tarkasteltava kohta perävaunussa on katkaistu kartio osuus pienemmän ja isomman lieriön välissä. Itse simulointi suoritetaan Siemens nastran ohjelmalla. Lähden ratkaisemaan tuotetta Assembly FEM:illä. Assembly FEM:issä pystytään luomaan kokoonpanon jokaiselle osalle oma elementtiverkosto ja yhdistämään ne toisiinsa 1D-Elementeillä toimivaksi kokonaisuudeksi.

6.1 Kokoonpanon valmistelu

Tarkoituksena on ottaa jo valmiiksi mallinnettu kokoonpano ja valmistella tämä simulointia varten. Alkuperäinen kokoonpano on luotu SolidWorksissä ja simulointi suoritetaan Siemens NX:ssä. Kokoonpanon tuominen ohjelmasta toiseen tuotti hankaluuksia, joten päädyin mallintamaan suurimman osan kappaleista itse ja luomaan oman kokoonpanon Siemens NX:ssä. Oman kokoonpanon luominen osoittautui hyväksi ratkaisuksi, koska tällöin minulla oli enemmän vapauksia muokata kokoonpanoa. Pystyin luomaan kokoonpanolle uuden alustan, joka simuloi renkaita. Kokoonpanosta tehtiin myös toinen versio, missä siirrettiin katkaistun kartion kohdalta kaksi lähintä väliseinää lähemmäs päätyä. Tämä muokkaus vaihtoehto ei ollut mahdollista Solidworksin kokoonpanolla.

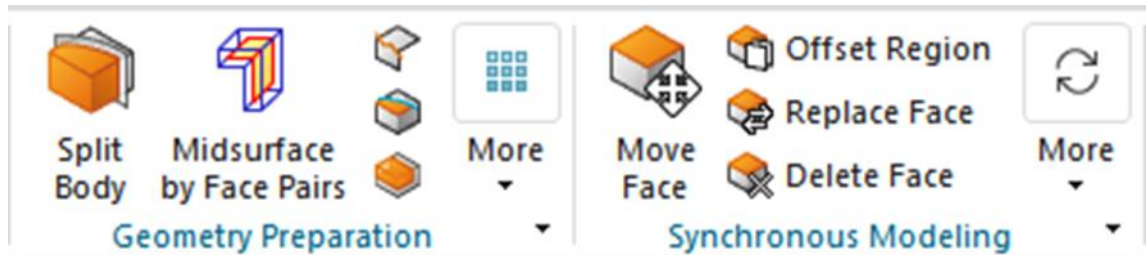


Kuva 9. Yksi ongelmista kokoonpanon tuomisesta NX:ään.

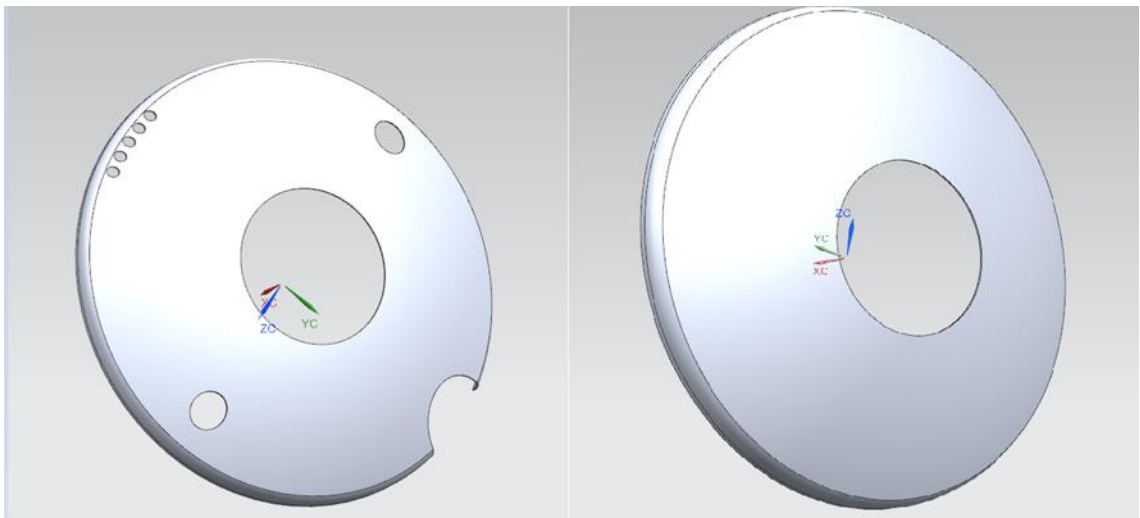
Kuvan 9 ongelmana oli luultavasti tiedostovirhe. Alkuperäinen mallintaja käyttää hyväksyen Solidworksissä synkronoitua mallinnusta. Kun siirsin tiedostot Siemens NX:ään, niin se ei välttämättä täysin tunnistanut tiedostoa, joka oli luotu Solidworksin puolella.

6.2 Ideaalikappale

Kokoonpano FEM:issä haluan tarkastella säiliötä kokonaisuutena. Tällöin kannattaa poistattaa simuloinnin kannalta kappaleista kaikki ylimääräiset geometriat, kuten reiät ja pyöristykset. Muutenkin kannattaa muuttaa geometriaa tietokoneelle helpommin simuloitavaksi. Tällöin saadaan kappaleeseen luotua helpommin haluttu ja toimiva elementtiverkko. Kappaleille luodaan oma ideaalikappale, mikä on kopio alkuperäisestä geometriasta. Täten voidaan muokata ideaalikappaletta mielin määrin ilman pelkoa siitä, että tuhotaan alkuperäistä geometriaa.



Kuva 10. Osa osien valmisteluun käytettyjä työkaluja.



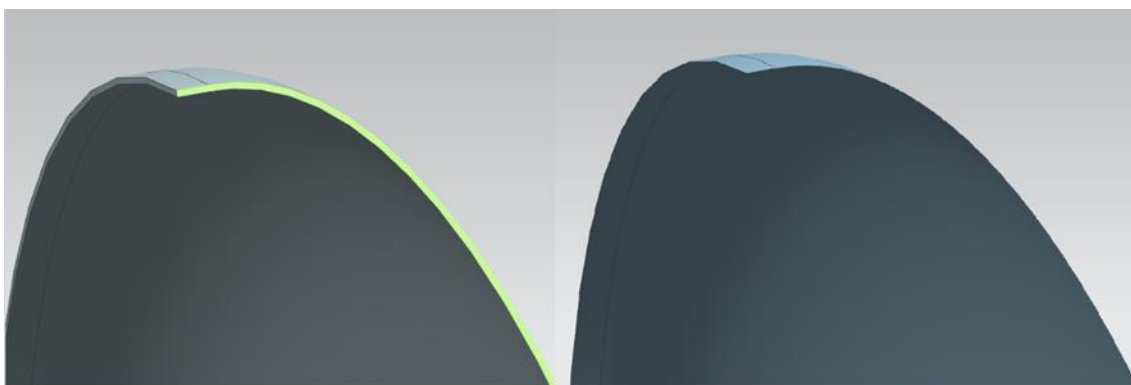
Kuva 11. Väliseinä ennen ja jälkeen valmistelun.

Simulaation kannalta lopputulokseen ei vaikuta väliseinän geometriasta poistetut reiät ja kolot, koska väliseinät tulevat tässä simulaatiossa olemaan tukirakenteita vaipalle. Kuvan 11 väliseinästä saadaan kaikki reiät ja kolot poistettua kuvan 10 Delete Face komennolla. Tämä poistattaa työkalulla valitut geometriat ja käyttää hyväkseen ympärillä olevaa geometriaa täyttämään/korjaamaan rakenteen. Jätin kuitenkin väliseinän keskellä olevan läpivirtausreiän, koska jos väliseinä tulee pettämään, niin luultavasti se tulee pettämään siitä kohtaa kuperan muotonsa vuoksi.

Kun olen poistanut turhia ja simulaatiota haittaavia geometrioita, niin saadaan kappaleen reunalle yhtenäinen geometria. Tämä helpottaa tulevissa työvaiheissa osien verkottamista ja liittämistä toisiinsa ennen simulaation suorittamista.

6.2.1 Levyelementin luonti

Simuloinnin kohteena olevan puoliperävaunun suuri koko asettaa 3D simulointiin käytettävälle tietokoneelle kovia tehovaatimuksia. Tehokas tietokone ei siltikään takaisi simulaation onnistumista elementtimäärien takia. Kokoonpanon 2D elementtien määrä isolla elementtiverkolla on 18302 kappaletta. Elementtiverkon 3D versiona pistäminen voi tuplata jopa triplata elementtien lukumäärän. Omalla ja monella mulla tietokoneella ei riitä resursseja semmoisen elementtien määrän simulointia varten. Näissä tilanteissa pyritään keventämään geometriaa mahdollisemman paljon simulaatiota varten. Tämä tapahtuu yhden 2D tason valitsemisella kappaleesta. Näin eliminoidaan tarvetta luoda 3D elementtiverkotusta ja samalla vähennetään elementtien määrää ja täten kokonaisuus muuttuu hiukan helpommaksi tietokoneelle pyörittää.



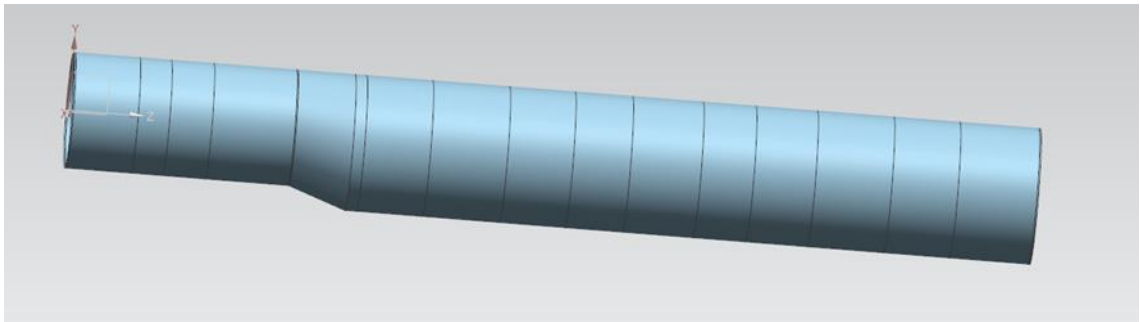
Kuva 12. Väliseinän ennen ja jälkeen levyelementeiksi luomisesta.

Kuvassa 12 olen käyttänyt kuvan 10 Midsurface by pairs komentoa. Tällä komennolla pystytään valitsemaan kappaleesta haluttu 2D taso mihin lähdetään luomaan elementtiverkkoa. Tässä työssä valistin kappaleiden keskitason 2D tasoksi. Komennolla pystytään myös valitsemaan päällimmäinen, taikka alimmainen taso riippuen siitä mitä halutaan tutkia.

6.2.2 Sektoreiden jako

Sektoreihin jako on yksi viimeisimpiä, mutta tärkeimpiä kohtia geometrian valmistelussa. Käyttämällä kuvan 10 Split Body komentoa voidaan jakaa halutun kappaleen taso osiksi,

eli sektoreiksi. Sektoreilla on monimuotoisia käyttötarkoituksia, esimerkiksi kappaleeseen voidaan luoda erilaisia ja kokoisia elementtiverkkoja yhtäaikaaisesti. Sektorit helpottavat myös simuloinnissa voimien kohdistamisen tiettyyn osioon tarpeen vaatiessa. Sektoreita voidaan käyttää myös hyväkseen yksittäisen osion simuloinnissa. Tämä on työni kannalta tärkeää, kun tutkin katkaistunkartioon kohdistuvia rasituksia, mikä on kriittisin osa kokoonpanossa.



Kuva 13. Vaipan sektorit.

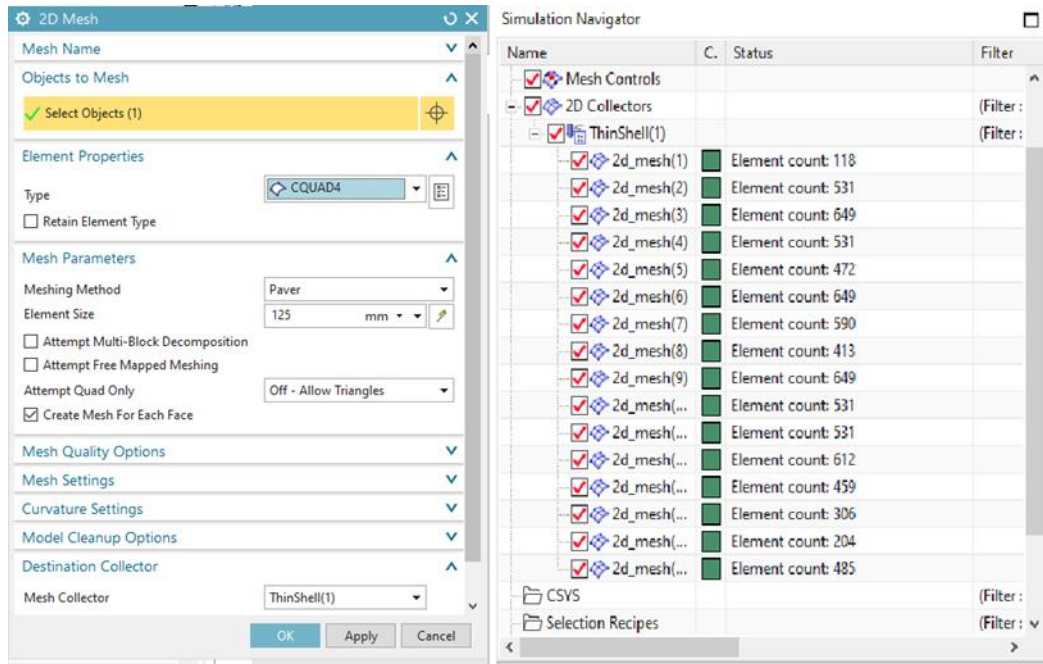
Omassa tapauksessani jaoin suurimman kappaleeni kuvan 13 sektoreihin. Sektoreiden jaon jälkeen pitää vielä palata pintamallinnus puolelle yhdistämässä luodut sektorit toisiinsa Sew-komennolla. Näin saadaan pinta, joka on yhtenäinen ja halutuissa osissa. Vaipan sektorit määräytyivät omassa työssäni väliseinien kiinnityskohdista. Näin varmistin sen, että elementtiverkossa sijaitsevat solmut sijoittuvat lähestulkoon kohdilleen, mikä helpottaa väliseinien sekä vaipan yhdistämistä 1D elementeillä kokoonpano FEM puolella.

6.3 Elementtiverkotus

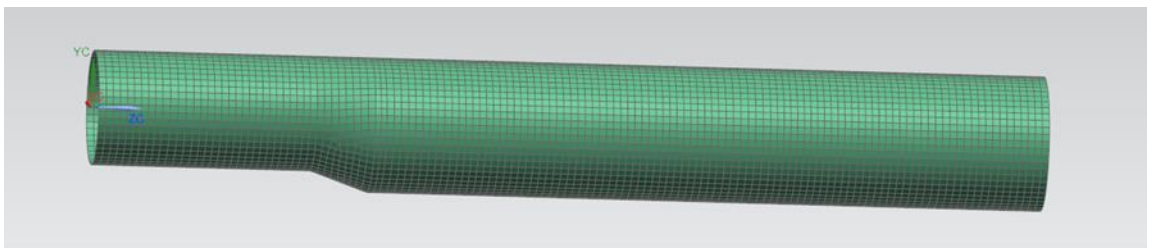
Elementtiverkotus on tietokoneen resursseja vaativa toiminta. Tämän takia ensimmäiset elementtiverkot kannattaa luoda mahdollisimman suurina. Tulokset ovat epätarkempia kuin pienemmillä verkotuksilla, mutta simulaatiot ovat huomattavasti nopeampia. Alussa halutaan kumminkin ensisijaisesti keskittyä toimivan kokonaisuuden luomiseen. Elementtiverkotusta voidaan pienentää myöhemmin. Omassa työssäni jouduin tyytymään 20 mm elementti kokoon, koska oman tietokoneeni RAM-muisti ei riitä pienemmän elementtiverkoston luomiseen.

6.3.1 2D mesh

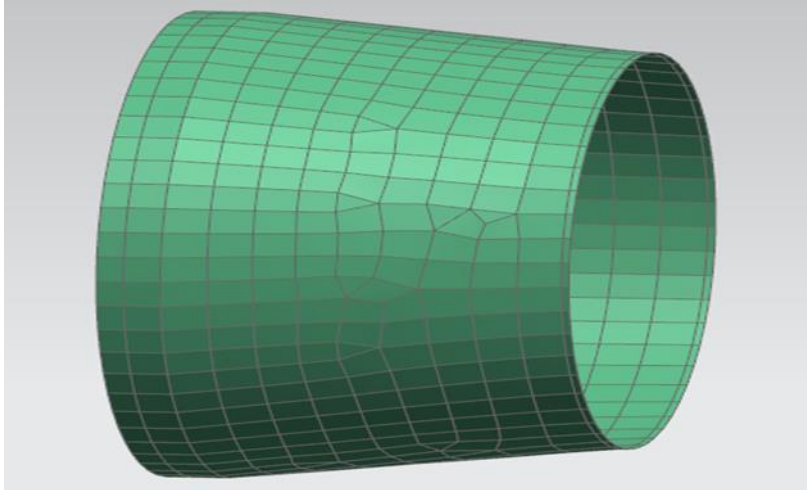
2D mesh on tasolle tehtävä elementtiverkotus. Tämä on mahdollinen tehdä, koska tässä tapauksessa kaikki kokoonpanon osat ovat muutettu keskitasoiksi ja siihen pystytään luomaan 2D mesh. Elementtityypiksi valitsin CQUAD4 elementin, joka on neliö elementti, jonka solmut kohdistuvat sen nurkkiin.



Kuva 14. 2D Mesh parametrit ja vaipan mesh:it.



Kuva 15. Vaipan elementtiverkko.



Kuva 16. Katkaistun kartion elementtiverkko.

Koska vaippa on jaettu osiin, niin jokaiselle osiolla luodaan oma 2D mesh kuvan 13 mukaisesti. Samalla nähdään, kuinka monta elementtiä sijoittuu omalle meshattavalle sektorille. Ainoana poikkeuksena 2D mesh parametreihin tulee vaipan katkaistuun kartio osuuteen. Siinä jouduin antamaan ohjelmalle luvan luoda kolmio elementtejä neliö elementtien sekaan kuvan 16 mukaan. Ilman tätä osiolla ei pystytty luomaan kokonaisuuteen sopivaa elementtiverkotusta. Väliseinien ja päätyjen verkottamisessa halutaan ottaa huomioon niiden kiinnitettävät reunat. Reunojen kohtiin halutaan mahdollisimman puhdas ja yhdenlainen verkotus, jotta niiden yhdistäminen vaippaan olisi mahdollisimman helppoa.

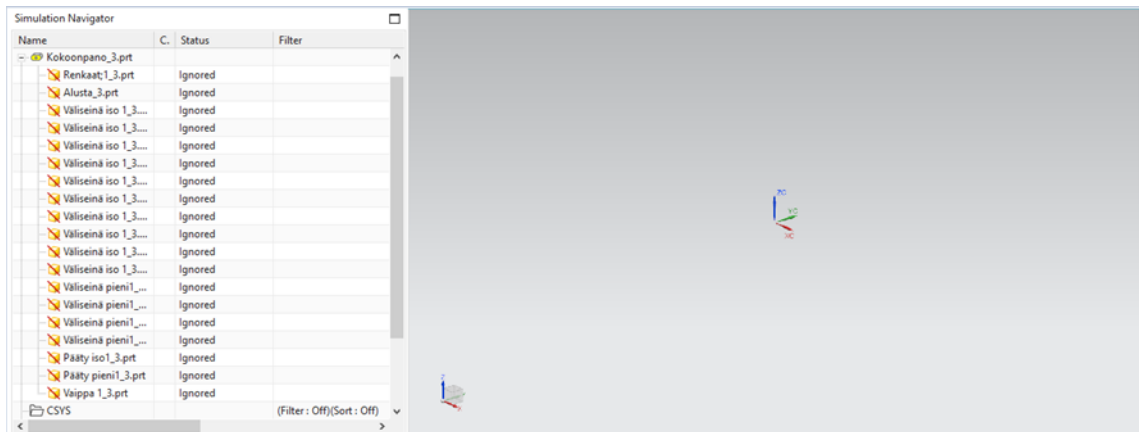
Kuvasta 14 huomataan, että meshien luomisen jälkeen navigaatio puuhun on tullut osio 2D collectors. Tämän alle on myös tullut ThinnShell (1) osio, mihin kaikki luodut meshit ovat sijoittuneet. Tämä johtuu siitä, että pinnoilla ei ole minkäänlaisia fyysisiä ominaisuuksia, esimerkiksi paksuutta ja materiaalia. Tämä pystytään määrittämään ThinnShell (1) kohdassa antamalla meshille osan alkuperäinen paksuus ja materiaali. Omassa tilanteessani osien paksuus oli lähellä 5 millimetriä ja materiaali alumiini. Simulaatiota varten annoin kaikille osille samat paksuudet ja valitsin materiaalikirjastosta Aluminium_2014. Tämä materiaali ei ole täysin sama kuin tuotteessa käytetty alumiini, mutta sen arvot olivat tarpeeksi lähellä alkuperäistä materiaalia. Tämä ei tule juurikaan vaikuttamaan lopputuloksiin, koska lähes kaikilla alumiineilla on samat ominaisuudet. Ainoana poikkeuksena on lentokone teollisuudessa käytetyt alumiinit, mutta ne ovat sitten ihan eri hintaluokassa.

6.4 Assembly FEM

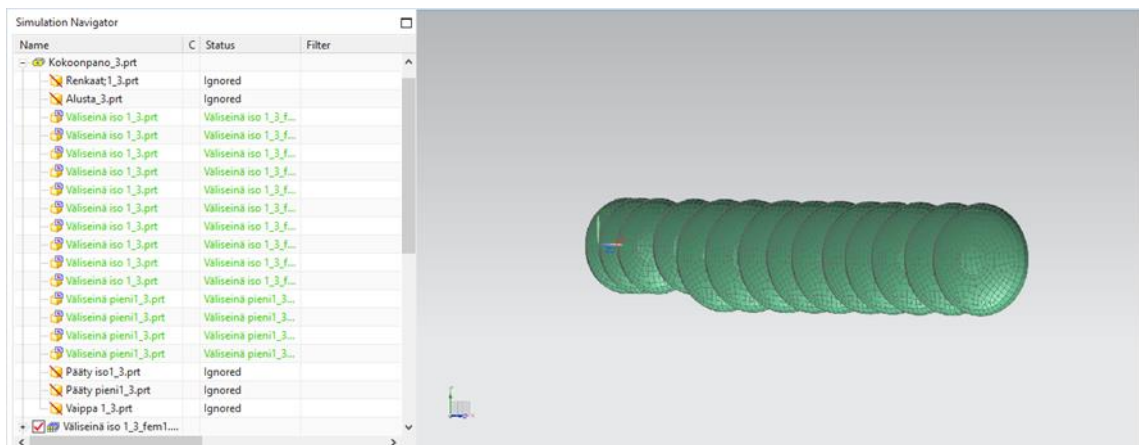
Assembly FEM:issä ei itsesään luoda FEM verkotusta kokonaisuudelle, vaan siihen tuodaan jo valmiiksi verkotetut osat. Osien tuominen assembly FEM:iin on yksinkertaista, mutta niiden yhdistäminen toimivaksi kokonaisuudeksi on hiukan mutkikkaampaa. Tässä työvaiheessa meni itsellä eniten aikaa, koska en aluksi tajunnut jakaa vaippaa sektoreihin.

6.4.1 Osien tuonti assembly FEM:iin

Assembly FEM:iä aloittaessa työstettävä ruutu on tyhjiällä kuvan 17 mukaisesti. Tämä johtuu siitä, että kappaleita ei ole vielä aktivoitu. Koska kappaleihin on jo luotu elementtiverkotus, niin ne tarvitaan vain tuoda tallennetuista tiedostoista.



Kuva 17. Assembly FEM:in aloitusruutu.

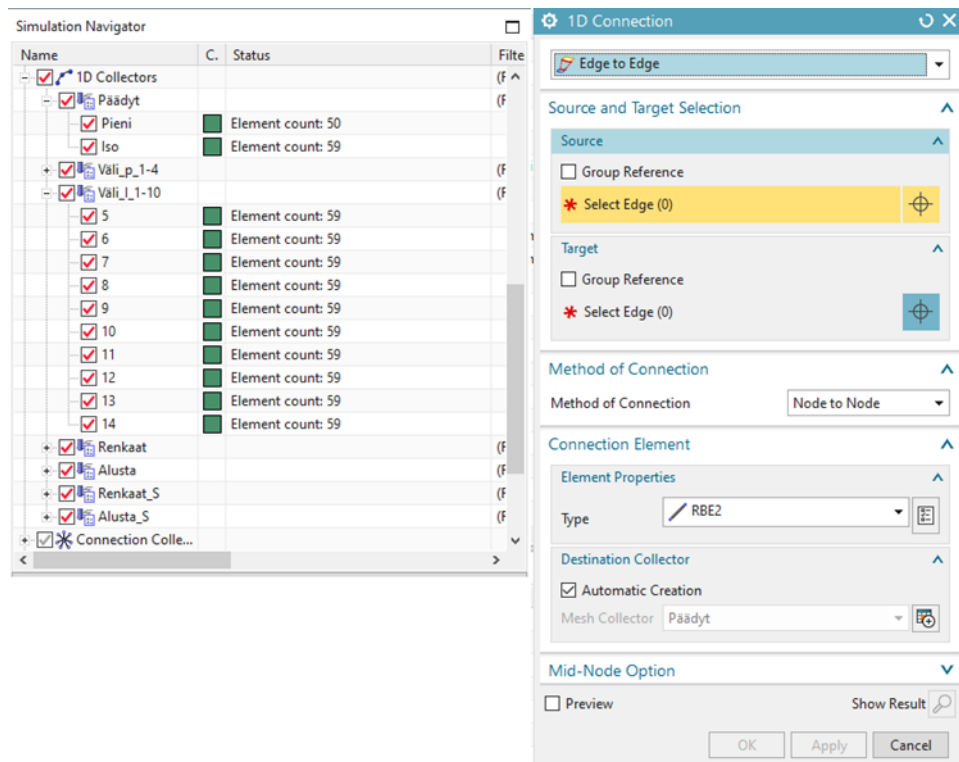


Kuva 18. Assembly FEM väliseinien aktivoinnin jälkeen.

Kuvassa 18 on tuotu tallennetut tiedostot väliseinien elementtiverkoista. Assembly FEM on siitä hyvä, että sillä voidaan käydä muuttamassa yksittäisiä kappaleita ilman tarvetta luoda uusia elementtiverkkoja kokoonpanolle. Kun kerran on luotu hyvä ja toimiva assembly FEM, niin pystytään nopeasti tarkastelemaan samaa tuotetta eri osilla. Täten saadaan nopeutettua tulevia simulaatioprosesseja tuotteen muuttuessa. Itse kokoonpanon parametrejä ei voida helposti muuttaa. Silloin joudutaan luomaan uusi assembly FEM, missä kokoonpanossa on jo käyty muuttamassa halutut asiat, esimerkiksi siirretty väliseiniä. Omassa työssäni haluan tukia mitä tapahtuu, jos siirretään kartion kaksi lähimmäistä väliseiniä hiukan kohti päätyä. Samalla pitää muistaa käydä vaipassa muuttamassa sektoreita, jotta liitos kohdat saadaan sopiviksi.

6.4.2 Liitokset

Liitosten teko on assembly FEM:in toimivuuden kannalta tärkeä työvaihe. Ilman niitä mikään kappale ei ole liittynyt toisiinsa ja lähtevät liitelemään simulaatiota tehdessä. Työkalu, jolla lähdetään tekemään liitoksia, on 1D Connections.



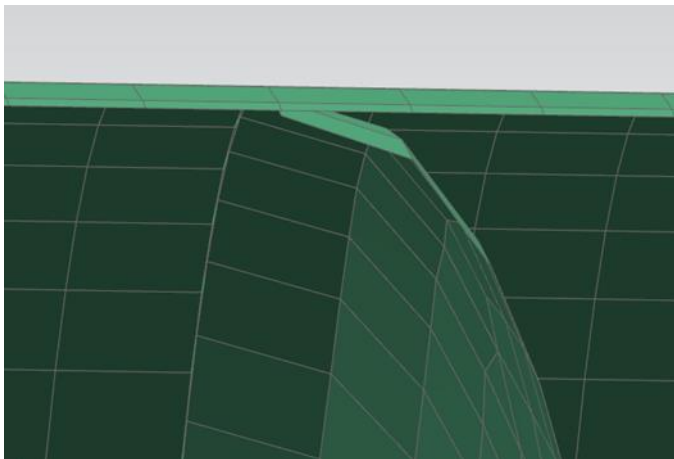
Kuva 19. Tehdyt liitokset ja siihen käytetty työkalu.

Liitoksia tehdessä kuvan 19 tapauksessa on suurimmaksi osaksi käytetty Edge to Edge vaihtoehtoa 1D Connection työkalusta. Ominaisuudeksi valitsin RBE2, mikä tarkoittaa, että tehty liitos yhdistää siihen valittujen kappaleiden solmut yhtenäiseksi. Jokaiselle liitostyypille luodaan oma osio ja numero navigaatio puuhun, jotta puusta ei tule sekava ja tiettyjen liitosten löytäminen yksinkertaistuu.

Kuten kuvasta 18 huomataan, niin kokoonpanolle on luotu seitsemän nimettyä osiota, missä jokaisessa on vähintään kaksi liitosta. Nyt jos simulaatiota tehdessään ohjelma havaitsee ongelman jossakin liitoksessa, niin se pystyy antamaan liitoksen nimen ja numeron sen löytämistä ja korjaamista varten.

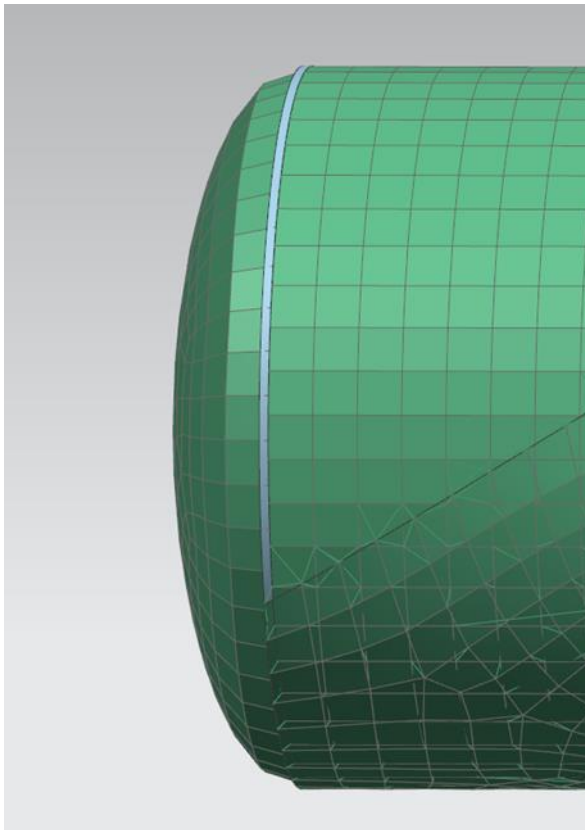
Navigaatio puusta huomataan, että alustalle ja renkaille on luotu kaksi eri osiota. Tämä johtuu siitä, että alustan ja renkaiden sivut on yhdistetty malliin eri tavalla kuin Edge to Edge vaihtoehdolla. Siinä on käytetty Edge to Face vaihtoehtoa. Siinä on manuaalisesti valittu kaikki elementit, jotka tulevat vaipassa kosketuksiin alustan ja renkaiden reunojen kanssa.

Huomioitavaa kuvasta 19 on liitosnumeroiden vieressä Element count, mikä on 1D elementissä kahden eri kappaleen kiinnittyneiden elementtien lukumäärä. Siitä pystytään tarkistamaan, että luotu 1D connection on oikeasti kiinnittäytynyt. Esimerkiksi osiossa Vä-li_I_1-10 jokaisella 1D elementillä on samat elementti lukumäärät (59) kiinnityksissä. Tämä on hyödyllistä, koska nyt tiedetään, että kaikkien tämän osien elementtiverkot ovat samankokoisia ja kiinnittyneet samalla tavalla vaippaan.



Kuva 20. Väliseinän ja vaipan liitos kohta.

Kuvasta 20 nähdään miten mallin esivalmistelussa tehdyt sektorit ja niihin luodut elementtiverkkojen reunat osuvat juuri väliseinän reunan kanssa yhteen. Näin saadaan kuvassa 19 olevat Edge to Edge komennolla yhdistetyt elementtiverkostot ja niiden solmut yhdistettyä toisiinsa ilman suurempia ongelmia. Ilman sektoreita voidaan kiinnittää kappaleet elementteihin, mutta tällöin joudutaan muuttamaan simuloinnin parametrejä. Parametrien muuttaminen simulaatiossa voi olla riskialtista ja tarvitaan kokemusta ja tietoa mitä kukin simulaatio parametri tekee simulaatiolle.



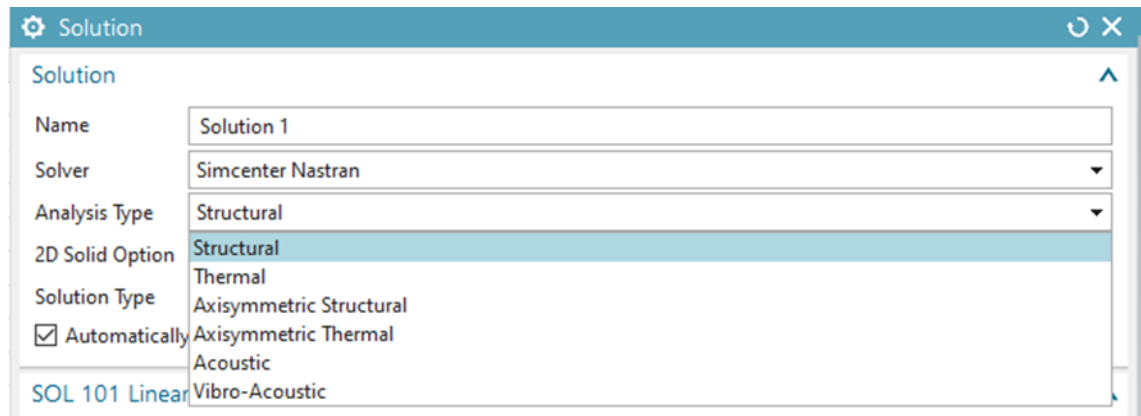
Kuva 21. Vetopöydän alustan elementtiverkon ylitys vaipan elementtiverkosta.

Omassa työssäni jouduin muuttamaan yhtä simulaatio parametriä, koska koko kappaleeseen ei ole luotu elementtiverkkoja. Kuvasta 21 huomataan, että vetopöydän alusta ylittää vaipan elementtiverkoston. Sama ylitys tapahtuu myös perävaunun toisessa päässä. Tämä johtuu pääty- ja väliseinien geometriaan tehtyjen muutoksista. Todellisuudessa päätyseinät ja väliseinät ovat geometrisesti erilaisia ja kuvan 18 pienen harmaan siivun kohdalla päätyseinässä on taso, joka poistettiin geometrian kevennys vaiheessa. Poistettu taso on se, joka puoliperävaunun valmistus vaiheessa hitsataan kiinni vaippaan. Miksi kuvan 19 siivussa ei ole elementtiverkkoa johtuu siitä, että vaippaan on luotu

sektorit seinien kohdalle liitoksia varten. Päätyihin syntyvien siivujen koko on kokonaisuuteen nähden mitättömiä, vain muuta millimetri, ja vaikeuttaisivat suunnattomasti vaiipan elementtiverkoston luomista. Tästä syystä päätimme yhteistyössä opettajan kanssa jättää ne pois tässä työssä.

6.5 Simulointi

Simulointi on tämän projektin viimeinen osio. Siemens NX:stä löytyy monimuotoisia työkaluja simuloida sekä tutkia kappaleiden ja kokoonpanojen ominaisuuksia. Rakenteellisten ominaisuuksien tutkimiseen on käytetyin työkalua NX:än simulointiosioista. NX:llä voidaan myös tutkia kappaleen lämmön- sekä sähkönjohtavuutta ja akustisia ominaisuuksia.



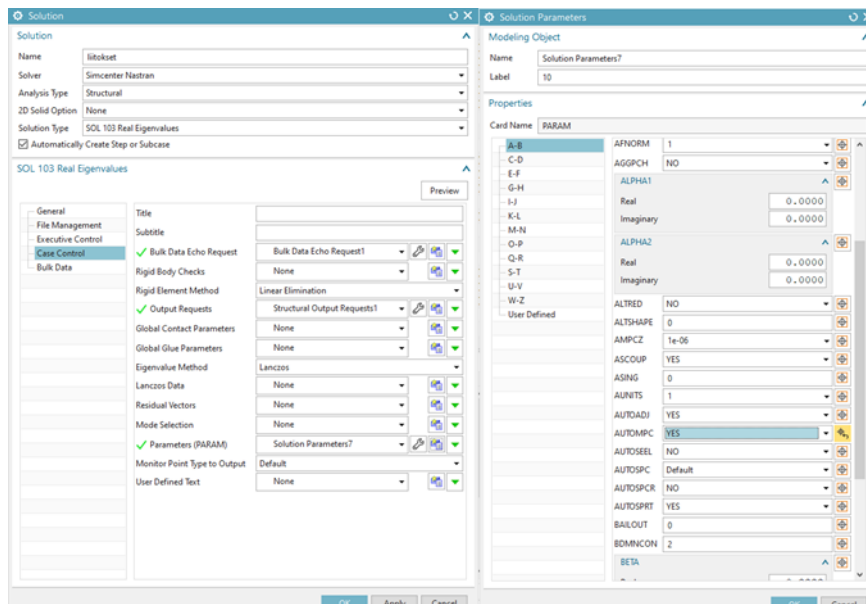
Kuva 22. Siemens NX:stä löytyvät ratkaisutyylit.

Tässä työssä keskitytään selvittämään puoliperävaunun säiliön rakenteellista kestävyyttä. Rakenteellista kestävyyttä tutkitaan valitsemalla kuvan 22 Analysis Type osioon Structural, eli rakenteellinen vaihtoehto. Syy sille, ettei Axisymmetric Structural vaihtoehtoa ei käytetä, on se, että kokoonpanon kappaleet ja niiden elementit eivät ole symmetrisesti tietyn akselin ympärillä.

Kuvan 22 Solution Type osiosta valitaan simulaatiolle sen fyysinen ympäristö, missä lähdetään tekemään simulaatiota. Tässä työssä hyödynnettiin kahta eri ympäristöä. Yksi liitosten tarkastamiseen ja toista itse simulaatioon.

6.5.1 Liitokset

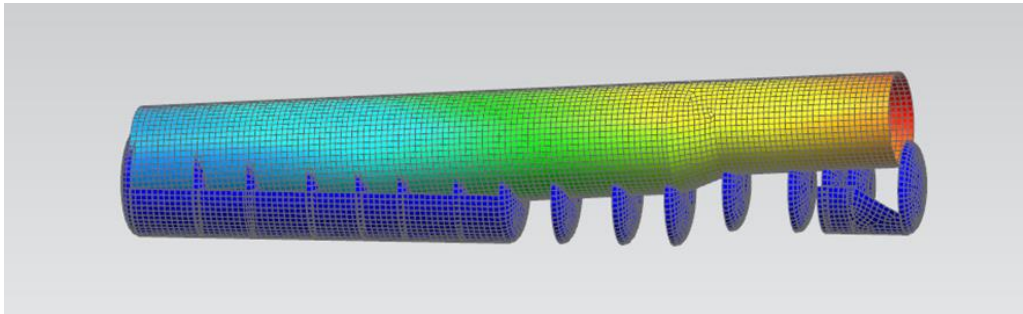
Vaikka liitokset luotiin kokoonpano FEM:in puolella, niin itse liitosten tarkastaminen tapahtuu simulaation puolella. Simulaatio puolella on ratkaisumenetelmä, mille ei tarvitse antaa kappaleelle tai kokoonpanolle minkäänlaisia raja-arvoja simuloimista varten. Tämä menetelmä vääntelee ja kääntelee malleja ja kappaleita eri taajuus alueilla. Täten pystytään tarkistamaan, mitkä osat ovat irtonaisia kokonaisuudesta. Irtonaiset osat lähtevät leijaillemaan avaruuteen, joten niiden huomaaminen on helppoa. Samalla voidaan tarkistaa tukevatko rakenteet ja niiden liitokset toisiaan katsomalla kiertyykö jokin osio tai kappale. Ideaalisessa tilanteessa kokoonpanon osat pysyvät toisissaan kiinni ja eivätkä väännä.



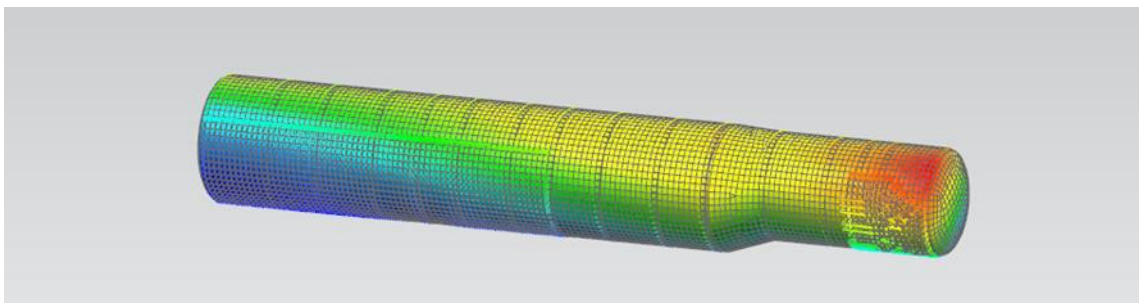
Kuva 23. Liitoksien tarkasteluun käytetty ratkaisumenetelmä.

Kuvassa 23 on liitosten tarkastamiseen käytetty ratkaisumenetelmä SOL 103 Real Eigenvalues, joka on luotu laskemaan kappaleen ominaistaajuuksia ja ominaismuotoja. Täten sitä voidaan hyödyntää liitosten tarkastamiseen. Huomioitavaa tässä työssä on kuvan 21 vetopöydän alustan elementtiverkoston päädyn ylitys. Tässä tilanteessa joudutaan muuttamaan simulaation parametrejä. Parametrien muuttaminen tapahtuu kuvan 23 simulaation Solution ikkunassa Case Control valikon Parameters (PARAM) laittamalla AUTOMPC "yes-vaihtoehto" päälle. Mallissa renkaat ja vetopöytä alusta menevät hiukan vaippaan luodun elementti verkoston yli, joten kuvan 19 Edge to Edge komento ei toimi ilman AUTOMPC parametria. AUTOMPC mahdollistaa kuvan 20 alustan päädyn

ja vaipan päätyyn luodun Edge to Edge komennon liikkumisen yhtenäisenä liitoksena simulaatiossa.



Kuva 24. Kokoonpano ilman toimivia liitoksia.



Kuva 25. Kokoonpano toimivilla liitoksilla

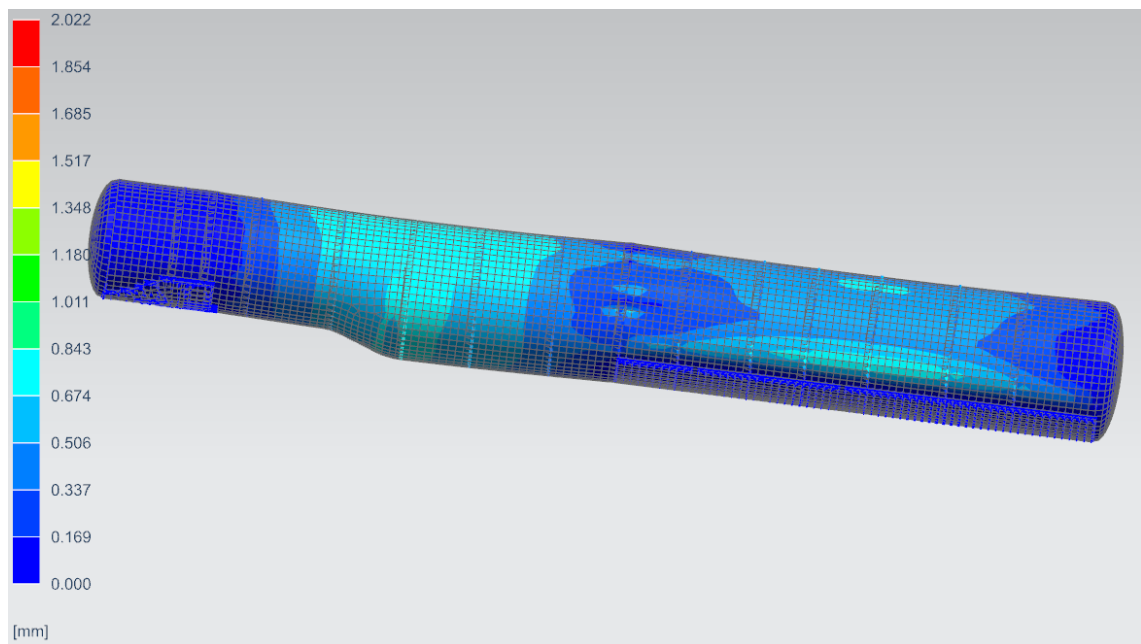
Kuvasta 24 nähdään mitä kokoonpano FEM:ille tapahtuu $0,3109 \cdot 10^{-9}$ MHz taajuudella, kun liitoksia ei ole luotu kokoonpanoon. Huomataan että vaippa ei ole kiinnittynyt alustoihin sekä päädyt ja väliseinät eivät ole kiinnittyneet vaippaan.

Kuvan 25 tilanne on samalta $0,3109 \cdot 10^{-9}$ MHz taajuudelta, mutta tässä tapauksessa tilanteeseen on lisätty kuvassa 19 tehdyt liitokset. Huomataan, että tehdyt liitokset toimivat ajatellulla tavalla ja kappaleen kaikki osat ovat liittyneet toisiinsa. Samalla voidaan päätellä, että kappaleiden fyysiset ominaisuudet toimivat myös, koska kappale ei ole vääntynyt rullalle millään tavalla. Eli tiedetään, että väliseinät, alustat ja päädyt kaikki tukevat vaippaa.

7 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

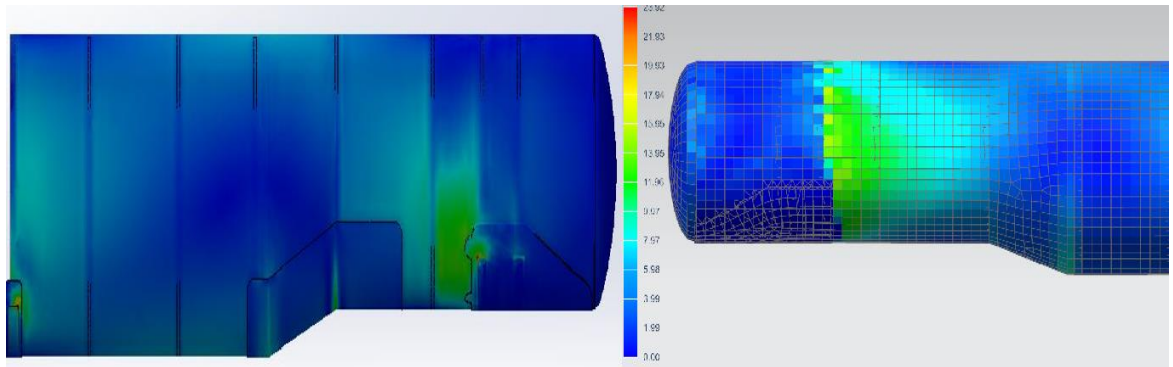
Simulaation tuloksista lähdetään tarkastelemaan, millaisia rasituksia työssä tutkitulle kappaleelle aiheutuu ja mihin rasitukset kohdistuvat. Tuloksia verrataan toimeksiantajan omiin simulaatioihin. Työn tavoitteena on se, että lasketut rasitukset kohdistuisivat samoille alueille, kuin yrityksen omien laskelmien mukaan. Tulokset kuitenkin eroavat toisistaan hiukan, koska laskennoissa on käytetty eri materiaaleja. Ainoa tulos, jota emme voi verrata keskenään on hydrostaattinen paine, koska toimeksiantaja ei ole saanut laskettua sitä itse.

Maksimaalisessa massassa lähdettiin tarkastelemaan rakenteen kokonaisrasitusta ja kappaleen kriittisiä kohtia. Simulaatiolta toivottiin, ettei katkaistun kartion kohdilla olisi liian suuria siirtymiä.



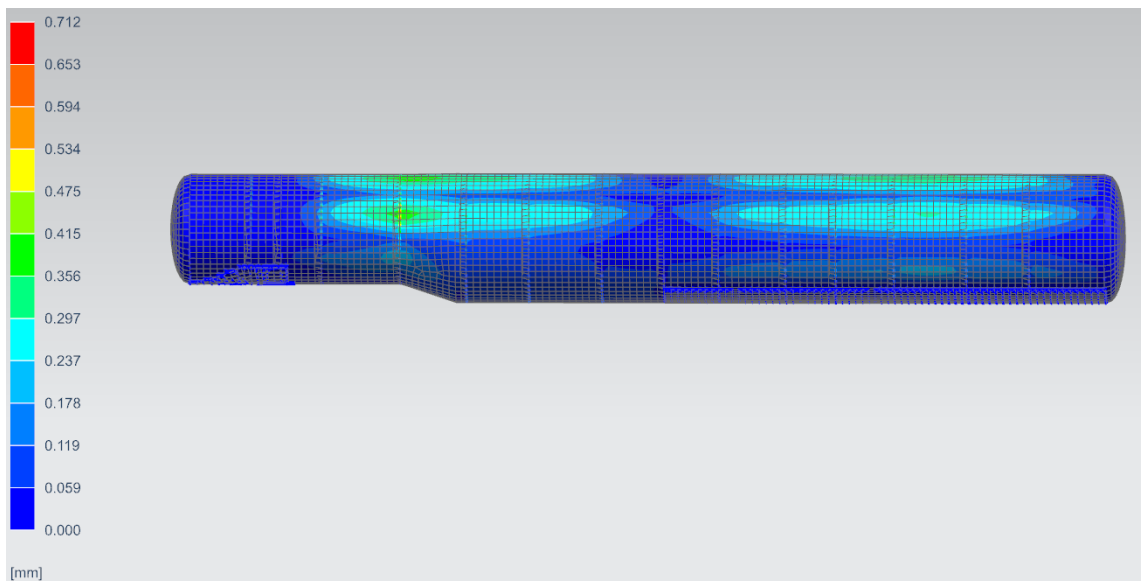
Kuva 26. Maksimaallisen massan tulokuva.

Kuvasta 26 nähdään mihin alueisiin kohdistuu rasituksia. Huomataan myös, että katkaistun kartion kohdilla solmujen siirtymät ovat 0.508–0.843 millimetrin välillä. Siirtymät tässä tapauksessa ovat todella pienet ja rakenne kestää tämän ongelmitta. Suurimmat siirtymät tässä tapauksessa kohdistuvat reiällisten väliseinien keskellä olevien reikien reunoille. Joka tässä tapauksessa on 2.022 millimetriä, mikä on siirtymänä minimaalista.



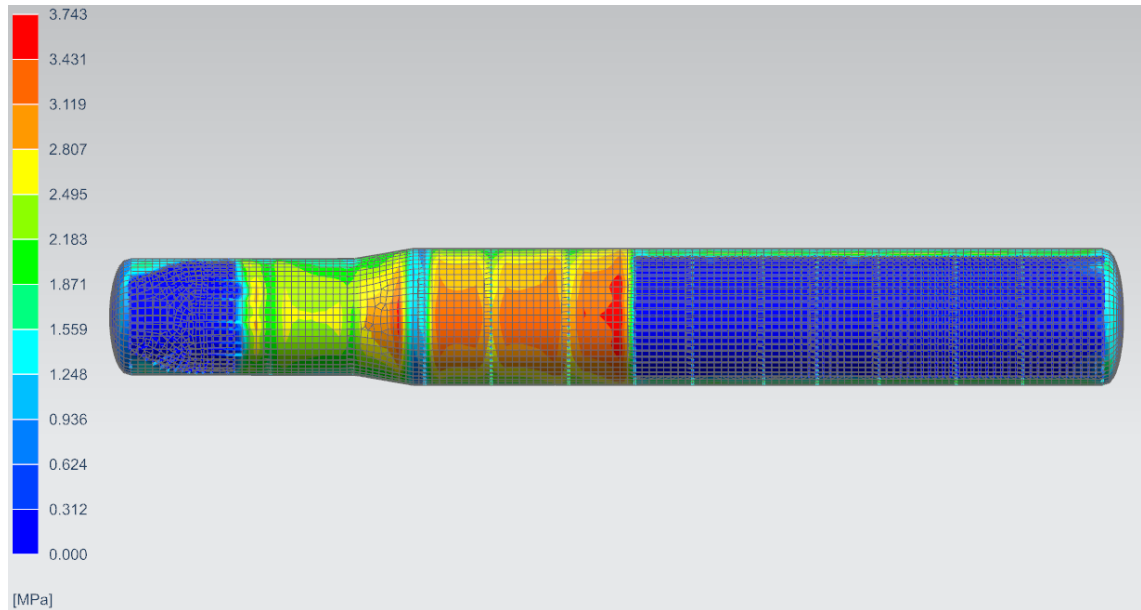
Kuva 27. Vertaus yrityksen omaan simulaatioon.

Kuvassa 27 vasemmalla puolella on kuva yrityksen omasta simulaatiosta ja oikealla tässä työssä tehdystä simulaatiosta. Kuvista huomataan, että rasitukset kohdistuvat samoille alueille. Suurin rasitus kohdistuu vetopöydän alustan reunalle 13.95 MPa:n voimalla. Tämä ei vaikuta materiaalin kestävyteen mitenkään, koska materiaalin myötöraja on 210 MPa (American Elements 2021). Hyvä huomio kuvasta 27 on miten yrityksen lisäämä vahvike katkaistun kartion kohdalla muuttaa rasituksien kohdistumisia.



Kuva 28. Hydrostaattisen paineen aiheuttamat siirtymät.

Kuvasta 28 nähdään mihin kohtaan lastatun aineen aiheuttama hydrostaattisen paineen rasitukset kohdistuvat. Rasitus kohdistuu säiliön yläreunaan ja sivuille, joka aiheuttaa 0.297–0.534 millimetrin siirtymän solmuja kohden. Tämä on todella pieni siirtymä, joten voidaan todeta sen olevan mitätön ja rakenne kestää tämän ongelmitta.



Kuva 29. Hydrostaattisen paineen aiheuttama jännitys MPa.

Hydrostaattinen paine aiheuttaa säiliön pohjalle vetoalustan ja telin välille maksimissaan 3.743 MPa:n jännityksen, minkä säiliön materiaali kestää ilman ongelmia.

Saadut tulokset ovat yrityksen mielestä käyttökelpoisia ja auttavat havainnollistamaan millaisia voimia, rasituksia ja siirtymiä skenaariot aiheuttavat. Yllättävintä simulaatioissa oli, mihin kohtiin siirtymät kohdistuivat. Ennen simulaatioiden aloittamista oletettiin, että siirtymät olisivat enimmäkseen katkaistun kartion hitsaussaumojen kohdilla. Simulaatiot kumminkin osoittivat, että siirtymät olivat enimmäkseen säiliön sivuilla. Tämä on todennettu yrityksen omilla simulaatioilla. Etenkin hydrostaattisen paineen skenaario oli hyödyllinen, koska he eivät itse olleet simuloineet tätä.

Ylipäätänsä säiliön rakenne ja valitut materiaalit tulevat kestäämään kevytpolttoöljyn aiheuttamat rasitukset. Säiliön parantamista varten ehdotetaan vahvikelevyn lisäämisen katkaistukartion kohdille.

8 ARVIOINTI JA POHDINTA

Tämän opinnäytetyön aihe ei ollut missään nimessä helpoimmasta päästä, mutta sitäkin opettavaisempi. Opin ajattelemaan loogisemmin asioita ja alussa tein helpoista asioista vaikeampaa kuin ne ovat. Esimerkiksi telialustaa lähdin aluksi mallintamaan lähestulkoon kokonaan, kun sen pystyi mallintamaan yksinkertaisesti pelkkänä levynä. Opin myös miettimään ja löytämään mallinnetuista kappaleista kriittisiä osia, mitkä kohdat voivat pettää simulaatiossa.

Opinnäytetyössä vaikeinta oli päästä käyntiin ja saada ajatuksesta kiinni, mitä pitäisi tehdä. Mallin luominen 3D muodossa oli yksinkertaista ja helppoa, mutta solidin rakenteen muuttaminen Shelliksi aiheutti hiukan päänvaivaa. Tukirakenteiden ja voimien sijoittaminen rakenteeseen oli yksinkertaista ja helposti pääteltävissä olevaa pienten las-kutoimitusten kera. Itse simuloimisessa jouduin ajattelemaan hiukan enemmän, koska kappaleiden muuttaminen levyiksi muutti niiden tosisuuntaa. Tämä aiheutti sen, että niihin asetettujen voimien ja tukirakenteiden suunta oli väärinpäin. Saadut tulokset eivät ole 100 % varmuudella tarkkoja. Tämä ei haitannut tässä työssä, koska haluttiin vain nähdä mihin kohtiin rasitukset kohdistuvat.

Tulevaisuudessa voidaan kumminkin jatkojalostaa annettua rakennetta ja lisätä tuki elementtejä tähän. Voidaan myös vaihtaa kuljetettava tavaraa esimerkiksi jauhesementtiin ja katsoa miten tämä vaikuttaa tuotteeseen. Tällä voidaan laajentaa tuotteen käyttötarkoitusta ja markkinaa eri kuluttajille

LÄHTEET

Goncharov, P & Artamonov, I & Khalito, T.2014. Engineering Analysis with NX Advanced Simulation. Siemens Product Lifecycle Management Inc.

Global Combustion 2021. Oil fuel properties. Viitattu 12.01.2021 <http://www.globalcombustion.com/oil-fuel-properties/>

KAR-Lehtonen oy 2021. Viitattu 13.01.2021 <https://kar-lehtonen.fi/>

KAR-Lehtonen oy kuljetussäiliöt 2021. Viitattu 13.01.2021 <https://kar-lehtonen.fi/kuljetussai-liot/kevyet-oljyt-polttonesteet/>

Femto.eu 2020. Viitattu 14.10.2020 <http://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/04/Siemens-PLM-NX-Nastran-brochure.pdf>

Seppänen & Kervinen & Parkkila & Karkela & Meriläinen, P.2010.Maol taulukot. Helsinki Otavan Kirjapaino Oy

American Elements 2021. Viitattu 25.1.2021 <https://www.americanelements.com/aluminum-2014-alloy>

Cook, R.D. & Malkus, D.S. & Plesha M.E. & Will, R.J. 2001. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. New York WILEY